กลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเพื่อป้องกันการหยุดชะงักจากกรณีไฟฟ้าดับผ่านระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

นายบัณริ เข็มกลัดมุกต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2568

ENERGY-SHARING STRATEGY IN MASS RAPID TRANSIT SYSTEMS FOR PREVENTING SERVICE DISRUPTIONS DUE TO POWER OUTAGES VIA EMERGENCY SELF-TRACTION SYSTEM

Banri Khemkladmuk

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2025

กลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเพื่อป้องกันการหยุดชะงักจากกรณีไฟฟ้าดับผ่านระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา มงคลดี)
ประธานกรรมการ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กีรติ ชยะกุลศิรี)
กรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน ลีตน)
กรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย)
กรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บัณริ เข็มกลัดมุกต์: กลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเพื่อป้องกันการหยุดชะงักจากกรณีไฟฟ้าดับผ่านระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน (ENERGY-SHARING STRATEGY IN MASS RAPID TRANSIT SYSTEMS FOR PREVENTING SERVICE DISRUPTIONS DUE TO POWER OUTAGES VIA EMERGENCY SELF-TRACTION SYSTEM)
อาจารย์ที่ปรึกษา: ศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 312 หน้า.

คำสำคัญ : ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ปัญหาไฟดับ ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนผ่านระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน (Emergency Self-Traction System: ESTS) ซึ่งเป็นแนวคิดสำคัญในการลดความจำเป็นในการติดตั้ง ESTS ให้กับรถไฟฟ้าทุกขบวน ขณะเดียวกันยังคงสามารถบรรเทาผลกระทบจากสถานการณ์ไฟดับที่อาจทำให้การเดินขบวนรถหยุดชะงักและผู้โดยสารตกค้างบนเส้นทางได้ โดยขั้นตอนการดำเนินการกำหนดให้ขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองขับเคลื่อนตนเองไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดก่อน แล้วจึงแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เหลือให้แก่ขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งระบบ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทดสอบการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้กรณีศึกษาเป็นระบบรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ 6 รอบพระชนมพรรษา สาย 2 หรือรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม พร้อมกำหนดตัวแปรทดสอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกคือระยะห่างการปล่อยขบวนรถไฟฟ้า 3 ระดับ คือ 3.45 6 และ 8 นาที และส่วนที่สองคือสัดส่วนการติดตั้ง ESTS 3 ระดับ คือร้อยละ 25 50 และ 75 เมื่อรวมกันแล้วได้ 9 กรณีทดสอบ เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบภายใต้สถานการณ์ไฟดับทั้งโครงข่ายที่กำหนด

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับทั้งระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้าและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS อย่างชัดเจน โดยเมื่อระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้าเท่ากับ 3.45 นาที ระบบมีอัตราความสำเร็จในการอพยพขบวนรถไฟฟ้าทุกขบวนเท่ากับร้อยละ 68.97 100 และ 100 สำหรับสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ร้อยละ 25 50 และ 75 ตามลำดับ ขณะที่กรณีระยะห่างเท่ากับ 6 นาที มีอัตราความสำเร็จเท่ากับร้อยละ 58.82 73.53 และ

85.29 และกรณีระยะห่างเท่ากับ 8 นาที มีอัตราความสำเร็จเท่ากับร้อยละ 36.11 63.89 และ 80.56 ตามลำดับ ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การลดระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้าและการเพิ่มสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ช่วยเพิ่มโอกาสในการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและเพิ่มความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการช่วยเหลือ อย่างไรก็ตาม ความล้มเหลวของระบบส่วนใหญ่เกิดจากข้อจำกัดเชิงพื้นที่มากกว่าการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าสำรองโดยรวมของ ESTS ดังนั้น กลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS จึงมีศักยภาพในการลดความจำเป็นในการติดตั้ง ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนได้ โดยยังคงสนับสนุนการอพยพผู้โดยสารในสถานการณ์ไฟดับได้ในระดับที่เหมาะสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนักศึกษา .....

ปีการศึกษา 2568 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

BANRI KHEMKLADMUK: ENERGY-SHARING STRATEGY IN MASS RAPID TRANSIT SYSTEMS FOR PREVENTING SERVICE DISRUPTIONS DUE TO POWER OUTAGES VIA EMERGENCY SELF-TRACTION SYSTEM
THESIS ADVISOR: PROF. THANATCHAI KULWORAWANICHPONG, Ph.D., 312 PP.

Keywords : Mass rapid transit system Power outage Emergency self-traction system Energy-sharing

This thesis proposes an energy-sharing strategy for mass rapid transit systems using the Emergency Self-Traction System (ESTS). The concept aims to reduce the need to install ESTS on every train while still maintaining the ability to evacuate passengers to the nearest station during main power supply failures. Under the proposed strategy, ESTS-equipped trains first use their reserve electrical energy for self-propulsion to the nearest passenger station and then share the remaining electrical energy with trains not equipped with ESTS. A mathematical model was developed and implemented in MATLAB, using the BTS Silom Line as the case study. Two key variables were investigated: train headway, at 3.45, 6, and 8 minutes, and ESTS installation ratio, at 25%, 50%, and 75%, resulting in nine test scenarios under a full-network power outage condition.

The results indicate that the performance of the proposed energy-sharing strategy is strongly dependent on both train headway and ESTS installation ratio. For the 3.45-minute headway case, the evacuation success rates were 68.97%, 100%, and 100% for ESTS installation ratios of 25%, 50%, and 75%, respectively. For the 6-minute headway case, the corresponding success rates were 58.82%, 73.53%, and 85.29%, while for the 8-minute headway case, they were 36.11%, 63.89%, and 80.56%, respectively. These findings show that shorter headways and higher ESTS installation ratios improve the likelihood of successful energy-sharing pair formation and increase

the spatial coverage of emergency assistance. Most system failures were caused by spatial constraints rather than by an overall shortage of reserve electrical energy. The proposed ESTS-based energy-sharing strategy therefore demonstrates strong potential to reduce the number of trains requiring ESTS installation while still supporting passenger evacuation during power outage events.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Electrical Engineering
Academic Year 2025

Student's Signature .....
Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากทั้งบุคคลและหน่วยงานหลาย ๆ ภาคส่วน ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังเป็นกำลังใจและเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์และบุคลากรประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้ความรู้ทางด้านวิชาการและเป็นแบบอย่างในการดำรงชีวิตทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบันเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนทุนการศึกษา “กิตติบัณฑิต” สำหรับเป็นค่าใช้จ่ายในการศึกษาและค่าใช้จ่ายในการเผยแพร่ผลงานวิชาการแก่ผู้วิจัยจนสามารถสำเร็จการศึกษาในหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิตได้

ขอขอบคุณญาติสนิทชิดเชื้อและกัลยาณมิตรทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและดูแลส่งเสริมทางด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในทุกด้านด้วยความรักและความห่วงใย ซึ่งเป็นแรงผลักดันสำคัญแก่ผู้วิจัยจนการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

บัณริ เข็มกลัดมุกต์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ค

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูป ..... ฐ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 7

1.3 สมมติฐานของการวิจัย 7

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น 7

1.5 ขอบเขตของการวิจัย 8

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 8

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ 9

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 11

2.1 บทนำ 11

2.2 การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 11

2.2.1 การจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการไหลกำลังไฟฟ้า 11

2.2.2 การประยุกต์ใช้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 16

2.2.3 กลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 สรุป 26

3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 28

3.1 บทนำ 28

3.2 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบจ่ายไฟ 28

3.2.1 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 28

3.2.2 ระบบจ่ายไฟสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 36

3.2.3 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย 42

3.3 พลวัตการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 48

3.4 เทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยวิธีการฉีดกระแส 56

3.5 ปัญหาไฟดับและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 60

3.5.1 สาเหตุของปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 61

3.5.2 ผลกระทบของปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 63

3.5.3 มาตรการในการรับมือปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 64

3.6 ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 68

3.6.1 องค์ประกอบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 69

3.6.2 ภาพรวมการทำงานของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 78

3.7 แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน 82

3.7.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน 82

3.7.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน 83

3.7.3 ประเภทของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน 84

3.7.4 การวิเคราะห์ข้อมูลแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน 88

3.7.5 แบบจำลองแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน 93

3.8 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 97

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.8.1 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งข้างทาง 97
3.8.2 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับโครงข่ายระบบจ่ายไฟ 98
3.8.3 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับรถไฟฟ้า 98
3.9 ผลกระทบแรงดันไฟฟ้าตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในโครงข่ายระบบจ่ายไฟ 101
3.10 สรุป 103

4 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 104

4.1 บทนำ 104
4.2 แบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 104
4.2.1 การพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 104
4.2.2 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 109
4.2.3 ข้อมูลจำเพาะของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ใช้เป็นกรณีศึกษา 110
4.2.4 การทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 115
4.3 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 123
4.3.1 การพัฒนาแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 123
4.3.2 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 130
4.3.3 ตัวอย่างการคำนวณการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS 133
4.3.4 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา 145
4.3.5 การทดสอบแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 147
4.4 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 151
4.4.1 การทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 151
4.4.2 การทดสอบแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 154

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 สรุป 165

5 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 166

5.1 บทนำ 166

5.2 เงื่อนไขการทดสอบและการออกแบบการจำลองผล 166

5.2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ 167

5.2.2 การกำหนดกรณีทดสอบและขั้นตอนการจำลอง 173

5.3 การทดสอบ 179

5.3.1 การทดสอบช่วงชั่วโมงเร่งด่วน (H = 3.45 นาที) 180

5.3.2 การทดสอบช่วงชั่วโมงปกติ (H = 6 นาที) 193

5.3.3 การทดสอบช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน (H = 8 นาที) 204

5.4 การอภิปรายผลการทดสอบ 214

5.4.1 ผลของ H และ $\%ESTS$ ต่อสมรรถนะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของระบบ 214

5.4.2 ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS 216

5.4.3 ข้อพิจารณาเชิงออกแบบและความเป็นไปได้ในการใช้จริง 218

5.5 สรุป 219

6 สรุปและข้อเสนอแนะ 220

6.1 บทนำ 220

6.2 สรุปผลการศึกษา 220

6.3 ข้อเสนอแนะ 222

รายการอ้างอิง 224

ภาคผนวก ก ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่และการออกแบบขนาด ESTS 238

ก.1 ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่ TOSHIBA SCiB™ 23AH 239

ก.2 การออกแบบแบตเตอรี่แพ็ค 240

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ก.2.1 การกำหนดจำนวนเซลล์แบบอนุกรม 241
ก.2.2 การกำหนดจำนวนเซลล์แบบขนาน 241
ก.2.3 การตรวจสอบความสามารถในการรองรับกำลังไฟฟ้าของแพ็ค 244
ก.2.4 การคำนวณน้ำหนักรวมของเซลล์ในแพ็ค 245
ก.2.5 สรุปผลการออกแบบแพ็ค 246
ภาคผนวก ข การคำนวณระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS 248
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS 251
ภาคผนวก ง บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา 285
ประวัติผู้เขียน 312

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการไหลกำลังไฟฟ้า 12
2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 16
2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 21
3.1 แรงดันมาตรฐานสำหรับระบบจ่ายไฟของรถไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163:200 39
3.2 ค่าความเร่งมาตรฐานสำหรับใช้กับรถไฟฟ้า 53
3.3 การเปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า 57
3.4 ยอดสถิติการเกิดปัญหาไฟดับของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในแต่ละปี 67
3.5 ยอดสถิติการเกิดปัญหาไฟดับของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรายสายของรถไฟฟ้า 67
3.6 การเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของแบตเตอรี่แต่ละประเภท 72
3.7 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแต่ละประเภท 87
3.8 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเธียมไททาเนตออกไซด์ยี่ห้อต่าง ๆ ในท้องตลาด 91
3.9 การประเมินเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไททาเนตออกไซด์ยี่ห้อต่าง ๆ ในท้องตลาด 92
3.10 การเปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลองแต่ละแบบ 94
3.11 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า 100
4.1 ข้อมูลจำเพาะระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม 111
4.2 ข้อมูลตำแหน่งสถานีผู้โดยสารและสถานีจ่ายไฟในระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม 113
4.3 ข้อมูลตารางเดินรถของระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม 114
4.4 ผลการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 121
4.5 ลำดับการทำงานของแบบจำลอง ESTS ในแต่ละช่วงเวลาการจำลอง 132
4.6 ข้อมูลเริ่มต้นของกรณีตัวอย่าง 134
4.7 ตำแหน่งและระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า 136
4.8 ความต้านทานของแต่ละเส้นทางในวงจรย่อย 138

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.9 สรุปการหาผลเฉลยในแต่ละรอบ 142
4.10 พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS ตามสัดส่วนการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า 146
4.11 การดึงพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ภายใต้เงื่อนไขบรรทุกน้ำหนักโหลดของรถไฟฟ้า 158
5.1 กรณีทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 174
5.2 การกำหนดขนาด ESTS ที่เหมาะสมในแต่ละกรณีทดสอบ 175
5.3 สรุปผลการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS สำหรับ 9 กรณีทดสอบ 215
5.4 ผลของการเพิ่ม $\%ESTS$ ต่ออัตราความสำเร็จในแต่ละค่า H 215
5.5 ผลเชิงไฟฟ้าของการทดสอบแต่ละกรณี 217
ก.1 ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23 Ah 240
ก.2 สรุปผลการคำนวณของแบตเตอรี่แพ็ค Toshiba SCiB™ 23 Ah 246
ค.1 ผลการทดสอบ Case 01 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 25% 252
ค.2 ผลการทดสอบ Case 02 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 50% 255
ค.3 ผลการทดสอบ Case 03 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 75% 258
ค.4 ผลการทดสอบ Case 04 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 25% 261
ค.5 ผลการทดสอบ Case 05 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 50% 265
ค.6 ผลการทดสอบ Case 06 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 75% 269
ค.7 ผลการทดสอบ Case 07 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 25% 273
ค.8 ผลการทดสอบ Case 08 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 50% 277
ค.9 ผลการทดสอบ Case 09 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 75% 281

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 1

1.2 แผนแม่บทระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (M-MAP2) ระยะ 20 ปี (พ.ศ.2553-2572) 2

1.3 ข้อมูลสถิติการใช้ระบบขนส่งสาธารณะในประเทศไทย 3

1.4 ปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 4

1.5 การรับพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าสองแหล่งในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 5

3.1 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ให้บริการรับส่งผู้โดยสารทั่วโลก 29

3.2 ขบวนรถไฟฟ้า 30

3.3 ตัวอย่างขบวนรถไฟฟ้า 30

3.4 ทางวิ่งรถไฟฟ้า 31

3.5 ตำแหน่งการสร้างรางวิ่งรถไฟฟ้า 31

3.6 รูปแบบการวางชานชาลาของสถานีผู้โดยสาร 32

3.7 สถานีจ่ายไฟย่อย 32

3.8 โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถ 33

3.9 ศูนย์ควบคุมการเดินรถ 34

3.10 เส้นทางระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล 35

3.11 ระบบป้อนไฟฟ้าแบบ Third rail และ Overhead line 37

3.12 ระบบจ่ายไฟกระแสตรง 37

3.13 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้า 38

3.14 ระบบจ่ายไฟกระแสสลับ 41

3.15 แพนโทกราฟ 41

3.16 ตัวอย่างระบบจ่ายไฟกระแสตรงของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีน้ำเงิน 44

3.17 ตัวอย่างระบบจ่ายไฟกระแสตรงของรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีเขียวเข้ม ส่วนต่อขยาย 46

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.18 เทคโนโลยีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย 47
3.19 ลักษณะสมบัติของแรงฉุดลากของขบวนรถไฟฟ้า 49
3.20 แผนภาพวัตถุอิสระแสดงการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า 50
3.21 สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ในระบบขนส่งมวลชนตามสมการเดวีส์ 53
3.22 เส้นโครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้า 55
3.23 ระยะวิกฤตการเบรก 55
3.24 โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 58
3.25 แบบจำลองระบบจ่ายไฟกระแสตรงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 58
3.26 ปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 61
3.27 การหยุดชะงักในการให้บริการระบบ 63
3.28 ผู้โดยสารตกค้างบนขบวนรถไฟฟ้าหรือสถานีผู้โดยสาร 63
3.29 การจ่ายไฟแบบระบบคู่ขนาน 65
3.30 องค์ประกอบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 69
3.31 ความสามารถในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละประเภท 72
3.32 การรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟหลัก 79
3.33 การรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรก 79
3.34 การส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ 80
3.35 การขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าด้วยพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและ ระบบจ่ายไฟหลัก 80
3.36 การส่งพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานให้กับส่วนอื่น ๆ ของระบบ 80
3.37 การดึงพลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บไว้มาใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าขณะระบบจ่ายไฟขัดข้อง 81
3.38 การรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรกในกรณีที่ระบบจ่ายไฟหลักขัดข้อง 81
3.39 การส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกไปยังรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ กรณี ระบบจ่ายไฟหลักเกิดขัดข้อง 82
3.40 ส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน 83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.41 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน 84
3.42 รูปทรงของเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน 89
3.43 แบบจำลองอย่างง่าย 95
3.44 แบบจำลองสมมูลย์เทวินิน 95
3.45 แบบจำลองสมมูลย์เทวินินแบบปรับปรุง 95
3.46 แบบจำลองตามเวลา 95
3.47 แบบจำลองอย่างง่ายแบบวงจรสมมูลนอร์ตัน 96
3.48 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งข้างทาง 98
3.49 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับโครงข่ายระบบจ่ายไฟ 98
3.50 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับรถไฟฟ้า 99
3.51 ความต้านทานของรางตัวนำและรางวิ่งที่เพิ่มขึ้นตามระยะทาง 101
4.1 ลักษณะเส้นโครงร่างความเร็วของขบวนรถไฟฟ้าที่ควบคุมเชิงสัดส่วน 105
4.2 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองส่วนการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า 106
4.3 ระบบจ่ายไฟกระแสตรงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 107
4.4 แบบจำลองพายของระบบจ่ายไฟกระแสตรง 107
4.5 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองในส่วนโครงข่ายระบบจ่ายไฟ 108
4.6 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 109
4.7 ระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม 111
4.8 รายการสถานีผู้โดยสารบนเส้นทางระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม 112
4.9 โครงร่างความเร็วของขบวนรถไฟฟ้า 113
4.10 คุณลักษณะแรงฉุดลากและแรงเบรกของขบวนรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม 114
4.11 โครงร่างความชันของทางวิ่ง 115
4.12 ความเร็ว-ระยะทางของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน 116
4.13 เวลา-ระยะทางของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน 116
4.14 แรงฉุดลากรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน 116

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.15 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน 117
4.16 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน 117
4.17 ความเร็ว-ระยะทางของรถไฟฟ้าหลายขบวน 118
4.18 ระยะทาง-เวลาของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน 119
4.19 แรงฉุดลากรถไฟฟ้าหลายขบวน 119
4.20 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวน 120
4.21 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวน 120
4.22 โครงสร้างสำหรับพัฒนาแบบจำลองการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า 123
4.23 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า 124
4.24 ระยะทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจากระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินไปยังขบวนรถไฟฟ้า 126
4.25 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 131
4.26 ตัวอย่างเส้นทางการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS 134
4.27 วงจรย่อยการคำนวณตัวอย่างการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS 134
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องขับเคลื่อนรถไฟฟ้า 145
4.29 การใช้พลังงานไฟฟ้าขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่าง ๆ 145
4.30 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่แพ็ค Toshiba SCiB™ 23Ah 147
4.31 แรงดันไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 148
4.32 กระแสไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 148
4.33 กำลังไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 148
4.34 พลังงานไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 149
4.35 สถานะการชาร์จ-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน 149
4.36 การใช้พลังงานไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้ากรณีก่อนและหลังการติดตั้ง ESTS 150
4.37 แนวคิดของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 152
4.38 โครงสร้างแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 152

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.39 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 153
4.40 ตำแหน่งจำลองสถานการณ์ไฟดับขณะขบวนรถไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่ 155
4.41 การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 25% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร ... 155
4.42 การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 50% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร ... 156
4.43 การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 75% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร ... 156
4.44 พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS จ่ายเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 25% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร 156
4.45 พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS จ่ายเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 50% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร 157
4.46 พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS จ่ายเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 75% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร 157
4.47 ความสัมพันธ์เชิงระยะทาง-เวลาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขณะไฟดับ 160
4.48 ความสัมพันธ์เชิงความเร็ว-เวลาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขณะไฟดับ 160
4.49 แรงดันไฟฟ้าของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าและขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า 162
4.50 กระแสไฟฟ้าของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าและขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า 162
4.51 กำลังไฟฟ้าของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าและขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า 163
4.52 พลังงานไฟฟ้าคงเหลือและสถานะการชาร์จของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า 164
5.1 การกระจายตำแหน่งของ ESTS ครอบคลุมแนวเส้นทาง 177
5.2 ตัวแปรทดสอบและตัวแปรควบคุมที่กำหนดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS 177
5.3 ขั้นตอนการจำลองการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS 178
5.4 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25% 181
5.5 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25% 182
5.6 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25% 182
5.7 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25% 183
5.8 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25% 183

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.9 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25%..... 183
5.10 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25% 184
5.11 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%..... 185
5.12 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50% 185
5.13 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50% 186
5.14 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50% 186
5.15 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%... 187
5.16 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%..... 187
5.17 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50% 188
5.18 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%..... 189
5.19 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75% 189
5.20 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75% 190
5.21 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75% 190
5.22 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%... 191
5.23 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%..... 191
5.24 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75% 192
5.25 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%..... 194
5.26 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%..... 194
5.27 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%..... 195
5.28 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%..... 195
5.29 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25% 195

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.30 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25% 195
5.31 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%..... 196
5.32 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%..... 197
5.33 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%..... 197
5.34 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%..... 198
5.35 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%..... 198
5.36 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50% 198
5.37 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50% 199
5.38 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%..... 199
5.39 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%..... 200
5.40 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%..... 200
5.41 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%..... 201
5.42 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%..... 201
5.43 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75% 202
5.44 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75% 202
5.45 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%..... 203
5.46 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%..... 205
5.47 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%..... 205
5.48 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%..... 206
5.49 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%..... 206
5.50 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25% 206
5.51 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25% 206
5.52 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%..... 207
5.53 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%..... 208
5.54 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%..... 208

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.55 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%.....209
5.56 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%.....209
5.57 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50% 209
5.58 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50% 210
5.59 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%.....210
5.60 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%.....211
5.61 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%.....211
5.62 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%.....212
5.63 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%.....212
5.64 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75% 212
5.65 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75% 213
5.66 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%.....213
ก.1 ลักษณะทางกายภาพของเซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23 Ah.....239
ค.1 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25%.....254
ค.2 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%.....257
ค.3 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%.....260
ค.4 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25% 264
ค.5 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50% 268
ค.6 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75% 272
ค.7 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25% 276
ค.8 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50% 280
ค.9 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75% 284

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

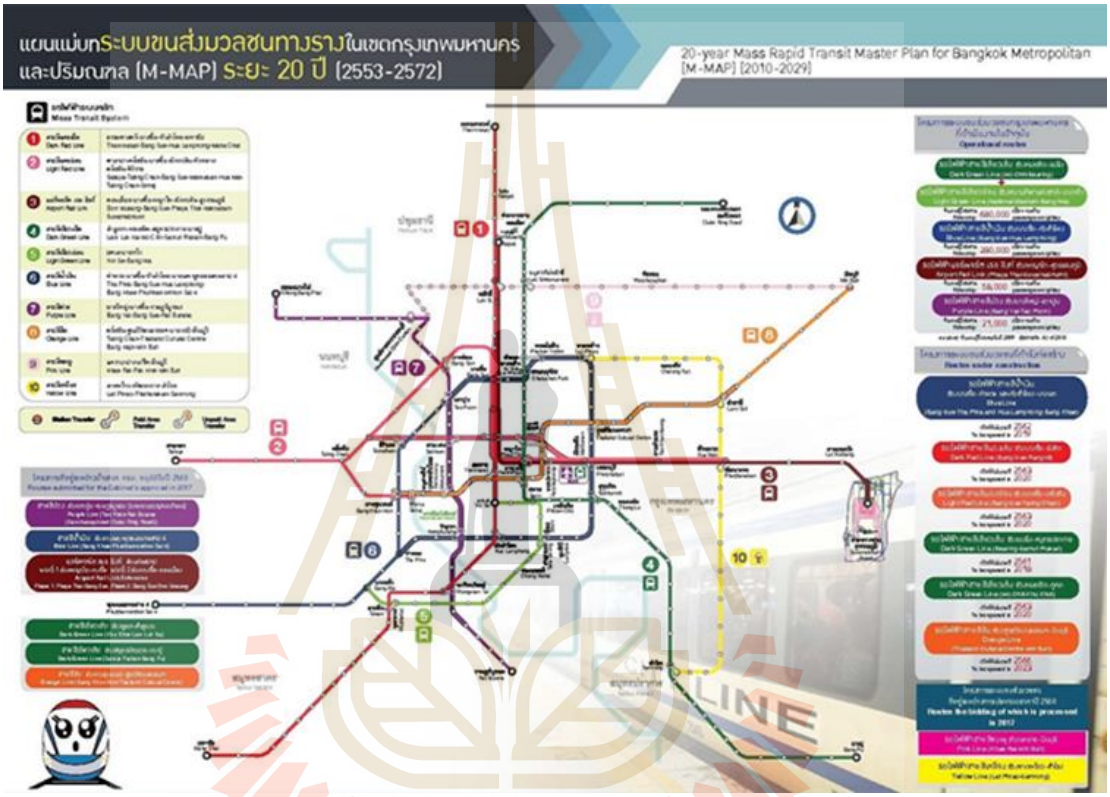
ปัจจุบันระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Mass Rapid Transit System: MRTS) ได้เข้ามาเป็นระบบขนส่งสาธารณะหลักที่มีบทบาทสำคัญในการขนส่งผู้โดยสารและกระจายสินค้าในเขตเมืองใหญ่ทั่วโลก แสดงดังรูปที่ 1.1 (Bao, 2018) เนื่องด้วยระบบนี้มีจุดเด่นที่เหนือกว่าระบบขนส่งสาธารณะประเภทอื่น ๆ อย่างชัดเจน ทั้งในแง่ของการให้บริการที่รวดเร็วตรงต่อเวลา ขีดความสามารถในการรองรับผู้โดยสารปริมาณมาก ความยืดหยุ่นของเส้นทางการให้บริการที่สามารถปรับให้สั้นหรือยาวได้ตามต้องการ ระดับการปล่อยมลพิษที่ต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดอุบัติเหตุทางถนนที่อาจจะเกิดขึ้นได้ และส่งเสริมให้เกิดการปรับปรุงทัศนียภาพในเขตเมือง นอกจากนี้ ยังมีส่วนช่วยในการกระจายความเจริญ กระตุ้นเศรษฐกิจ และยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่โดยรอบแนวเส้นทางรถไฟฟ้าตัดผ่าน (İnaç and Vayvay, 2018; Pirouz and Hajizadeh, 2020) จากคุณสมบัติเหล่านี้ ทำให้ประเทศไทยตระหนักถึงความสำคัญของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและมีการผลักดันให้เกิดการขยายโครงข่ายระบบนี้ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลตามแนวทางของ“แผนแม่บทการขนส่งมวลชนระบบรางในเขตกรุงเทพมหานครและพื้นที่ต่อเนื่อง” เพื่อเพิ่มศักยภาพของระบบขนส่ง



รูปที่ 1.1 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

(ที่มาภาพ: https://www.prachachat.net/property/news-398392 [เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม 2568])

สาธารณะและเสริมสร้างความเชื่อมโยงของโครงข่ายการเดินทางในพื้นที่เมืองและปริมณฑล แสดงดังรูปที่ 1.2 นอกจากนี้ ยังได้มีการดำเนินการขยายโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไปยังหัวเมืองหลักทั่วประเทศ เพื่อรองรับการเติบโตของเศรษฐกิจและการขยายตัวของเขตเมืองอย่างเป็นระบบ (ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2560; สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2553)

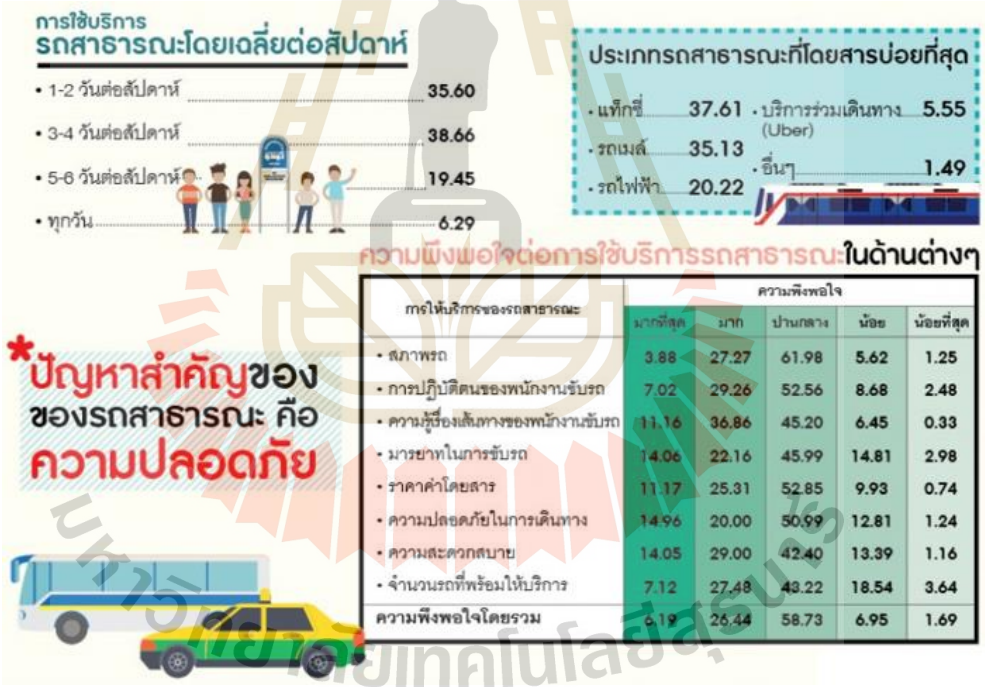


รูปที่ 1.2 แผนแม่บทระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (M-MAP2) ระยะ 20 ปี (พ.ศ.2553-2572)

(ที่มาภาพ: https://www.home.co.th/hometips/topic-8836 [เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม 2568])

แม้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทยจะได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอดหลายทศวรรษที่ผ่านมา แต่การให้บริการระบบยังคงต้องประสบกับข้อจำกัดและอุปสรรคหลายประการที่นำไปสู่ภาพลักษณ์ด้านลบอันส่งผลต่อระดับความเชื่อมั่นที่ประชาชนมีต่อระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ยกตัวอย่างเช่น อัตราค่าโดยสารที่สูงเกินไปเมื่อเทียบกับรายได้ของประชาชน โครงข่ายรถไฟฟ้ายังไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่ ปัญหาความแออัดของขบวนรถไฟฟ้าในชั่วโมงเร่งด่วน พฤติกรรมหรือวัฒนธรรมการเดินทางของประชาชน เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ทำให้ประชาชนส่วนใหญ่ยังคงเลือกใช้รถยนต์ส่วนตัว

หรือระบบขนส่งสาธารณะทางถนนมากกว่าระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ซึ่งนำไปสู่ปัญหาด้านการจราจรที่ติดขัดและมลพิษทางสิ่งแวดล้อมอันเป็นความท้าทายสำคัญที่ประเทศไทยกำลังเผชิญอยู่ในปัจจุบัน แสดงดังรูปที่ 1.3 (ปณิตา เผ่าลินจง และคณะ, 2565) จากประเด็นปัญหาที่เกิดกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนดังที่กล่าวมาข้างต้น อีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการให้บริการระบบนี้ นั่นคือความไม่แน่นอนในการให้บริการและปัญหาขัดข้องของระบบ ซึ่งส่วนใหญ่มักเกิดจากข้อบกพร่องทางเทคนิคของอุปกรณ์และระบบที่พบได้เป็นระยะ ๆ ระหว่างการให้บริการระบบ ไม่ว่าจะเป็น ความล้มเหลวของระบบควบคุมการเดินรถ ความขัดข้องของระบบอาณัติสัญญาณ ความผิดปกติของระบบประตูกั้นชานชาลา ปัญหาในระบบจ่ายไฟ เป็นต้น ทั้งนี้ในบางกรณีอาจไม่สามารถระบุสาเหตุได้อย่างชัดเจน จึงมักส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการตรวจสอบและแก้ไขปัญหาที่นานกว่าปกติ (ไทยรัฐออนไลน์, 2565; เดลินิวส์ออนไลน์, 2567; บีบีซีไทย, 2561)



รูปที่ 1.3 ข้อมูลสถิติการใช้ระบบขนส่งสาธารณะในประเทศไทย

(ที่มาภาพ: https://www.bltbangkok.com/poll/4055/ [เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม 2568])

ปัญหาความขัดข้องของระบบจ่ายไฟหรือปัญหาไฟดับ (Power Outage) ถือเป็นอุปสรรคสำคัญที่มีผลกระทบโดยตรงต่อความต่อเนื่องในการให้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยปัญหานี้ไม่เพียงแต่จะทำให้เกิดการหยุดชะงักของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

เท่านั้น แต่ยังส่งผลกระทบต่อผู้โดยสาร ทรัพย์สิน และโครงสร้างของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในอีกหลายมิติ ได้แก่ รถไฟฟ้าหยุดทำงานกะทันหันสร้างความตื่นตระหนกและกังวลใจให้แก่ผู้โดยสาร การจราจรติดขัดมีผู้คนจำนวนมากถูกขังอยู่บนขบวนรถไฟฟ้าและตกค้างตามสถานีผู้โดยสาร ผู้โดยสารบางรายที่มีโรคประจำตัวอาจได้รับผลกระทบจากการขาดอากาศหายใจขณะถูกขังอยู่บนขบวนรถไฟฟ้า ผู้โดยสารต้องสูญเสียโอกาสในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ขณะติดอยู่บนรถไฟฟ้าที่หยุดนิ่ง การให้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนถูกลดทอนความน่าเชื่อถือและมีผู้ใช้บริการบางส่วนหันไปพึ่งพาระบบขนส่งรูปแบบอื่นแทน อุปกรณ์ควบคุมระบบบางส่วนอาจจะได้รับความเสียหายจากการตัดไฟแบบกะทันหัน และในกรณีที่เลวร้ายที่สุดอาจจะมีผู้ใช้บริการบางรายเกิดความวิตกกังวล ขาดอากาศหายใจ หรือเกิดเหตุการณ์ร้ายแรงอื่น ๆ ท่ามกลางพื้นที่ที่แออัดและจำกัดของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ไปหยุดอยู่ในอุโมงค์ใต้ดินหรือบนทางยกระดับที่ยากแก่การรับความช่วยเหลือจากเจ้าหน้าที่ได้ แสดงดังรูปที่ 1.4 (Chovančíková and Dvořák, 2019; Haes Alhelou et al., 2019) ทั้งนี้ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ระบบต้องหยุดทำงานจากการเกิดไฟดับและจำนวนผู้ใช้บริการระบบในขณะนั้น

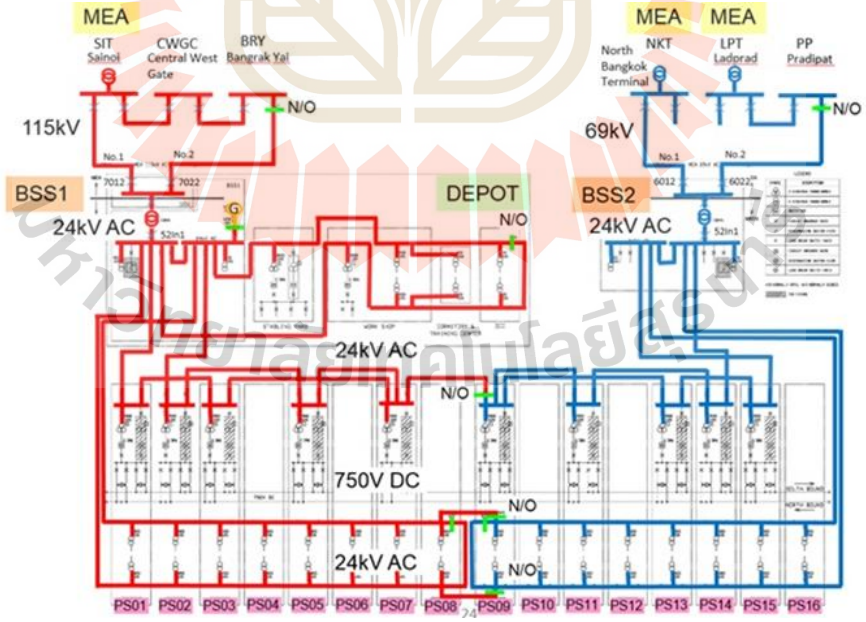


รูปที่ 1.4 ปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

(ที่มาภาพ: https://mgronline.com/live/detail/9600000129688, https://hilight.kapook.com/view/86682 และ https://www.pptvhd36.com/news/ประเด็นร้อน/70276 [เข้าถึงเมื่อ 16 มกราคม 2568])

ทั้งนี้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและภาคเอกชนได้เล็งเห็นถึงผลกระทบของปัญหาไฟดับที่อยู่คู่ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทยมาอย่างยาวนาน จึงทำการเร่งดำเนินการศึกษาและพัฒนามาตรการที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการหยุดชะงักของระบบขณะเกิดปัญหาไฟดับ ส่งผล

ให้ในปัจจุบันมีการนำมาตรการป้องกันปัญหาไฟดับด้วยวิธีการจัดสรรรูปแบบการรับพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าสองแหล่งที่อยู่ในเขตพื้นที่ให้บริการที่ต่างกันมาใช้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายต่าง ๆ เพื่อให้สถานีไฟฟ้าเหล่านั้นทำงานประสานกันทั้งในขณะที่ระบบทำงานปกติและเกิดเหตุไฟดับขึ้น โดยระบบดึงเอาพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าหลักที่อยู่ในเขตพื้นที่เดียวกันเพียงหนึ่งสถานีขณะระบบจ่ายไฟทำงานได้อย่างปกติ แต่เมื่อสถานีไฟฟ้าหลักเกิดขัดข้องไม่สามารถจ่ายไฟต่อไปได้ก็จะมีการสับไปใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าสำรองของอีกเขตหนึ่งในการเดินระบบแทน ด้วยการดำเนินการตามมาตรการดังกล่าวทำให้การบริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพที่มากขึ้น แสดงดังรูปที่ 1.5 (กรมการขนส่งทางราง, 2563) อย่างไรก็ตาม มาตรการป้องกันปัญหาไฟดับนี้ยังมีช่องโหว่ใหญ่ ๆ ประการหนึ่ง นั่นคือ การทำงานของสถานีไฟฟ้าสองแหล่งที่กล่าวมาข้างต้นเป็นปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมจากระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยตรง เมื่อเกิดเหตุไฟดับเป็นวงกว้างในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑลก็ไม่พ้นปัญหาไฟดับที่ส่งผลให้ระบบต้องหยุดทำงานด้วยเช่นเดิม ดังที่พบเห็นตามเหตุการณ์ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเส้นทางต่าง ๆ หยุดชะงักจากปัญหาไฟดับในปัจจุบัน (กระทรวงคมนาคม, 2568) จึงกล่าวได้ว่าแม้มาตรการจัดสรรพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าสองแหล่งจะช่วยลดความเสี่ยงของไฟดับได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังไม่ถือเป็นวิธีการที่สมบูรณ์แบบหรือดีที่สุดสำหรับการแก้ปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน



รูปที่ 1.5 การรับพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าสองแหล่งในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

(ที่มาภาพ: https://www.drt.go.th/library/ระบบการจ่ายไฟฟ้าสำหรับ-2 [เข้าถึงเมื่อ 16 มกราคม 2568])

จากความท้าทายในประเด็นด้านเสถียรภาพในการให้บริการพลังงานไฟฟ้าจัดสรรรูปแบบการรับพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าสองแหล่งที่ยังไม่สามารถทำงานได้อย่างครอบคลุมในกรณีที่เกิดปัญหาไฟดับเป็นวงกว้าง ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน (Emergency self-traction system) จึงถือเป็นอีกนวัตกรรมหนึ่งที่มีความน่าสนใจในแง่ของการทำงานที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก โดยระบบจะอาศัยคุณสมบัติของเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานที่เป็นองค์ประกอบหลักในการสำรองพลังงานไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟให้ระบบยังสามารถใช้งานส่วนที่สำคัญบางส่วนได้อย่างต่อเนื่องในระยะเวลาสั้น ๆ เช่น ระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ อุปกรณ์สื่อสารในขบวนรถไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อป้องกันการหยุดชะงักของระบบแบบทันทีทันใดเมื่อเกิดปัญหาไฟดับ (Yuan et al., 2012; Xu et al., 2018) นอกจากนี้ในบางระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนยังอาจมีการออกแบบให้สามารถสำรองพลังงานไฟฟ้าที่มากพอสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดด้วยความเร็วต่ำ เพื่อลดความเสี่ยงที่ผู้โดยสารบนขบวนรถไฟฟ้าอาจต้องติดอยู่กลางทางขณะเกิดปัญหาไฟดับ (Tian et al., 2022) อย่างไรก็ตาม การนำระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินมาใช้งานยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ยกตัวอย่างเช่น ต้นทุนการติดตั้ง การซ่อมบำรุง ขนาดและน้ำหนัก ความเชี่ยวชาญของเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น (Liu and Li, 2020) นอกจากนี้ความกังวลเกี่ยวกับความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบนี้บนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ไม่ได้มีการเกิดปัญหาไฟดับบ่อยนัก ก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญที่อาจจะทำให้การนำระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินมาใช้งานจริงในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนปัจจุบันยังไม่เป็นที่นิยมเท่าที่ควร ซึ่งนำมาสู่ภาพรถไฟฟ้าที่ประสบปัญหาหยุดชะงักที่กลางทางขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับอยู่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายระบบ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินไปยังรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งระบบ เพื่อลดความจำเป็นในการติดตั้งระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินให้กับรถไฟฟ้าทุกขบวนในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนให้มีปริมาณที่น้อยที่สุด ในขณะที่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะยังคงสามารถเคลื่อนย้ายผู้โดยสารไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดด้วยระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินที่เหลืออยู่ได้เช่นเดิมในสถานการณ์ที่แหล่งจ่ายไฟหลักเกิดความขัดข้อง โดยหลักแนวคิดนี้จะมีการศึกษาและประเมินความเป็นไปได้ผ่านการจำลองสถานการณ์ไฟดับในระบบขนส่งมวลชนหลายขบวน พร้อมทั้งวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น จำนวนขบวนรถไฟที่ติดตั้งระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน ระยะทางที่ขบวนรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ เป็นต้น สำหรับการนำเสนอเนื้อหาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง การพัฒนาแบบจำลอง การจำลองสถานการณ์ ผลการจำลอง การวิเคราะห์ และอภิปรายผล ตลอดจน

ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้และการวิจัยในอนาคต โดยมุ่งหวังว่างานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะมีส่วนช่วยในการยกระดับความปลอดภัยและประสิทธิภาพของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาแบบจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายใต้สถานการณ์ไฟดับ

1.2.2 เพื่อพัฒนาและศึกษากลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

1.2.3 เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินและกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในสถานการณ์ไฟดับ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินจะสามารถสำรองพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบให้เคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้อย่างปลอดภัยเมื่อเกิดสถานการณ์ไฟดับ

1.3.2 ภายใต้กลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า ขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินจะสามารถแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เหลือให้แก่ขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งระบบบางขบวน เพื่อเพิ่มจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่สถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 กรณีศึกษาที่ใช้ในการจำลอง คือ รถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ 6 รอบพระชนมพรรษา สาย 2 หรือรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม ซึ่งมีระยะทางให้บริการรวม 13.65 กิโลเมตร ประกอบด้วยสถานีผู้โดยสาร จำนวน 14 สถานี และสถานีไฟฟ้าย่อยกระแสตรงขนาด 750 โวลต์ จำนวน 7 สถานี

1.4.2 กำหนดให้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินของขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบสามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าสำรองได้เพียงพอสำหรับขับเคลื่อนขบวนของตนเอง และแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ให้แก่ขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งระบบอย่างน้อยอีกหนึ่งขบวน เพื่อเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดเมื่อเกิดสถานการณ์ไฟดับ

1.4.3 การจำลองพิจารณาเฉพาะการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินและการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าในช่วงเกิดสถานการณ์ไฟดับ

1.4.4 การคำนวณและการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดำเนินการด้วยโปรแกรม MATLAB

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 พัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีการติดตั้งระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินบนขบวนรถไฟฟ้าบางขบวน

1.5.2 การจำลองกำหนดให้เกิดไฟดับระหว่างการเดินรถ หลังจากรถไฟฟ้าทุกขบวนเข้าสู่เส้นทาง และสิ้นสุดเมื่อมีขบวนรถไฟฟ้าขบวนใดขบวนหนึ่งเดินรถไป–กลับครบ 1 รอบ

1.5.3 จำลองและประเมินผลการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า การใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน และผลของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าภายใต้สถานการณ์ไฟดับที่กำหนด

1.5.4 การจำลองสิ้นสุดเมื่อกระบวนการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจากขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินไปยังขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งระบบเสร็จสิ้น โดยไม่พิจารณาการกู้คืนขบวนรถไฟฟ้าที่อยู่นอกเงื่อนไขของกระบวนการดังกล่าว

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้แบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ติดตั้งระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะของระบบภายใต้สถานการณ์ไฟดับ

1.6.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ทั้งในด้านการทำงาน ข้อจำกัด และศักยภาพในการเพิ่มความสามารถในการรับมือกับสถานการณ์ไฟดับ

1.6.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบและติดตั้งระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

1.6.4 ผลการวิจัยและหลักแนวคิดที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้หรือพัฒนาต่อยอดกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนประเภทอื่น หรือระบบขนส่งทางรางที่มีเงื่อนไขการเดินรถและการจ่ายพลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

โครงสร้างของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท และ 4 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงปัญหาความเป็นมา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น และขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินการงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 3 หัวข้อ ได้แก่ การจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการไหลกำลังไฟฟ้า การประยุกต์ใช้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน และกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เพื่อให้ทราบถึงหลักแนวคิดพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ต่อไป

บทที่ 3 กล่าวถึงการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยมุ่งเน้นในส่วนเนื้อหาสำคัญทั้งหมด 8 หัวข้อ ได้แก่ ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบจ่ายไฟ พลวัตการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยวิธีการฉีดกระแส ปัญหาไฟดับและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน และผลกระทบแรงดันไฟฟ้าตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในโครงข่ายระบบจ่ายไฟ

บทที่ 4 กล่าวถึงการพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ติดตั้งระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน เพื่อนำไปใช้ในการประเมินผลการทำงานของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในสถานการณ์ต่าง ๆ ในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5 กล่าวถึงการจำลองผลทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินและการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบการทำงาน การใช้พลังงานไฟฟ้าและประมวลผลสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบที่พัฒนาขึ้นต่อไป

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุป ประมวลผล และข้อเสนอแนะในการนำงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ไปต่อยอดในอนาคต

ภาคผนวก ก ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่และการออกแบบขนาด ESTS
ภาคผนวก ข การคำนวณระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS
ภาคผนวก ง บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งศึกษากลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลดจำนวนระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินที่จำเป็นต้องติดตั้งในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน สำหรับการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ทำการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการไหลกำลังไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน และกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จากฐานข้อมูลที่มีการรวบรวมงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีมาตรฐาน เช่น ฐานข้อมูลจาก IEEE Springer MDPI เป็นต้น เพื่อเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการพัฒนากรอบแนวคิดและกระบวนการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทถัด ๆ ไป อีกทั้งยังช่วยให้เห็นถึงช่องว่างของงานวิจัยในอดีตที่นำไปสู่การต่อยอดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคต

2.2 การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งหัวข้อที่ทำการศึกษาออกเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ การจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการไหลกำลังไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน และกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยเนื้อหาในแต่ละหัวข้อได้คัดสรรและกลั่นกรองมาจากบทความวิจัยที่ได้รับการยอมรับและตีพิมพ์บนฐานข้อมูลมาตรฐานดังที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.1 ผลจากการศึกษาสามารถสรุปรายละเอียดในแต่ละหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

2.2.1 การจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการไหลกำลังไฟฟ้า

การจำลองผลการทำงานและการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นกระบวนการสำคัญสำหรับการวิเคราะห์และประเมินพฤติกรรมของระบบภายใต้สภาวะการ

ทำงานต่าง ๆ ก่อนการดำเนินการก่อสร้างและใช้งานระบบจริงในแต่ละพื้นที่ ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา นักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาและปรับปรุงกระบวนการจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจากแนวทางการคำนวณแบบดั้งเดิม จนเกิดเป็นวิธีการต่าง ๆ ที่มีประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และจุดเด่นที่แตกต่างกัน จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการไหลกำลังไฟฟ้า

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	ประเด็นงานวิจัยที่ดำเนิน
2015	Kulworawanichpong	การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวนที่บูรณาการกับการแก้ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันอย่างง่าย
2016	Zhang, Song, and Zhang	อัลกอริทึมควบคุมการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ดีที่สุดสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ
2016	Su, Tang, and Wang	การประเมินกลยุทธ์สำหรับลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยแบบจำลองควบคุมการทำงานของรถไฟฟ้าที่เหมาะสม
2016	Mongkoldee, Leeton, and Kulworawanichpong	การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขบวนเดียวพร้อมการพิจารณาศักย์ไฟฟ้าในราง
2018	Arboleya, Mohamed, and El-Sayed	การจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบกระแสตรงที่ครอบคลุมการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในระบบ
2018	Alnuman, Gladwin, and Foster	การสร้างแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวน
2019	Khodaparastan, Dutta, Saleh, and Mohamed	การสร้างแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานข้างทางในการทำงาน

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการไหลกำลังไฟฟ้า (ต่อ)

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	ประเด็นงานวิจัยที่ดำเนิน
2020	Kou, Fan, and Song	การสร้างแบบจำลองระบบรถไฟความเร็วสูงหลายขบวน
2021	Razmjou	การจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยใช้ MATLAB: กรณีศึกษาโครงการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน สายทาบริซ 2

จากตารางที่ 2.1 ได้มีการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนตั้งแต่ปี 2015 จนถึงปัจจุบัน พบว่านักวิจัยแต่ละท่านได้นำเสนอข้อมูลและหลักแนวคิดที่สำคัญสำหรับนำไปต่อยอดการพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เช่น ภาพรวมกว้าง ๆ ของแบบจำลอง สมการทางคณิตศาสตร์ที่จำเป็น หลักการทำงานของรถไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อให้เกิดความชัดเจนในเนื้อหาที่ผู้วิจัยได้ศึกษามาจะมีการสรุปผลการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยกล่าวถึงทฤษฎี หลักการ วิธีการดำเนินงานวิจัย รวมถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยนั้น ๆ โดยย่อดังนี้

Kulworawanichpong (2015) นำเสนอวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวนด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันแบบปรับปรุง วิธีการดังกล่าวช่วยลดความซับซ้อนในการจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขนาดใหญ่ โดยแปลงสมการสมดุลกำลังไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้าให้อยู่ในรูปสมการสมดุลกระแสไฟฟ้าแทน ส่งผลให้จำนวนรอบการคำนวณซ้ำลดลงกว่า 40% เมื่อเทียบกับวิธีการทั่วไป นอกจากนี้ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นยังรองรับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของขบวนรถแบบเรียลไทม์ ทำให้การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้ามีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญสำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

Zhang, Song, and Zhang (2016) นำเสนอแบบจำลองสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ผ่านการควบคุมความเร็วที่เหมาะสม (speed profile optimization) ของขบวนรถไฟฟ้า การควบคุมนี้จะสมดุลระหว่างปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าและการรักษาความตรงต่อเวลาของตารางเดินรถไปพร้อมกัน นอกจากนี้ แบบจำลองยังผสมผสานเทคโนโลยีเรียกพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรก (regenerative braking) เพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าอีกทางหนึ่งด้วย การพัฒนาแบบจำลองนี้อาศัยการแปลงสมการทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปโค้ดและทดสอบผ่านซอฟต์แวร์ MATLAB/m-file

โดยผลการทดสอบแสดงว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในขณะที่ยังรักษามาตรฐานการให้บริการตามตารางเดินรถได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Su, Tang, and Wang (2016) นำเสนอแบบจำลองการควบคุมการทำงานของขบวนรถไฟฟ้าที่บูรณาการพลศาสตร์การเคลื่อนที่และการจัดการพลังงานไฟฟ้าในแบบจำลองเดียว เพื่อค้นหาจุดทำงานที่เหมาะสมที่สุดของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวน ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยไม่กระทบต่อตารางเดินรถ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการปรับรูปแบบการขับเคลื่อนที่เหมาะสมสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 25% โดยไม่กระทบต่อตารางเดินรถ จุดเด่นของแบบจำลองนี้คือการพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า เช่น น้ำหนักขบวนรถ ความลาดชันของเส้นทาง และพฤติกรรมการเร่ง–เบรก ช่วยให้แบบจำลองวิเคราะห์หารูปแบบการควบคุมการเดินขบวนรถไฟฟ้าที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม่นยำ และใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

Mongkoldee, Leeton, and Kulworawanichpong (2016) นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขบวนเดี่ยวที่สามารถคำนวณศักย์ไฟฟ้าของรางขณะที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ โดยประยุกต์ใช้วิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า (current injection method) เพื่อวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบบัสที่ซับซ้อน ผลการทดสอบด้วยข้อมูลระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสุขุมวิท ประเทศไทยแสดงว่าแบบจำลองสามารถประเมินผลกระทบของกระแสไฟฟ้ารั่วไหลและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่อาจเป็นอันตรายต่อผู้โดยสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบระบบต่อลงดินและมาตรการป้องกันการผุกร่อน แบบจำลองนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนอื่น ๆ ได้โดยปรับเงื่อนไขและโครงสร้างพารามิเตอร์ แม้จะมีข้อจำกัดเรื่องการไม่ได้พิจารณาผลกระทบในระบบที่มีขบวนรถไฟฟ้าหลายขบวน แต่ก็ถือเป็นแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาต่อไป

Arboleya, Mohamed, and El–Sayed (2018) นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงที่ครอบคลุมการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า การทำงานของสถานีย่อยประเภทต่าง ๆ ระบบกักเก็บพลังงานและการป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ โดยแบบจำลองดังกล่าวแตกต่างจากแบบจำลองทั่วไปที่มักวิเคราะห์ส่วนต่าง ๆ แยกจากกัน ทำให้สามารถประเมินผลการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสมัยใหม่ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการวิเคราะห์ผลกระทบของระบบกักเก็บพลังงานทั้งแบบติดตั้งบนขบวนรถ (on-board) และแบบติดตั้งข้างทาง (wayside)

Alnuman, Gladwin, and Foster (2018) นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองพลวัตทางไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงหลายขบวน โดยใช้ความสามารถของซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink ในการสร้างแบบจำลองความละเอียดสูงเพื่อจำลองพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและการเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟของแต่ละขบวน ทำให้การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าในช่วงเวลาไดนามิกระดับมิลลิวินาทีที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแม่นยำและง่ายขึ้น นอกจากนี้แบบจำลองยังวิเคราะห์ปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินจากการเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าเมื่อไม่มีขบวนรถไฟฟ้าอื่นมารองรับได้อย่างครบถ้วน

Khodaparastan, Dutta, Saleh, and Mohamed (2019) นำเสนอแบบจำลองสำหรับศึกษาการเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงที่ใช้สถานีไฟฟ้าย่อยแบบผันกลับได้ (reversible substations หรือ RSS) ผ่านซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink จากผลการศึกษาพบว่าการติดตั้งสถานีไฟฟ้าย่อยแบบผันกลับช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 30% โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความถี่ของขบวนรถ รูปแบบการขับเคลื่อน และลักษณะเส้นทาง ข้อมูลจากแบบจำลองนี้มีคุณค่าสำหรับผู้วางนโยบายในการพิจารณาปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

Kou, Fan, and Song (2020) นำเสนอแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงโดยใช้หลักการตัวแทนหลายตัว (multi-agent) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้และการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ซับซ้อนระหว่างขบวนรถไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในโหมดต่าง ๆ โดยคำนึงถึงปัจจัยเชิงกายภาพสำคัญ เช่น ระยะทางระหว่างขบวนรถ ความต้านทานของสายส่ง เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกของรถไฟฟ้าขบวนหนึ่งไปสู่รถไฟฟ้าอีกขบวนที่กำลังเร่งความเร็ว ผลการศึกษาพบว่าการปรับตารางเดินรถอย่างเหมาะสมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 35% โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพิ่มเติม ซึ่งเป็นการค้นพบที่สำคัญในเชิงเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมสำหรับการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟความเร็วสูง

Razmjou (2021) นำเสนอแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงที่บูรณาการส่วนของการคำนวณการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าและการไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านซอฟต์แวร์ MATLAB โดยอ้างอิงข้อมูลการควบคุมขบวนรถไฟฟ้าและตารางเดินรถจากระบบจริง ทำให้แบบจำลองนี้วิเคราะห์การทำงานของระบบหลายขบวนได้ครบถ้วน น่าเชื่อถือ และมีประสิทธิภาพเป็นประโยชน์สำหรับวิศวกรในการทดสอบกลยุทธ์ประหยัดพลังงานไฟฟ้า เช่น ปรับตารางเดินรถ เปลี่ยนรูปแบบการขับเคลื่อน และติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน โดยไม่ต้องทดลองจริงซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง

Yu, Wang, and Qin (2024) นำเสนอแบบจำลองสำหรับหารูปแบบควบคุมการเคลื่อนที่ขบวนรถไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟและพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ โดยคำนึงถึงสมดุลระหว่างการประหยัดพลังงานไฟฟ้ากับความตรงต่อเวลาในการให้บริการ ผลการศึกษาพบว่าวิธีการบูรณาการนี้ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าการปรับตารางเดินรถหรือรูปแบบการขับเคลื่อนเพียงอย่างเดียวถึง 15–20%

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการไหลกำลังไฟฟ้า พบว่าแต่ละงานวิจัยจะมีโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยส่วนวิเคราะห์พฤติกรรมพลวัตการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าและการไหลของกำลังไฟฟ้า จากนั้นจะเพิ่มเติมมิติการทำงานอื่นที่ต้องการจำลอง เช่น การเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ ระบบกักเก็บพลังงาน เป็นต้น แนวคิดและเทคนิคเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับต่อยอดสู่การพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวนที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในบทที่ 3 ต่อไป

2.2.2 การประยุกต์ใช้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ปัจจุบันระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขับเคลื่อนโดยพลังงานไฟฟ้าเต็มรูปแบบ ปัญหาไฟดับระหว่างการดำเนินงานอาจส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้โดยสาร จึงจำเป็นต้องหามาตรการป้องกันและรักษาสถานะการทำงานของระบบ งานวิจัยที่ศึกษาส่วนนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน (Emergency Self-Traction System: ESTS) ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่มีประสิทธิภาพที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จากสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่ถูกเผยแพร่ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน สามารถสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยต่าง ๆ ไว้ในตารางที่จัดเรียงลำดับตามปีงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	ประเด็นงานวิจัยที่ดำเนิน
2012	Yuana, Gua, Liua, Zhanga, and Lv	การออกแบบและวิเคราะห์ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเขตเมือง
2014	Wang, Ge, and Li	การวิเคราะห์และควบคุมเพื่อความเหมาะสมของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (ต่อ)

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	ประเด็นงานวิจัยที่ดำเนิน
2017	Nagaura, Oishi, Shimada, and Kaneko	แนวโน้มเทคโนโลยีระบบขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในอนาคต
2018	Xu, Sun, Zhou, Jiang, Hu, and He	การออกแบบและศึกษาการทำงานของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
2020	Mohammadi Pirouz, and Hajizadeh	การควบคุมระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
2022	Gao, Ma, Qiu, Zhu, and Diao	กลยุทธ์การจัดการพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขณะขับเคลื่อนด้วยระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน
2023	Wang, Hu, Huang, Zhang, and Fang	การพัฒนาแบบจำลองสำหรับประเมินพฤติกรรมการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าในสถานการณ์ฉุกเฉินโดยคำนึงถึงคุณสมบัติของระบบกักเก็บพลังงาน
2024	Yang, Huang, and Wang	การปรับเส้นทางด้วยไดนามิกโปรแกรมมิ่งสำหรับขบวนรถไฟฟ้าขณะใช้งานระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน
2024	Wang, Huang, Hu, Qin, and Zhu	การสร้างแบบจำลองและประมาณสถานะการชาร์จของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน
2024	Zhu and Li	การพัฒนากลยุทธ์ควบคุมระบบขับเคลื่อนระบบรถไฟความเร็วสูง เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าขณะรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

จากตาราง 2.2 แสดงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตั้งแต่ปี 2012 จนถึงปัจจุบัน พบว่ามีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายรูปแบบ ซึ่งกล่าวถึงโครงสร้าง หลักการทำงาน และการประยุกต์ใช้ไว้อย่างละเอียด เพื่อให้เนื้อหาชัดเจนยิ่งขึ้นจึงมีการสรุปผลการศึกษาในรูปของทฤษฎี หลักการ วิธีการดำเนินงานวิจัย และผลลัพธ์อย่างย่อดังนี้

Yuana, Gua, Liua, Zhanga, and Lv (2012) นำเสนอการพัฒนาระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเขตเมืองที่ใช้เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุทั้งในแง่ของโครงสร้างและหลักการทำงานของระบบ รวมถึงการทดสอบประสิทธิภาพผ่านการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB โดยระบบนี้ถูกออกแบบขึ้นเพื่อรับมือกับปัญหาระบบจ่ายไฟหลักล้มเหลวพร้อมกับเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเสริมสร้างความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือให้กับการเดินรถในสถานการณ์ฉุกเฉินได้ ซึ่งเป็นการสร้างองค์ความรู้สำคัญที่ช่วยยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยและประสิทธิภาพการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสำหรับการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอนาคต

Wang, Ge, and Li (2014) นำเสนอการวิเคราะห์ ESTS ที่ใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานสำรอง โดยใช้อัลกอริทึมควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่พิจารณาข้อจำกัดทั้งด้านพลังงานไฟฟ้าและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ซึ่งแบ่งหน้าที่การทำงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะจำเพาะของการทำงานของ ESTS การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับควบคุมการทำงานของระบบรถไฟฟ้า และการจำลองผลการทำงานจากตัวอย่างขบวนรถไฟฟ้าแบบ 6 ตู้โดยสาร จากผลการทดสอบพบว่ากระบวนการที่นำเสนอสามารถควบคุมการทำงานของ ESTS ในกรณีฉุกเฉินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Nagaura, Oishi, Shimada, and Kaneko (2017) นำเสนอแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนความจุสูงสำหรับใช้งานในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยการใช้งานนี้ครอบคลุมมิติต่าง ๆ เช่น การเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ การจ่ายไฟสำรองสำหรับขบวนรถไฟฟ้าที่วิ่งบนเส้นทางไร้ไฟฟ้า เป็นต้น เทคโนโลยีนี้ได้รับการพิสูจน์ประสิทธิภาพด้วยการนำไปใช้งานจริงในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรุ่นต่าง ๆ ได้แก่ ขบวนรถไฟฟ้ารุ่น JR Kyushu Series BEC819 ขบวนรถไฟฟ้ารุ่น JR East Series HB-E210 และขบวนรถไฟฟ้ารุ่น JR East Series HB-E300 นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงอีกรูปแบบของการทำงานที่ทำหน้าที่เป็นระบบขับเคลื่อนฉุกเฉิน เพื่อใช้สำรองไฟในกรณีที่ระบบจ่ายไฟหลักเกิดความล้มเหลว

Xu, Sun, Zhou, Jiang, Hu, and He (2018) นำเสนอการออกแบบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินที่ใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานหลัก โดยระบบนี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในกรณีที่ระบบจ่ายไฟหลักไม่สามารถทำงานได้ งานวิจัยนี้ได้อธิบายขั้นตอนและรายละเอียดการออกแบบที่สำคัญ เช่น

ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน วงจรการควบคุมการแปลงและป้องกันความปลอดภัย ระบบลากจูง เป็นต้น ซึ่งได้มีการนำเสนอรูปของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเชี่ยงไฮ้ 952 ที่มีการติดตั้งระบบนี้บนขบวนรถ จากผลการจำลองพบว่าระบบขับเคลื่อนฉุกเฉินที่ใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนสามารถขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่หยุดทำงานจากเหตุการณ์ไฟดับไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบดังกล่าวแสดงศักยภาพในการอพยพผู้โดยสารอย่างปลอดภัยในสถานการณ์ฉุกเฉิน ซึ่งถือเป็นการปรับปรุงด้านความปลอดภัยที่มีความสำคัญและสามารถนำไปพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนประเภทอื่น ๆ ในอนาคตได้อย่างเหมาะสม

Mohammadi Pirouz, and Hajizadeh (2020) นำเสนอรูปแบบและวิธีการควบคุมระบบสำรองไฟ (Uninterruptible Power Supply: UPS) ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยการบูรณาการเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุ เพื่อยกระดับให้ระบบขับเคลื่อนสามารถตอบสนองต่อการทำงานในสภาวะต่าง ๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็น การจำกัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าตลอดระยะการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า การป้องกันปัญหาความผันผวนของพลังงานไฟฟ้าในระบบที่ทำงานในสภาวะที่แตกต่างกัน การจัดการพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ และการจ่ายไฟสำรองกรณีที่ระบบจ่ายไฟหลักเกิดปัญหา

Gao, Ma, Qiu, Zhu, and Diao (2022) ศึกษากลยุทธ์การจัดการพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขณะขับเคลื่อนด้วยระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน โดยมุ่งเน้นการกำหนดกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการจัดการพลังงานดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ประสิทธิผลและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการนำพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟมาใช้ประโยชน์ เพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดปัญหาพลังงานไฟฟ้าเกินพิกัดและส่งเสริมความปลอดภัยในการใช้งาน ซึ่งตอบสนองต่อความต้องการด้านพลังงานไฟฟ้าของระบบภายใต้บริบทของการจัดการพลังงานอย่างยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ

Wang, Hu, Huang, Zhang, and Fang (2023) นำเสนอการประมาณค่าพลังงานไฟฟ้าสำหรับการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยคำนึงถึงความสอดคล้องระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับขีดความสามารถที่อุปกรณ์กักเก็บพลังงานทำงานได้จริง นอกจากนี้ในการศึกษายังได้มีการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการค้นหาแบบทวิภาค (binary search) เพื่อประเมินสถานะพลังงานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนขณะทำงานอีกด้วย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถประเมินสถานะพลังงานได้แม่นยำกว่าวิธีการเดิมที่ใช้พารามิเตอร์คงที่ โดยเฉพาะในสภาวะที่อุปกรณ์กักเก็บพลังงานมีค่าสถานะการชาร์จ (State of Charge: SOC) อยู่ในระดับต่ำ การ

วิจัยนี้จึงถือเป็นแนวทางสำคัญต่อการพัฒนาระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพและมั่นคงสำหรับการรับมือกับสถานการณ์ฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

Yang, Huang, and Wang (2024) นำเสนอการพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยการเขียนโปรแกรมแบบไดนามิก (Dynamic Programming: DP) โดยอัลกอริทึมที่พัฒนานี้จะทำการกำหนดทิศทางเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดและปรับเส้นโค้งความเร็วให้เหมาะสมกับปริมาณพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดในระบบกักเก็บพลังงานขณะเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินขึ้น จากการทดลองพบว่าอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยให้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและราบรื่นมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีส่วนช่วยลดผลกระทบจากสถานการณ์ฉุกเฉินให้น้อยลงได้อย่างมาก

Wang, Huang, Hu, Qin, and Zhu (2024) นำเสนอการประมาณค่า SOC ของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานใน ESTS ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมในการควบคุมการทำงานของระบบที่สอดคล้องกับพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน โดยวิธีการประมาณค่า SOC ในงานวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมปัจจัยการลืมที่ดีที่สุด (Optimal Forgetting Factor: FRLS) ร่วมกับการกรองข้อมูลของคาลมันแบบปรับขยายได้โดยอิงตามปัจจัยการลืมตามอุณหภูมิ (TFFAEKF) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรไฟฟ้าระดับสองที่สร้างขึ้น ผลการทดลองยืนยันว่าวิธีที่เสนอสามารถประมาณค่า SOC ได้อย่างแม่นยำในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1% แม้ในอุณหภูมิต่ำถึง -20 °C ซึ่งสามารถนำวิธีการประมาณค่า SOC นี้ไปใช้พัฒนากลยุทธ์การขับเคลื่อนฉุกเฉินและการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นได้

Zhu and Li (2024) นำเสนอการพัฒนากลยุทธ์การควบคุมระบบขับเคลื่อนสำหรับรถไฟความเร็วสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบให้น้อยที่สุดในขณะที่ระบบจ่ายไฟหลักเกิดเหตุขัดข้องและจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินแทน โดยการควบคุมนี้อาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าระหว่างที่ระบบขับเคลื่อนทำงานในสภาวะต่าง ๆ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของระบบขับเคลื่อนต่อไป จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากลยุทธ์ดังกล่าวสามารถลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบเดิม ทำให้สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินอย่างมีประสิทธิภาพ

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน พบว่ามีข้อมูลสำคัญหลายประการที่สามารถนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลองในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยองค์ความรู้ดังกล่าวครอบคลุมทั้งเรื่องโครงสร้างพื้นฐาน กลไกการทำงาน และแนวทางการประยุกต์ใช้ระบบในบริบทที่หลากหลาย ข้อมูลเหล่านี้ไม่เพียงส่งเสริมความเข้าใจในหลักการออกแบบระบบที่เหมาะสมสำหรับนำไปจำลองผลเท่านั้น แต่ยังเป็นแนวทางอันมีนัยสำคัญในการวิเคราะห์ศักยภาพ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และความเป็นไปได้ในการนำระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินไปประยุกต์ใช้จริงในอนาคต จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องได้ชี้ให้เห็นความท้าทายในการปรับการทำงานของระบบให้สอดคล้องกับกรอบแนวคิดที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการบูรณาการและปรับปรุงองค์ความรู้จากงานวิจัยต่าง ๆ ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.3 กลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเป็นแนวคิดที่ได้รับการศึกษาและวิจัยมาอย่างยาวนานในแวดวงการจัดการพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานไฟฟ้า ลดการใช้พลังงานจากระบบจ่ายไฟหลัก และเพิ่มการใช้ประโยชน์จากระบบกักเก็บพลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยรูปแบบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้ามีอยู่ 2 ลักษณะ ได้แก่ การนำพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟของขบวนหนึ่งมาใช้ประโยชน์กับขบวนอื่นที่กำลังเร่งความเร็วในบริเวณใกล้เคียง และการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานไปยังโหลดต่าง ๆ จากการสำรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน สามารถสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยต่าง ๆ ในรูปแบบตารางที่มีการจัดเรียงลำดับงานวิจัยจากเก่าไปสู่งานวิจัยใหม่ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	ประเด็นงานวิจัยที่ดำเนิน
2017	Kume, Kawatsu, and Shimizu	การพัฒนาฟังก์ชันการเดินขบวนรถไฟฟ้าในภาวะฉุกเฉินด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งอยู่กับที่
2018	Yang, Yang, Xia, and Lin	การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่เกิดจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟตามสถานะการทำงานของขบวนรถไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (ต่อ)

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	ประเด็นงานวิจัยที่ดำเนิน
2018	Sumpavakup, Suwannakijborihan, Ratniyomchai, and Kulworawanichpong	กลยุทธ์การลดความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดด้วยระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
2019	Gao , Qin, Guo, Lin, and Yang	กลยุทธ์การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดในสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
2019	Meishner and Sauer	การศึกษากลไกการทำงานของระบบกู้คืนพลังงานข้างทางสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
2020	Hao, Zhang, Chen, Liu, Xu, and Wang	การติดตั้งวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางสำหรับควบคุมและจัดการการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
2020	Zhu, Yang, Lin, and Xin	การควบคุมแบบกระจายศูนย์สำหรับจัดการพลังงานไฟฟ้าในโครงข่ายระบบกักเก็บพลังงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยการเรียนรู้เสริมกำลังแบบตัวแทนหลายตัว
2021	Yooyong, Kulworawanichpong, and Ratniyomchai	การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจากขบวนรถไฟฟ้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟไปยังขบวนอื่นที่กำลังเร่งความเร็วในบริเวณใกล้เคียง
2022	Cabrane and Lee	การควบคุมและจัดการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ทำงานร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก
2024	Chen, Zhao, Wang, Wang, Huang, and Xu	การแบ่งปันและกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

จากตารางที่ 2.3 ซึ่งแสดงการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตั้งแต่ปี 2017 จนถึงปัจจุบัน พบว่ามีการนำเสนอแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมาประยุกต์ใช้ในหลายมิติ โดยเน้นไปที่หลักการทำงานพื้นฐานและแนวทางในการประยุกต์ใช้

งาน เพื่อให้เกิดความชัดเจนในเนื้อหาที่ผู้วิจัยได้ศึกษา จะมีการสรุปผลการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยกล่าวถึงทฤษฎี หลักการ วิธีการดำเนินงานวิจัย รวมถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยนั้น ๆ โดยย่อดังนี้

Kume, Kawatsu, and Shimizu (2017) นำเสนอการพัฒนาระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งอยู่กับที่ (Stationary Energy Storage System: SESS) ที่ใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟของขบวนรถไฟฟ้าและนำกลับมาจ่ายสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ ในระบบ โดยจุดเด่นของการศึกษานี้คือการพัฒนาโหมดการเดินรถฉุกเฉินที่ช่วยให้รถไฟฟ้าสามารถเดินทางไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดได้โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ SESS ในกรณีที่เกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง ผลการทดสอบที่สถานีคาไซของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายโทไซของโตเกียวเมโทร พบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในด้านการประหยัดพลังงานไฟฟ้าและการเดินรถฉุกเฉินด้วยการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจากระบบไปสู่ขบวนรถไฟฟ้า

Yang, Yang, Xia, and Lin (2018) นำเสนอวิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในระหว่างการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟของขบวนรถไฟฟ้า โดยคำนึงถึงสถานะการเดินรถหรือรูปแบบพฤติกรรมการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าจริง เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกลับมาใช้ใหม่ภายในขบวนรถไฟฟ้าหรือแบ่งปันให้กับขบวนรถไฟฟ้าอื่นภายในระบบ ทั้งนี้ ยังมีการป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่อาจส่งผลกระทบต่อแหล่งจ่ายไฟของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมดังกล่าวสามารถเพิ่มสัดส่วนการนำพลังงานไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่ ลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า และช่วยเพิ่มโอกาสในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Sumpavakup, Suwannakijborihan, Ratniyomchai, and Kulworawanichpong (2018) นำเสนอกลยุทธ์การบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินที่ได้จากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟของรถไฟฟ้าขบวนหนึ่งไปใช้ในรถไฟฟ้าขบวนอื่นที่อยู่ในช่วงเร่งความเร็วด้วยการประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งบนขบวนรถ (On-Board Energy Storage System: OBESS) เพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการสูงสุด (Peak Hours) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากลยุทธ์ดังกล่าวสามารถลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้ถึงร้อยละ 20-30 ซึ่งช่วยลดภาระของสถานีไฟฟ้าย่อยและเพิ่มเสถียรภาพของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน นอกจากนี้แบบจำลองและอัลกอริทึมควบคุมสำหรับตรวจวัดสถานะพลังงานไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ ทำให้สามารถจัดการการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Gao, Qin, Guo, Lin, and Yang (2019) นำเสนอกลยุทธ์การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าย่อยในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยวิธีการนี้ได้ทำการประเมินปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนต้องใช้ในการขับเคลื่อนจากแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า คำนวณพลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อยจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า และการพัฒนากลยุทธ์การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบกักเก็บพลังงานที่พิจารณาทั้งความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดและค่า SOC ของแบตเตอรี่ จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของกลยุทธ์ที่นำเสนอผ่านการจำลองบนกรณีศึกษาของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีอยู่จริง พบว่ากลยุทธ์การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าที่นำเสนอสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของสถานีไฟฟ้าย่อยได้อย่างมีประสิทธิภาพถึง 30.6% เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนอย่างมีนัยสำคัญ

Meishner and Sauer (2019) นำเสนอการศึกษากลไกการทำงานของระบบกู้คืนพลังงานข้างทาง (Wayside Energy Recovery Systems: WERS) ที่สามารถดึงพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟของรถไฟฟ้าขบวนหนึ่งมาเก็บไว้ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitors) ล้อตุนกำลัง (flywheel) เป็นต้น เพื่อนำไปจ่ายให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ ที่กำลังเร่งความเร็วหรือเริ่มออกตัว จากการศึกษาพบว่า WERS สามารถลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบได้ถึง 15-30% และช่วยลดปัญหาแรงดันไฟฟ้าสูงเกิน (overvoltage) อันเกิดจากการเบรกพร้อมกันของรถไฟฟ้าหลายขบวน นอกจากนี้ ยังมีการเปรียบเทียบเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานแบบต่าง ๆ ทั้งในแง่ของประสิทธิภาพ อายุการใช้งาน และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

Hao, Zhang, Chen, Liu, Xu, and Wang (2020) นำเสนอแผนการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟผ่านการติดตั้งวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางในสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละแห่งในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่ไหลย้อนกลับสู่สถานีไฟฟ้าย่อยและจัดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเหล่านั้นไปยังขบวนรถไฟฟ้าต่าง ๆ ตามความเหมาะสม จากการวิเคราะห์ผลการไหลของพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน พบว่าการติดตั้งวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยช่วยให้การควบคุมและจัดการการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบสามารถเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Zhu, Yang, Lin, and Xin (2020) นำเสนอแนวทางใหม่ในการจัดการการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้เสริมกำลังแบบหลายตัวแทน (Multiagent Deep Reinforcement Learning: MADRL) เพื่อควบคุมการจัดเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้ากลับเข้าสู่โครงข่ายระบบกักเก็บพลังงานอย่างเหมาะสม ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟหลัก และลดความสูญเสียภายในระบบ อีกทั้งยังช่วยเสริมสร้างความยืดหยุ่นต่อสถานการณ์การดำเนินงานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น จากผลการจำลองพบว่าเทคนิคการควบคุมดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนได้อย่างมีประสิทธิผลมากขึ้น

Yooyong, Kulworawanichpong, and Ratniyomchai (2021) นำเสนอแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟของขบวนรถไฟฟ้าหนึ่งไปยังขบวนรถอื่นที่กำลังเร่งความเร็ว เพื่อลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องจ่ายมาจากสถานีไฟฟ้าย่อยและเกิดการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จากผลการจำลองด้วยข้อมูลกรณีศึกษารถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย แสดงให้เห็นว่าแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าที่นำเสนอสามารถลดปริมาณพลังงานไฟฟ้ารวมที่จ่ายจากสถานีไฟฟ้าย่อยได้ถึง 12.5% ซึ่งเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการพัฒนาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

Cabrane and Lee (2022) นำเสนอการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยมุ่งเน้นการควบคุมและจัดการการไหลของกำลังไฟฟ้าทั้งในแง่การนำพลังงานไฟฟ้าจากระบบเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟและการแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าย่อยภายในโครงข่าย เพื่อลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟหลักและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในระบบ จากผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่หลากหลาย ซึ่งรวมถึงการควบคุมและการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก พบว่าระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กช่วยให้ระบบจ่ายไฟในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีเสถียรภาพและความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการพัฒนาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสมัยใหม่ที่ต้องการระบบจ่ายไฟที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากที่สุด

Chen, Zhao, Wang, Wang, Huang, and Xu (2024) นำเสนอกลยุทธ์การจัดการพลังงานไฟฟ้าแบบสองขั้นสำหรับจัดการพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟไปเก็บไว้ในระบบกักเก็บพลังงานในสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละตำแหน่งในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดย

แนวคิดนี้อาศัยการคำนวณความจุของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแต่ละตัวและแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไปยังแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยอย่างเหมาะสม เพื่อควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน รักษาแรงดันไฟฟ้าของสาย และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ ผลการทดลองพบว่ากลยุทธ์นี้สามารถจัดการการแบ่งปันและกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในสถานีย่อยแต่ละตำแหน่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจริงได้

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน พบว่าแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟและการใช้ประโยชน์จากระบบกักเก็บพลังงาน อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้แนวคิดนี้ยังถูกจำกัดเฉพาะการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งอยู่กับที่เท่านั้น ดังนั้น การศึกษาและพัฒนาแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งบนขบวนรถจึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงในการขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้ให้กว้างขวางยิ่งขึ้น การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมนี้ชี้ให้เห็นทั้งโอกาสและความท้าทายในการประยุกต์ใช้แนวคิดดังกล่าวกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสมัยใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการให้บริการ โดยองค์ความรู้และแนวทางที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้สอดคล้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2.3 สรุป

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยครอบคลุมทั้งหมด 3 ประเด็นหลัก ได้แก่ การจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการไหลกำลังไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน และกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จากผลการสืบค้นงานวิจัยในประเด็นเหล่านี้ทำให้ทราบข้อมูลและแนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการบูรณาการองค์ความรู้สู่การต่อยอดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยยืนยันถึงความเป็นนวัตกรรมและองค์ความรู้ใหม่ของประเด็นงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ได้ดำเนินการศึกษาวิจัย เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่ในอดีตมุ่งเน้นให้ความสำคัญกับการศึกษาวิจัยในทิศทางใดทิศทางหนึ่งแบบแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ระหว่างการพัฒนาระบบกักเก็บพลังงาน ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน หรือกลยุทธ์การประหยัดพลังงานไฟฟ้าด้วยการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า แม้จะมีงานวิจัยบางส่วนที่มีการศึกษาวิจัยในประเด็นที่มี

การบูรณาการองค์ความรู้บางส่วนอยู่บ้างก็ตาม ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงมีความโดดเด่นในด้านการบูรณาการองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่มีอยู่เพื่อพัฒนาต่อยอดเป็นองค์ความรู้ใหม่ อันจะนำไปสู่การยกระดับเสถียรภาพและความปลอดภัยในการให้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ตลอดจนส่งเสริมให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องตระหนักถึงความสำคัญของการวางรากฐานสำหรับการพัฒนาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีความยั่งยืน และสามารถตอบสนองต่อความท้าทายด้านความมั่นคงทางพลังงานที่เป็นประเด็นปัญหาสำคัญของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในปัจจุบัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการขยายความและอธิบายรายละเอียดในส่วนเนื้อหาที่ได้ทำการศึกษาจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เพื่อสร้างองค์ความรู้และความเข้าใจพื้นฐานที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทั้งหมด 8 หัวข้อ ได้แก่ ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบจ่ายไฟ พลวัตการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยวิธีการฉีดกระแส ปัญหาไฟดับและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน และผลกระทบแรงดันไฟฟ้าตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในโครงข่ายระบบจ่ายไฟ ซึ่งจะกล่าวโดยสรุปสำหรับส่วนเนื้อหาที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อความกระชับ ชัดเจน และเข้าใจง่ายของเนื้อหาทั้งหมดที่ได้หยิบยกมาในบทนี้

3.2 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบจ่ายไฟ

3.2.1 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Mass rapid transit system: MRTS) เป็นศัพท์ที่ใช้สำหรับเรียก รถไฟฟ้าในเมือง (Subway) รถไฟฟ้ารางหนัก (Heavy rail) เมโทร (metro) และรถไฟฟ้าใต้ดิน (Underground) มารวมเข้าด้วยกัน เนื่องจากรถไฟฟ้าเหล่านี้มีโครงสร้างและลักษณะการทำงานส่วนใหญ่ที่มีความคล้ายคลึงกัน (Wright and Fjellstrom, 2005) การทำงานพื้นฐานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมีรูปแบบที่เหมือนกับระบบรถไฟแบบดั้งเดิม แตกต่างกันเพียงระบบดั้งเดิมนั้นมีเครื่องยนต์ต้นกำลัง (prime mover) ติดตั้งอยู่บนขบวนรถในขณะที่ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าที่รับมาจากสถานีจ่ายไฟภายนอกเป็นส่วนขับเคลื่อน จึงเป็นเหตุที่ว่า

ทำไมระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนต้องมีสถานีจ่ายไฟย่อยที่ใช้สำหรับลดแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีค่าที่เหมาะสมก่อนที่ส่งไปขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าผ่านระบบป้อนไฟฟ้า (feeding system) อีกทีหนึ่ง (นคร จันทศร, 2555) อย่างไรก็ตามการใช้งานระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเทียบกับระบบรถไฟแบบดั่งเดิม เช่น การทำงานของรถไฟฟ้าแต่ละรูปแบบจะมีความตรงเวลาและสามารถทำเวลาได้ดีถึงแม้ในชั่วโมงที่เร่งด่วน มีความจุและความถี่ของการให้บริการที่เพียงพอต่อความต้องการของผู้โดยสาร มีความน่าเชื่อถือในการให้บริการที่สูง ไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและเสียง ส่งเสริมการอนุรักษ์สภาพแวดล้อมให้ดีขึ้น ลดอุบัติเหตุระหว่างการให้บริการด้วยเส้นทางวิ่งเฉพาะที่ไม่ต้องใช้ร่วมกับระบบขนส่งประเภทอื่น ๆ และระบบควบคุมการเดินรถด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถอำนวยความสะดวกและลดความเครียดของผู้โดยสารจากปัญหาการจราจร กระจายความเจริญไปยังเมืองต่าง ๆ ที่เส้นทางวิ่งของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนตัดผ่าน เป็นต้น (Brenna, Foiadelli, and Zaninelli, 2018) ทำให้ในปัจจุบันระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกลายเป็นระบบขนส่งสาธารณะหลักที่มีสถิติการใช้บริการสูงสุดสำหรับรับส่งผู้โดยสารในเขตเมืองต่าง ๆ ทั่วโลก (Bao, 2018) แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ให้บริการรับส่งผู้โดยสารทั่วโลก

โดยทั่วไประบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแต่ละระบบมักมีโครงสร้างพื้นฐานที่คล้ายคลึงกัน ประกอบด้วย ขบวนรถไฟฟ้า ทางวิ่งรถไฟฟ้า สถานีผู้โดยสาร สถานีจ่ายไฟย่อย โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถ และศูนย์ควบคุมการเดินรถ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1.1 ขบวนรถไฟฟ้า (Train)

ขบวนรถไฟฟ้าสามารถจำแนกออกตามรูปแบบระบบลากจูงที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า ได้แก่ ระบบลากจูงแบบรวมศูนย์ (Centralized traction system) เป็นรูปแบบที่ใช้หัวรถจักรไฟฟ้า (Electric locomotive) อย่างน้อยหนึ่งชุดสำหรับส่งกำลังขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า ในขณะที่ตู้โดยสารอื่น ๆ จะไม่มีการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อน โดยการติดตั้งหัวรถจักรไฟฟ้าสามารถอยู่ที่ตำแหน่งด้านหน้าสุดหรือด้านหลังสุดของขบวนรถไฟฟ้าก็ได้ และระบบลากจูงแบบแยกส่วน (decentralized traction system) เป็นรูปแบบที่มีการติดตั้งห้องควบคุมหรือห้องคนขับไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของขบวนรถไฟฟ้า สำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนจะถูกติดตั้งในลักษณะแบบที่กระจายทั่วไปขบวนรถไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ไม่รวมกันอยู่ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งเหมือนรูปแบบแรก เรียกระบบนี้ว่า รถไฟฟ้าชุด (Electric Multiple Unit: EMU) แสดงดังรูปที่ 3.2–3.3 ซึ่งทั่วไปตู้โดยสารของขบวนรถไฟฟ้าจะมีลักษณะต่อพ่วงกันประมาณ 3-10 ตู้ต่อขบวน และมักใช้ล้อเหล็กแบบครีบสำหรับประครองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าให้อยู่บนเส้นทางวิ่ง (Garre and Gabaldon, 2019)



(ก) ระบบลากจูงแบบรวมศูนย์ (ข) ระบบลากจูงแบบแยกส่วน

รูปที่ 3.2 ขบวนรถไฟฟ้า

(ที่มาภาพ: https://www.pinterest.com/pin/764626842996904360/ [เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2568])



(ก) ระบบลากจูงแบบรวมศูนย์ (ข) ระบบลากจูงแบบแยกส่วน

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างขบวนรถไฟฟ้า

(ที่มาภาพ: https://en.wikipedia.org/wiki/ChS8 และ https://www.railjournal.com/rolling-stock/british-battery-electric-multiple-unit-on-test/ [เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2568])

3.2.1.2 ทางวิ่งรถไฟฟ้า (Track)

ทางวิ่งถูกออกแบบขึ้นมาสำหรับรองรับน้ำหนักของขบวนรถไฟฟ้าที่วิ่งบนรางก่อนถ่ายเทลงสู่พื้นดินและกำหนดแนวทางวิ่งของขบวนรถไฟให้วิ่งไปตามทิศทางที่ต้องการ ซึ่งสามารถจำแนกได้ตามโครงสร้างที่มีการใช้งานทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ ทางวิ่งรถไฟฟ้าแบบใช้หินโรยทาง (Ballast track) ประกอบด้วย ราง (rail) หมอน (Sleeper) เครื่องยึดเหนี่ยวราง (Fastening) หินโรยทาง (Ballast) และคันทาง (Formation) และทางวิ่งรถไฟฟ้าแบบไม่ใช้หินโรยทาง (Ballastless track or Slab track) ประกอบด้วย ราง (rail) หมอนหรือแท่นคอนกรีต (Sleeper or Slab) เครื่องยึดเหนี่ยวราง (Fastening) และแผ่นพื้นคอนกรีต (Concrete slab) แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยขนาดความกว้างของรางในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ใช้กันทั่วโลกมีอยู่ 2 ขนาด ได้แก่ รางมิเตอร์เกจ (Meter gauge) ที่มีความกว้าง 1.000 เมตร และรางมาตรฐานเกจ (Standard gauge) ที่มีความกว้าง 1.435 เมตร การสร้างรางวิ่งรถไฟฟ้ามักอยู่ในตำแหน่งที่แยกออกจากการจราจรประเภท



(ก) แบบใช้หินโรยทาง



(ข) แบบไม่ใช้หินโรยทาง

รูปที่ 3.4 ทางวิ่งรถไฟฟ้า

(ที่มาภาพ: https://www.sathyamonline.com/l-news/railway-track-8578084 และ https://www.vossloh.com/en-us/vossloh-north-america [เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2568])



(ก) ทางวิ่งใต้ดิน



(ข) ทางวิ่งบนพื้นดิน



(ค) ทางวิ่งยกระดับ

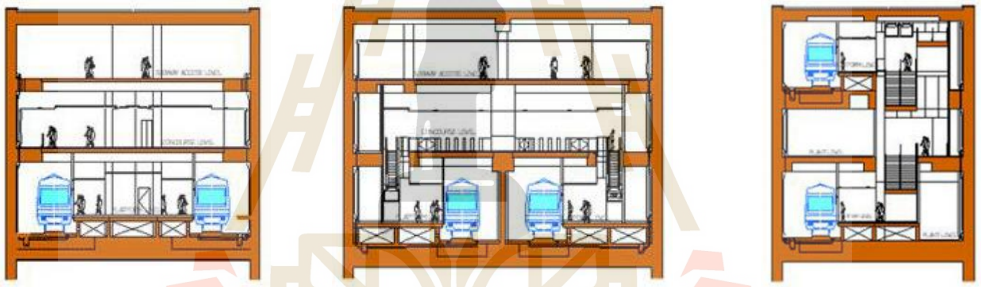
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการสร้างรางวิ่งรถไฟฟ้า

(ที่มาภาพ: https://metro.bemplc.co.th/MRT-System-Line?pid=3# https://th.pngtree.com/freebackground/japanese-train-tracks-running-down-the-street_2464239.html และ https://mgronline.com/onlinesection/detail/9610000110403 [เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2568])

อื่น ๆ อย่างชัดเจน ไม่ว่าจะเป็น ทางวิ่งใต้ดิน ทางวิ่งบนพื้นดิน และทางวิ่งยกระดับ แสดงดังรูปที่ 3.5 (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2561)

3.2.1.3 สถานีผู้โดยสาร (Station)

สถานีผู้โดยสารเป็นอาคารที่ให้บริการด้านการขนส่งสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ซึ่งมีชานชาลาเป็นจุดจอด แวะพัก และเปลี่ยนขบวนระหว่างการเดินทางของรถไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีบริการเสริม ได้แก่ การขายตั๋ว ศูนย์ประชาสัมพันธ์ ห้องรอฝากสัมภาระ และร้านค้า ดังนั้นการกำหนดรูปแบบโครงสร้างของสถานีรถไฟฟ้าจะต้องคำนึงเรื่องการวางลักษณะชานชาลา เพื่อให้เกิดความสะดวกและการใช้พื้นที่เหมาะสมมากที่สุด ซึ่งสามารถวางรูปแบบของชานชาลาได้ 3 รูปแบบ คือ แบบชานชาลาด้านข้าง (Side Platform) ชานชาลาตรงกลาง (Central Platform) และชานชาลาซ้อนกัน (Stack Platform) แสดงดังรูปที่ 3.6 (Puttipakorn and Upala, 2018)



(ก) ด้านข้าง (ข) ตรงกลาง (ค) ซ้อนกัน

รูปที่ 3.6 รูปแบบการวางชานชาลาของสถานีผู้โดยสาร
(ที่มาภาพ: Puttipakorn and Upala, 2018])



รูปที่ 3.7 สถานีจ่ายไฟย่อย
(ที่มาภาพ: https://en.wikipedia.org/wiki/Traction_substation [เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2568])

3.2.1.4 สถานีจ่ายไฟย่อย (Substation)

สถานีจ่ายไฟย่อยเป็นแหล่งกระจายพลังงานไฟฟ้าที่รับมาจากสถานีจ่ายไฟภายนอกโดยการปรับลดแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีค่าที่เหมาะสมก่อนที่จะส่งไปขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าและโหลดต่าง ๆ ผ่านระบบป้อนไฟฟ้า (feeding system) ที่มีลักษณะเป็นรางสามหรือหน้าสัมผัสเหนือศีรษะ แสดงดังรูปที่ 3.7 (Kulworawanichpong, 2015)

3.2.1.5 โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถ (Depot and Workshop)

โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถเป็นอาคารสำหรับจอดและซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าแต่ละขบวนให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.8 เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับให้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและเกิดความปลอดภัยสูงสุดในแต่ละวัน โดยมีมาตรฐาน EN50126/IEC62278 ที่ถูกนำมาใช้ควบคุมคุณภาพการซ่อมบำรุง เรียกว่า ความน่าเชื่อถือความพร้อมใช้ ความสามารถในการซ่อมบำรุง และความปลอดภัยของระบบ (Reliability Availability Maintainability and Safety: RAMS) การซ่อมบำรุงนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ (1) การตรวจสอบประจำวัน (2) การตรวจสอบด้วยเครื่องมือพิเศษและการเปลี่ยนอุปกรณ์ (3) การซ่อมบำรุงตามวาระ และ (4) การซ่อมบำรุงใหญ่ นอกจากนี้ในส่วนของโรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถยังมีการทำงานที่ครอบคลุมไปถึงการซ่อมบำรุงทางวิ่งรถไฟฟ้าอีกด้วย (National Academy of Sciences, Engineering, and Medicine, 2012)



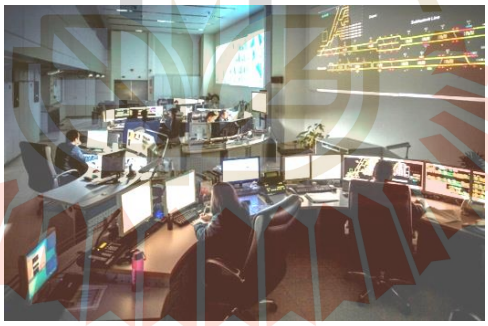
รูปที่ 3.8 โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถ

(ที่มาภาพ: https://railsystem.net/train-depot-area/ [เข้าถึงเมื่อ 17 พฤษภาคม 2568])

3.2.1.6 ศูนย์ควบคุมการเดินรถ (Operation Control Center)

ศูนย์ควบคุมการเดินรถมีสถานที่ตั้งอยู่ตำแหน่งเดียวกับโรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถ ทำหน้าที่หลักในการควบคุมการเดินรถให้ตรงตามตารางเวลาและดูแลความปลอดภัย

ระหว่างการเดินรถให้มีประสิทธิภาพสูงสุด แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งในปัจจุบันรถไฟฟ้าหลายสายได้มีการควบคุมการทำงานภายใต้ระบบควบคุมรถอัตโนมัติ (Automatic Train Control: ATC) ที่ทางบริษัทเจ้าของเทคโนโลยีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนพัฒนาขึ้นมา โดยทั่วไประบบ ATC มีองค์ประกอบย่อยทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ (1) ระบบควบคุมการเดินรถอัตโนมัติ (Automatic Train Operation: ATO) ทำหน้าที่ควบคุมและดูแลในส่วนการทำงานต่าง ๆ ของขบวนรถไฟฟ้า เช่น การขับเคลื่อนรถไฟฟ้า การควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้า การเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร ตรวจสอบสถานะการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งบนรถไฟฟ้า เป็นต้น (2) ระบบป้องกันอัตโนมัติ (Automatic Train Protection: ATP) ทำหน้าที่ป้องกันด้านความปลอดภัยต่าง ๆ และ (3) ระบบกำกับการเดินรถอัตโนมัติ (Automatic Train Supervision: ATS) ทำหน้าที่คอยควบคุมการวิ่งของรถไฟฟ้าให้สอดคล้องกับตารางการเดินรถที่ถูกกำหนดเอาไว้ด้วยการส่งข้อมูลต่าง ๆ ไปยังศูนย์ควบคุมการเดินรถ เช่น ความเร็วของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน ติดตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า มาตราการควบคุมการเดินรถในขณะที่ระบบการเดินรถหลักมีเหตุขัดข้องเกิดขึ้น เป็นต้น อย่างไรก็ตามรายละเอียดปลีกย่อยในการทำงานจะมีความแตกต่างกันตามการออกแบบในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแต่ละระบบ (นคร จันทศร, 2555)

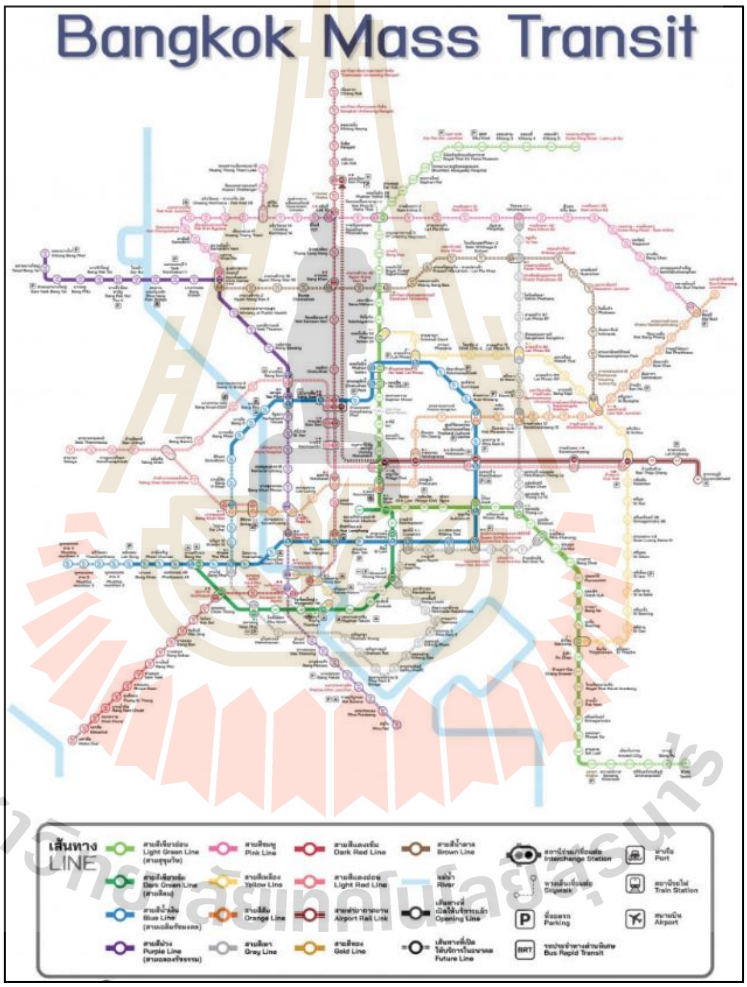


รูปที่ 3.9 ศูนย์ควบคุมการเดินรถ

(ที่มาภาพ: https://www.bts.co.th/library/system-security.html [เข้าถึงเมื่อ 17 พฤษภาคม 2568])

ด้วยโครงสร้างพื้นฐานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนดังที่แสดงข้างต้น ทำให้มีการกำหนดรูปแบบการวิ่งของรถไฟฟ้าให้มีความเร็วเฉลี่ยต่อการเดินทางประมาณ 32–80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและสามารถทำความเร็วสูงสุดได้อยู่ที่ 72–130 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีผู้โดยสารแต่ละสถานีอยู่ห่างกันประมาณ 1–3 กิโลเมตร แต่สำหรับระบบที่ทันสมัยมากขึ้นสามารถพิจารณาการวางตำแหน่งของสถานีผู้โดยสารตามความเหมาะสมต่าง ๆ เช่น สถานีผู้โดยสารต้องอยู่

บริเวณใจกลางเมืองใหญ่ที่มีความเจริญ ความสะดวกสบายของผู้ที่ต้องการใช้บริการระบบ เป็นต้น (ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2560) จึงทำให้ตลอดหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพิสูจน์ให้เห็นในหลายประเทศ ไม่ว่าจะเป็น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ ญี่ปุ่น จีน และอื่น ๆ แล้วว่าระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสามารถดึงดูดผู้ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลจำนวนมากให้หันมาใช้บริการระบบขนส่งสาธารณะได้มากขึ้น เนื่องจากระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสามารถทำความเร็วได้สูงในชั่วโมงที่เร่งด่วนและมีความถี่ในการให้บริการที่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ (Bao, 2018)



รูปที่ 3.10 เส้นทางระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

(ที่มาภาพ: https://www.thailandplus.tv/archives/468882 [เข้าถึงเมื่อ 17 พฤษภาคม 2568])

ในประเทศไทยเองได้มีการนำระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเข้ามาให้บริการในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2542 และมีการขยายเส้นทางการให้บริการ

ภายใต้ "โครงการแผนแม่บท การขนส่งมวลชนระบบรางในเขตกรุงเทพมหานครและพื้นที่ต่อเนื่อง" ทำให้ในปัจจุบันมีเส้นทางการให้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรวมทั้งสิ้น 12 เส้นทาง แสดงดังรูปที่ 3.10 (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2553) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่มีส่วนช่วยในการยกระดับการทำงานของระบบนี้จากองค์กรต่าง ๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนอย่างจริงจัง

3.2.2 ระบบจ่ายไฟสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การจ่ายไฟสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Mass rapid transit system electrification) ถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบจ่ายไฟกระแสสลับ (AC electrification system) และระบบจ่ายไฟกระแสตรง (DC electrification system) แต่ละรูปแบบมีความสามารถในการผลิตและจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป (White, 2011; Siemens, 2020) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการทำงาน ข้อกำหนดด้านความเร็ว และระยะเส้นทางวิ่งของรถไฟฟ้า โดยจะสามารถสรุปลักษณะการทำงานของระบบจ่ายไฟแต่ละแบบได้ดังต่อไปนี้

3.2.2.1 ระบบจ่ายไฟกระแสตรง

ระบบจ่ายไฟกระแสตรงเป็นเครือข่ายสถานีจ่ายไฟย่อยที่รับพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายนอก ก่อนที่จะทำการปรับลดค่าแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าที่เหมาะสมและแปลงให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงด้วยหม้อแปลงแบบเรียงกระแส (Rectifier transformer) แล้วส่งไปขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าและโหลดต่าง ๆ ภายในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนผ่านระบบป้อนไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นรางที่สาม (Third rail) ในกรณีที่ระบบใช้แรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 750 โวลต์ หรือสายจ่ายเหนือศีรษะ (Overhead line) ในกรณีที่ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 750 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 3.11 ระบบจ่ายไฟประเภทนี้ทำงานในย่านแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าไม่สูงมากนัก จึงต้องมีการติดตั้งจุดกระจายไฟฟ้าหรือสถานีจ่ายไฟย่อยไว้ที่ระยะทางทุก 2.5-5 กิโลเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่เดินที่ให้บริการอยู่ในระบบ สำหรับการป้อนพลังงานไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟกระแสตรงเข้าสู่ขบวนรถไฟฟ้าต้องอาศัยอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้า (Collector shoes) ที่ยื่นสัมผัสกับรางที่สาม เพื่อให้พลังงานไฟฟ้าจากรางที่สามไหลไปจ่ายให้กับโหลดต่าง ๆ บนขบวนรถไฟฟ้าและกลับมาครบวงจรที่รางวิ่ง แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าที่มีการใช้งานในปัจจุบันมีทั้งแบบที่รับพลังงานไฟฟ้าจากด้านบน (top contact) แบบที่รับพลังงานไฟฟ้าจากด้านข้าง (side contact) และแบบที่รับพลังงานไฟฟ้าจากด้านล่าง (bottom contact) แสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งแต่ละแบบมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม แนวทางการนำมา

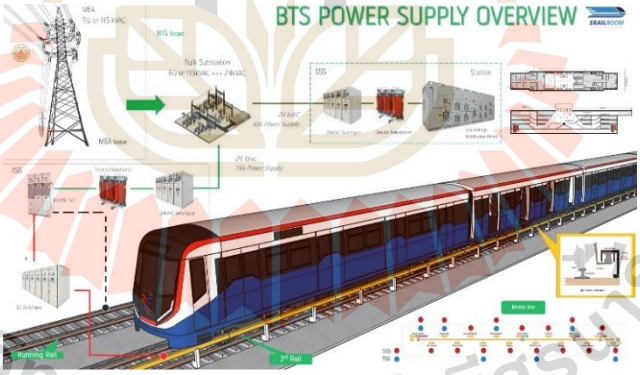
ประยุกต์ใช้ และข้อกำหนดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมใช้งานมากที่สุดในปัจจุบัน คือ แบบที่รับพลังงานไฟฟ้าจากด้านล่าง เนื่องจากมีโอกาสที่สิ่งแปลกปลอมจะเข้าไปแทรกระหว่างรางที่สามกับอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าจนเป็นเหตุทำให้เกิดความขัดข้องมีน้อยกว่าแบบอื่น ๆ (นคร จันทศร, 2555)



(ก) รางที่สาม (ข) สายจ่ายเหนือศีรษะ

รูปที่ 3.11 ระบบป้อนไฟฟ้าแบบ Third rail และ Overhead line

(ที่มาภาพ: https://asia.chemtronics.com/maintenance-of-electrical-and-electronic-systems-in-trains และ https://indiarailinfo.com/faq/post/1849 [เข้าถึงเมื่อ 18 พฤษภาคม 2568])

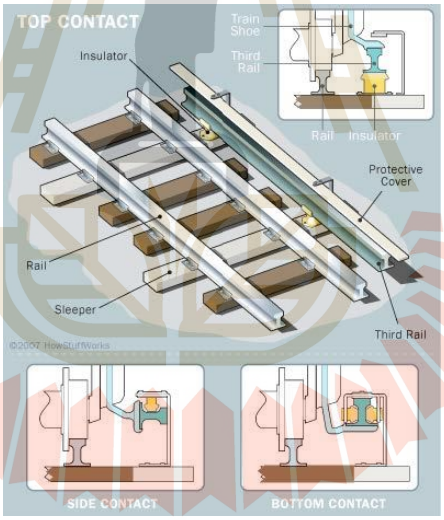


รูปที่ 3.12 ระบบจ่ายไฟกระแสตรง

(ที่มาภาพ: https://www.facebook.com/ERailsRoom/ [เข้าถึงเมื่อ 18 พฤษภาคม 2568])

การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยรางที่สามจะถูกนำมาใช้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนความเร็วต่ำที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าในการทำงานอยู่ในช่วง 600 และ 750 โวลต์ เท่านั้น แต่สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนความเร็วสูงที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานเพิ่มขึ้นมาเป็น 1,500 หรือ 3,000 โวลต์ รูปแบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะถูกดำเนินการผ่านสายจ่ายเหนือ

ศีรษะแทน เนื่องจากการใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้นอาจมีความเสี่ยงที่จะเกิดการโดดข้ามของกระแสไฟฟ้าจากรางที่สามไปยังรางวิ่ง ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าระหว่างตัวนำกับรางวิ่งมีระยะห่างที่มากพอที่จะป้องกันการกระโดดข้ามของกระแสไฟฟ้าและลดปัญหาเรื่องการหาฉนวนไฟฟ้าอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านรางที่สามยังถือว่าเป็นรูปแบบที่มีการใช้งานมากที่สุดในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบกระแสตรงในปัจจุบัน โดยรางที่สามที่ถูกนำมาใช้นี้จะต้องมีความมั่นคงปลอดภัย การใช้งานรางที่สามในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทั่วไปจึงมักติดตั้งรางที่สามตามเส้นทางวิ่งของรถไฟฟ้าโดยมีอุปกรณ์จับยึดรางในระยะทุก ๆ 5 เมตร แต่เนื่องจากการติดตั้งนี้จะมีลักษณะอยู่ในพื้นที่โล่งแจ้งและไม่มีฉนวนหุ้มรางที่สาม ซึ่งอาจเสี่ยงต่อการที่คน สัตว์ และสิ่งของจะเข้ามาในบริเวณรางที่สามอยู่ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดการนำรางที่สามมาใช้งานจึงต้องเป็นทางวิ่งใต้ดินและทางวิ่งยกระดับเท่านั้น และควรที่จะหาอุปกรณ์หรือหาที่กำบังรางที่สามให้มิดชิดที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (ชัยยุทธ์ สัมภวะคุปต์, 2560)



รูปที่ 3.13 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้า

(ที่มาภาพ: https://ashkanhh.mit.edu/research-projects/current-collecting-shoegear-system-and-third-rail-interactions [เข้าถึงเมื่อ 18 พฤษภาคม 2568])

จากข้อมูลข้างต้น การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยรางที่สามจะถูกนำมาใช้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนความเร็วต่ำที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าในการทำงานอยู่ในช่วง 600 และ 750 โวลต์ เท่านั้น แต่สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนความเร็วสูงที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานเพิ่มขึ้นมาเป็น 1,500 หรือ 3,000 โวลต์ รูปแบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะถูกดำเนินการผ่าน

สายจ่ายเหนือศีรษะแทน เนื่องจากการใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้นอาจมีความเสี่ยงที่จะเกิดการโดดข้ามของกระแสไฟฟ้าจากรางที่สามไปยังรางวิ่ง ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าระหว่างตัวนำกับรางวิ่งมีระยะห่างที่มากพอที่จะป้องกันการกระโดดข้ามของกระแสไฟฟ้าและลดปัญหาเรื่องการหาฉนวนไฟฟ้าอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านรางที่สามยังถือว่าเป็นรูปแบบที่มีการใช้งานมากที่สุดในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบกระแสตรงในปัจจุบัน โดยรางที่สามที่ถูกนำมาใช้นี้จะต้องมีความมั่นคงปลอดภัย การใช้งานรางที่สามในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทั่วไปจึงมักติดตั้งรางที่สามตามเส้นทางวิ่งของรถไฟฟ้าโดยมีอุปกรณ์จับยึดรางในระยะทุก ๆ 5 เมตร แต่เนื่องจากการติดตั้งนี้จะมีลักษณะอยู่ในพื้นที่โล่งแจ้งและไม่มีฉนวนหุ้มรางที่สาม ซึ่งอาจเสี่ยงต่อการที่คน สัตว์ และสิ่งของจะเข้ามาในบริเวณรางที่สามอยู่ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดการนำรางที่สามมาใช้งานจึงต้องเป็นทางวิ่งใต้ดินและทางวิ่งยกระดับเท่านั้น และควรที่จะหาอุปกรณ์หรือหาที่กำบังรางที่สามให้มิดชิดที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (ชัยยุทธ์ สัมภวะคุปต์, 2560)

ตารางที่ 3.1 แรงดันมาตรฐานสำหรับระบบจ่ายไฟของรถไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163:200

Electrification system	Lowest permanent voltage U_{min1} (V)	Lowest non-permanent voltage U_{min2} (V)	Nominal voltage U_n (V)	Highest permanent voltage U_{max1} (V)	Highest non-permanent voltage U_{max2} (V)
D.C. (mean values)	400	400	600[a]	720	800
	500[c]	500	750	900[c]	1,000
	1,000	1,000	1,500	1,800[c]	1,950
	2,000	2,000	3,000	3,600	3,900[b]
A.C. (r.m.s. values)	11,000	12,000	15,000	17,250	18,000
	17,500[c]	19,000[c]	25,000	27,500[c]	29,000
Special national conditions for France, see Annex B.					
a. Future D.C. traction system for tramways and local railways should conform with a system nominal voltage of 750V.					
b. Special national conditions for Belgium, see Annex B.					
c. Special national conditions for United Kingdom, see Annex B.					

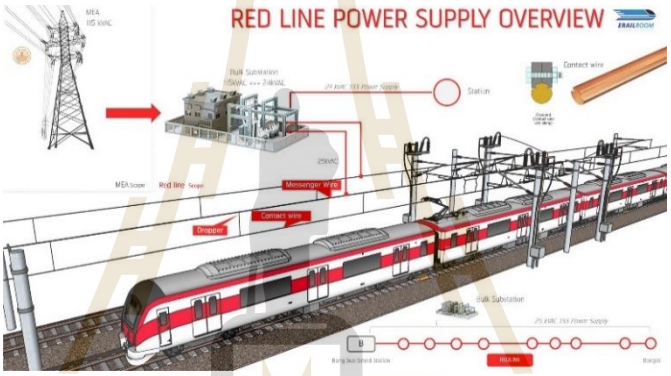
ปัจจุบันแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่ถูกนำมาใช้งานกับระบบจ่ายไฟกระแสตรงในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีทั้งหมด 4 ระดับตามมาตรฐาน EN50163/IEC60850 ได้แก่ 600 750 1,500 และ 3,000 โวลต์ แสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งจากตารางดังกล่าวมีการกำหนดว่าระดับแรงดันไฟฟ้าทำงานปกติแต่ละระดับของระบบการจ่ายไฟกระแสตรงต้องมีค่าอยู่ในช่วง U_{min1} ถึง U_{min2} และมีข้อกำหนดเพิ่มเติมอื่น ๆ ได้แก่ กรณีที่ระดับแรงดันไฟฟ้าทำงานมีค่าอยู่ระหว่าง U_{max1} ถึง U_{max2} จะสามารถคงค่าแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวไว้ได้ไม่เกิน 5 นาที กรณีที่ระดับแรงดันไฟฟ้าทำงานมีค่าอยู่ระหว่าง U_{min1} ถึง U_{min2} จะสามารถคงค่านั้นไว้ได้ไม่เกิน 2 นาที กรณีที่สถานีจ่ายไฟกระแสตรงทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าขณะไร้โหลดของหม้อแปลงแบบเรียงกระแสที่มีค่าไม่ควรเกิน U_{max2} และกรณีที่ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีการทำงานแบบเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรก แรงดันไฟฟ้าทำงานในขณะนั้นอาจจะมีค่าเกิน U_{max2} ได้ชั่วขณะ (British Standards Institution, 2004)

3.2.2.2 ระบบจ่ายไฟกระแสสลับ

ระบบจ่ายไฟกระแสสลับเป็นระบบจ่ายไฟสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบการจ่ายไฟกระแสตรง ซึ่งก็หมายความว่าเครือข่ายสถานีจ่ายไฟย่อยจะต้องรับพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายนอก แล้วทำการปรับลดค่าแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าที่เหมาะสมและส่งไปขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าหรือโหลดอื่น ๆ ภายในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนผ่านระบบป้อนไฟฟ้าที่มีลักษณะสายจ่ายเหนือศีรษะ โดยปัจจุบันระดับแรงดันไฟฟ้าที่นิยมใช้ในระบบจ่ายไฟกระแสสลับมีขนาด 15 กิโลโวลต์ ที่ 16.7 เฮิรตซ์ และ 25 กิโลโวลต์ ที่ 50/60 เฮิรตซ์ แสดงดังรูปที่ 3.14 อุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้ในระบบจ่ายไฟประเภทนี้ เรียกว่า แพนโทกราฟ (pantograph) แสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งปกติแล้วแพนโทกราฟจะถูกนำมาติดตั้งไว้บนหลังคาของรถไฟฟ้าและจะยกขึ้นไปสัมผัสกับสายแคทีนารี (catenary) เพื่อรับพลังงานไฟฟ้ามาใช้บนรถไฟฟ้าและไหลกลับครบวงจรผ่านรางวิ่งของระบบ

เนื่องจากระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบกระแสสลับมีแรงดันไฟฟ้าทำงานที่มีค่าสูง ส่งผลให้พิสัยการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบมีความไกลมากเช่นกัน ดังนั้นการสร้างสถานีจ่ายไฟย่อยแต่ละจุดจึงถูกสร้างขึ้นให้ห่างกันได้ถึง 20-60 กิโลเมตร ขึ้นอยู่กับระบบจ่ายไฟที่เลือกใช้และความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการบนทางวิ่งรถไฟฟ้า จึงทำให้ต้นทุนการติดตั้งระบบป้อนไฟฟ้าต่ำกว่าแบบใช้ระบบจ่ายไฟกระแสตรงด้วยเหตุผลที่ว่าสถานีจ่ายไฟย่อยในระบบน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงหรือกระแสสลับมักขึ้นอยู่กับการ

วิเคราะห์ภาพรวมความคุ้มทุนในการใช้งานระบบจ่ายไฟแต่ละประเภท เช่น รถไฟฟ้าบีทีเอสควรเลือกใช้ระบบจ่ายไฟกระแสตรง เนื่องจากระบบนี้ถูกออกแบบให้สามารถรองรับการเดินรถพร้อมกันได้ถึง 40 ขบวนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง หรือระยะห่างระหว่างขบวนรถ (headway) 90 วินาที หากเลือกใช้ระบบจ่ายไฟกระแสตรงจะช่วยให้มีการลดต้นทุนต่าง ๆ ได้ ในขณะรถไฟฟ้าความเร็วสูงควรเลือกใช้ระบบจ่ายไฟกระแสสลับ เนื่องจากระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีลักษณะการให้บริการแบบวิ่งทางไกล จึงทำให้มีขบวนรถไฟฟ้าที่วิ่งบนเส้นทางเดียวกันมีความหนาแน่นต่ำ ระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้าอยู่ที่ 5-10 นาที และมีจำนวนสถานีจ่ายไฟย่อยที่ต้องใช้น้อยกว่าเช่นกัน เป็นต้น (ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2560)



รูปที่ 3.14 ระบบจ่ายไฟกระแสสลับ

(ที่มาภาพ: https://www.facebook.com/ERailsRoom/ [เข้าถึงเมื่อ 19 พฤษภาคม 2568])



รูปที่ 3.15 แพนโทกราฟ

(ที่มาภาพ: https://www.flickr.com/photos/aucklandtransport/12940899704/in/photostream/ [เข้าถึงเมื่อ 19 พฤษภาคม 2568])

3.2.3 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย

การขนส่งมวลชนระบบรางในประเทศไทยสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ ระบบรถไฟทางไกล และระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยระบบรถไฟทางไกลเป็นระบบที่อยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของการรถไฟแห่งประเทศไทย ซึ่งปัจจุบันมีระยะทางที่เปิดให้บริการทั่วประเทศรวมทั้งสิ้น 4,346 km ใช้รางวิ่งที่มีความกว้างขนาด 1 เมตร และมีรูปแบบการใช้รถจักรสำหรับขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าอยู่ทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ (1) รถจักรดีเซลไฟฟ้า (diesel electric locomotives) เป็นรถจักรที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าของขบวนรถไฟ (2) รถจักรดีเซลไฮดรอลิค (diesel hydraulic locomotives) เป็นรถจักรที่ใช้ระบบไฮดรอลิคในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟ และ (3) รถดีเซลราง (diesel multiple units) เป็นระบบที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลขับเคลื่อนขบวนรถไฟด้วยตนเอง ส่วนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นระบบที่อยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของ 3 หน่วยงาน ได้แก่ การรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) และสำนักการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร (สจส.) แต่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีเพียง 2 หน่วยงาน คือ การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย และกรุงเทพมหานคร โดยระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ใช้งานในปัจจุบันมีอยู่หลายสาย (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, 2560) ดังต่อไปนี้

3.2.3.1 การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (Mass Rapid Transit Authority of Thailand: MRTA) เรียกโดยย่อว่า "รฟม." เป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจที่สังกัดกระทรวงคมนาคมทำหน้าที่จัดให้มีการบริการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล และจังหวัดอื่น ๆ โดยการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยได้เปิดให้บริการขนส่งด้วยรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของประเทศไทยที่ใช้ชื่อว่า "รถไฟฟ้ามหานคร (Metropolitan Rapid Transit: MRT)" ซึ่งแบ่งได้เป็นหลายสาย ได้แก่

1) รถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล หรือ สายสีน้ำเงิน เป็นโครงการระบบแบบขนส่งมวลชนเร็ว รุ่น ซีเมนส์ โมดูลาร์ เมโทร (Siemens Modular Metro) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีท่าพระ-พุทธมณฑล สาย 4 มีสถานีผู้โดยสาร 38 สถานี ระยะทางทั้งหมด 47 กิโลเมตร รถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับและทางวิ่งใต้ดินที่ติดตั้งรางมาตรฐานขนาดกว้าง 1.435 เมตร โดยขบวนรถไฟฟ้าที่ใช้มีขนาดใหญ่ทั้งหมด 19 ขบวน ขบวนละ 3 ตู้โดยสาร และสามารถจุผู้โดยสารได้ถึง 320 คนต่อขบวน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

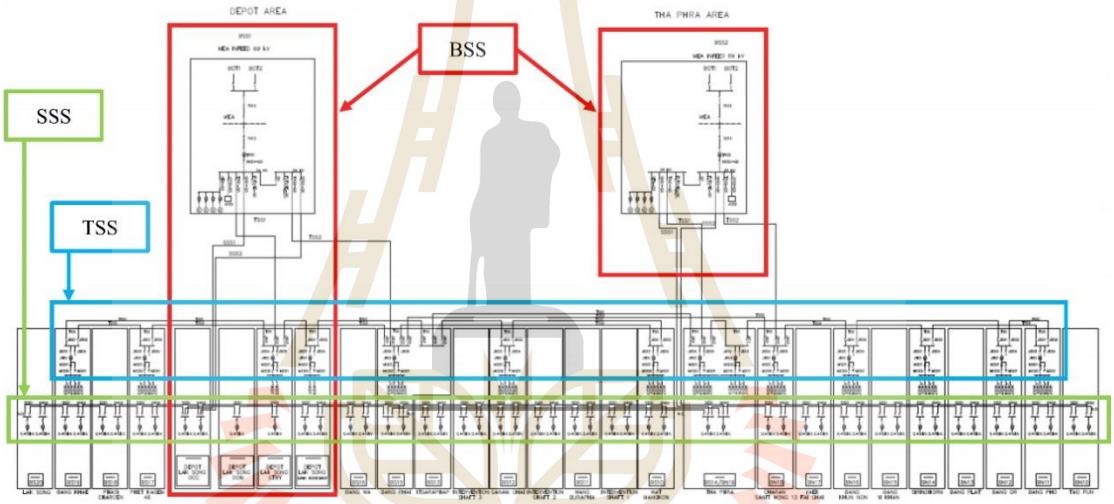
2) รถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม หรือ สายสีม่วง เป็นโครงการระบบแบบขนส่งมวลชนเร็ว รุ่น เจเทรค ซัสทิน่า (J-TREC Sustina) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีคลองบางไผ่-ครุใน รวมสถานีผู้โดยสาร 16 สถานี ระยะทางทั้งหมด 23.6 กิโลเมตร โดยรถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับและทางวิ่งใต้ดิน ที่ติดตั้งรางมาตรฐานขนาดกว้าง 1.435 เมตร โดยขบวนรถไฟฟ้าที่ใช้จะมีขนาดใหญ่ ทั้งหมด 21 ขบวน ขบวนละ 3 ตู้โดยสาร และสามารถจุผู้โดยสารได้ถึง 320 คนต่อขบวน

3) รถไฟฟ้ามหานคร สายสีเหลือง เป็นโครงการระบบแบบ รางเดี่ยว รุ่น อัลสตอม อินโนเวีย โมโนเรล 300 (Innovia Monorail 300) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีศูนย์ราชการนนทบุรี-มีนบุรี มีสถานีผู้โดยสาร 23 สถานี ระยะทางทั้งหมด 28.7 กิโลเมตร รถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับที่ติดตั้งรางเดี่ยว โดยขบวนรถไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบวางคร่อมราง (straddle-beam monorail) ทั้งหมด 30 ขบวน ขบวนละ 4 ตู้โดยสาร สามารถจุผู้โดยสารได้ถึง 356 คนต่อขบวน

4) รถไฟฟ้ามหานคร สายสีชมพู เป็นโครงการระบบแบบ รางเดี่ยว รุ่น อัลสตอม อินโนเวีย โมโนเรล 300 (Innovia Monorail 300) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีแคราย-มีนบุรี มีสถานีผู้โดยสาร 32 สถานี ระยะทางทั้งหมด 34.5 กิโลเมตร รถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับที่ติดตั้งรางเดี่ยว โดยขบวนรถไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบวางคร่อมราง (straddle-beam monorail) ทั้งหมด 42 ขบวน ขบวนละ 4 ตู้โดยสาร สามารถจุผู้โดยสารได้ถึง 356 คนต่อขบวน กล่าวได้ว่าระบบนี้จะมีลักษณะเหมือนกับรถไฟฟ้ามหานคร สายสีเหลือง นั้นเอง

จากข้อมูลข้างต้น พบว่า รถไฟฟ้ามหานครที่มีการใช้งานในประเทศไทยปัจจุบัน ล้วนอาศัยพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าในการทำงานอยู่ที่ 750 โวลต์ทั้งสิ้น ระบบจ่ายไฟที่ถูกนำมาใช้งานในส่วนนี้จึงต้องมีการแปลงทั้งประเภทและระดับของพลังงานไฟฟ้าที่รับมาจากการไฟฟ้านครหลวงให้มีค่าที่เหมาะสมกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแต่ละระบบ โดยขั้นตอนการทำงานของระบบจ่ายไฟในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรูปแบบนี้ได้กระจายหน้าที่การทำงานให้กับสถานีจ่ายไฟย่อยทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ เริ่มต้นสถานีไฟฟ้าแม่ข่าย (Buck substation: BSS) จะทำการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 69 กิโลโวลต์ ที่รับมาจากการไฟฟ้านครหลวงให้มีขนาดลดลงเหลือ 24kV ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า แล้วส่งต่อไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction substation: TSS) ที่มีหม้อแปลงระบบขับเคลื่อน (traction transformer) ทำหน้าที่ปรับลดระดับ

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งจากขนาด 24 กิโลโวลต์ เป็น 585 โวลต์ และมีอุปกรณ์เรียงกระแส (rectifier) แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 585 โวลต์ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 โวลต์ เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ได้ให้กับรถไฟฟ้าแต่ละขบวนผ่านรางที่สาม ซึ่งเปรียบรางที่สามเป็นขั้วบวกและรางวิ่งเป็นขั้วลบในขณะที่ขบวนรถไฟฟ้าถูกแทนด้วยโหลดของระบบ และในขณะเดียวกันสถานีไฟฟ้าบริการ (Service Substation: SSS) จะรับพลังงานไฟฟ้าบางส่วนที่ผ่านการปรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าแม่ข่ายมาทำการปรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าอีกหนึ่งขึ้นจนได้แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด แล้วจึงนำไปจ่ายให้กับสถานีผู้โดยสาร ระบบอาณัติสัญญาณ และโหลดอื่นในระบบ ตัวอย่างระบบจ่ายไฟกระแสตรงของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีน้ำเงิน แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างระบบจ่ายไฟกระแสตรงของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีน้ำเงิน

(ที่มาภาพ: ชัยยุทธ์ สัมภวะคุปต์, 2560)

3.2.3.2 สำนักการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร

สำนักการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร (Bangkok Metropolitan Administration: BMA) เรียกโดยย่อว่า "สจส." รับผิดชอบดูแลรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ 6 รอบพระชนมพรรษา หรือที่รู้จักอย่างกว้างขวางในชื่อ รถไฟฟ้าบีทีเอส (BTS Skytrain) เป็นระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเร็วที่ใช้ทางวิ่งของรถไฟฟ้าแบบยกระดับแห่งแรกของประเทศไทย เปิดให้บริการในพื้นที่กรุงเทพมหานคร จังหวัดสมุทรปราการ และจังหวัดปทุมธานี ตั้งแต่ วันที่ 5 ธันวาคม พ.ศ.2542 โดยบริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) (Bangkok Mass Transit System Public Company Limited: BTSC) ปัจจุบันรถไฟฟ้าบีทีเอสมีเส้นทางที่ให้บริการอยู่ทั้งหมด 2 เส้นทาง รวม

ระยะทางทั้งสิ้น 68.25 km ในขณะที่มีจำนวนสถานีผู้โดยสาร 61 สถานี (สมพงษ์ ศิริโสภณศิลป์, วิษารัช สัญญาลักษณ์ฤชัย และ วิรัช หิรัญ, 2554) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

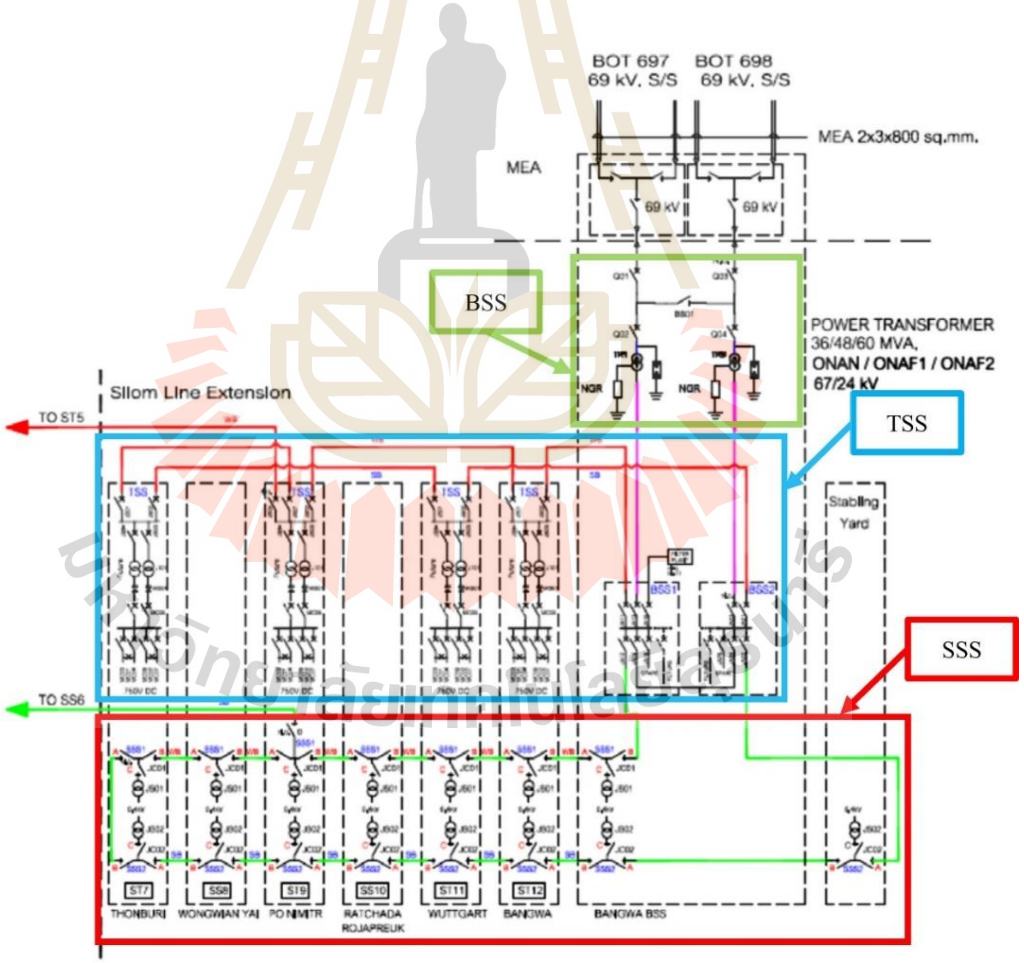
1) รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสุขุมวิท (สายสีเขียวอ่อน) หรือรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ สาย 1 เป็นโครงการระบบขนส่งมวลชนเร็ว รุ่น ซีเมนส์ โมดูลาร์ เมโทร (Siemens Modular Metro) ซีเมนส์ โบซันคายา (Siemens Bozankaya) ซีเอ็นอาร์ ฉางชุน (CNR Changchun Railway Vehicles) และซีอาร์อาร์ซี ฉางชุน (CRRC Changchun Railway Vehicles) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีวงแหวน-ลำลูกกา มีสถานีผู้โดยสาร 47 สถานี ระยะทางทั้งหมด 53.58 กิโลเมตร รถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับที่ติดตั้งรางคู่มาตราฐานขนาดกว้าง 1.435 เมตร

2) รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม (สายสีเขียวเข้ม) หรือรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ สาย 2 เป็นโครงการระบบขนส่งมวลชนเร็ว รุ่น ซีเมนส์ โมดูลาร์ เมโทร (Siemens Modular Metro) ซีเมนส์ โบซันคายา (Siemens Bozankaya) ซีเอ็นอาร์ ฉางชุน (CNR Changchun Railway Vehicles) และซีอาร์อาร์ซี ฉางชุน (CRRC Changchun Railway Vehicles) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีสนามกีฬาแห่งชาติ-บางหว้า มีสถานีผู้โดยสาร 14 สถานี ระยะทางทั้งหมด 14.67 กิโลเมตร รถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับที่ติดตั้งรางคู่มาตราฐานขนาดกว้าง 1.435 เมตร

3) รถไฟฟ้าสายสีทอง เป็นโครงการระบบขนส่งมวลชนรอง รุ่นบอมบาร์ดิเอร์ อินโนเวีย เอพีเอ็ม 300 (Bombardier Innovia APM 300) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีกรุงธนบุรี-คลองสาน มีสถานีผู้โดยสาร 3 สถานี ระยะทางทั้งหมด 2.7 กิโลเมตร รถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับที่ติดตั้งรางนำทาง เนื่องจากขบวนรถวิ่งด้วยล้อยางบนพื้นคอนกรีต

จากข้อมูลของรถไฟฟ้าบีทีเอสทั้ง 2 สายและรถไฟฟ้าสายสีทองจะเห็นได้ว่ารถไฟฟ้าแต่ละขบวนทำงานด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันไฟฟ้า 750 โวลต์ ระบบจ่ายไฟที่ถูกนำมาใช้งานในระบบเหล่านี้จึงเป็นระบบจ่ายไฟกระแสตรงที่มีลักษณะคล้ายกับรถไฟฟ้านครหลวง ซึ่งประกอบไปด้วยสถานีจ่ายไฟย่อยทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ เริ่มต้นสถานีไฟฟ้าแม่ข่าย (Buck substation: BSS) สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction substation: TSS) และสถานีไฟฟ้าบริการ (Service Substation: SSS) แสดงดังรูปที่ 3.17 พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากสถานีไฟฟ้าย่อยเหล่านี้จะถูก

ส่งเข้ามายังขบวนรถไฟฟ้า แล้วทำการแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 400 โวลต์ ผ่านวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้า (Converter units) เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้านี้ให้กับชุดมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าต่อไป ซึ่งปัจจุบันในประเทศไทยได้มีการใช้งานเทคโนโลยีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงทั้งหมด 2 รูปแบบ คือ แบบซีเมนส์ และแบบซีเอ็นอาร์ แสดงดังรูปที่ 3.18 โดยรูปแบบการทำงานของทั้งสองระบบถูกออกแบบมาให้มีการทำงานที่เหมาะสมและครอบคลุมความต้องการพื้นฐาน เช่น ขบวนรถไฟฟ้ามีความสวยงาม และความสามารถในการบรรจุผู้โดยสารมากกว่า 50,000 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง การควบคุมระบบใช้คอมพิวเตอร์สั่งการทั้งหมด ระบบอาณัติสัญญาณถูกออกแบบให้มีความปลอดภัยสูงสามารถทำงานได้แม้ระบบส่วนใหญ่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทำงานขัดข้อง ระบบปฏิบัติการเดินรถมีการควบคุมต่าง ๆ รองรับความปลอดภัยในทุกด้าน เป็นต้น



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างระบบจ่ายไฟกระแสตรงของรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีเขียวเข้ม ส่วนต่อขยาย

(ที่มาภาพ: ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, 2560)

1) แบบซีเมนส์ (Siemens model): ขบวนรถไฟฟ้าโมเดลนี้จะเป็นแบบ 4 ตู้ มีทั้งสิ้น 35 ขบวน ซึ่งประกอบด้วย ตู้รถไฟฟ้ามีระบบขับเคลื่อน (motor cars) ที่ด้านหน้าและท้ายของขบวนรถไฟฟ้า และตู้รถไฟฟ้าแบบไม่มีระบบขับเคลื่อน (trailer cars) 2 ตู้อยู่ตรงกลางของขบวนรถไฟฟ้าตามชนิด ดังต่อไปนี้ (1) ตู้รถไฟฟ้าแบบ A-Car มีระบบขับเคลื่อนและห้องคนขับ (driving cab) และ (2) ตู้รถไฟฟ้าแบบ C-Car ไม่มีระบบขับเคลื่อนและห้องคนขับ แต่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้า สำหรับระบบปรับอากาศและระบบแสงสว่าง ระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 โวลต์ จากรางที่สามผ่านชุดแปลงกระแสไฟฟ้าสลับระบบขับเคลื่อน เพื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ติดตั้งอยู่บนเพลาล้อของรถ A-car ทั้งสองตู้ ในทำนองเดียวกันตู้รถไฟฟ้า C-car ทั้งสองตู้ ตรงกลางได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 โวลต์ จากรางที่สาม แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 400 โวลต์ และไฟฟ้ากระแสตรง 110 โวลต์ เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ และอัดประจุให้แบตเตอรี่ ตามลำดับ ขบวนรถไฟฟ้า 4 ตู้ มีความยาวตลอดทั้งขบวน 86.6 เมตร และกว้าง 3.12 เมตร รองรับผู้โดยสารได้สูงสุดจำนวน 1,490 คน (มีผู้โดยสารนั่งเต็มทุกที่นั่งและยืน) ที่น้ำหนักบรรทุก (load condition) 8 คนต่อตารางเมตร จำนวนที่นั่งผู้โดยสาร 42 ที่นั่งต่อตู้ และ 168 ที่นั่งทั้งขบวน มีประตูโดยสารเลื่อนปิดเปิดด้านนอกตัวรถ (sliding door) ควบคุมการทำงานด้วยระบบควบคุมกบมอเตอร์ไฟฟ้า มีความกว้างเมื่อเปิดสุด 1.4 เมตร จำนวน 16 บานต่อด้านตัวรถทำด้วยเหล็กปลอดสนิม ติดตั้งระบบปรับอากาศ พร้อมหน้าต่างชนิดกันแสง



รูปที่ 3.18 เทคโนโลยีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย

(ที่มาภาพ: https://www.oknation.net/post/detail/634ed1a050f961ab20f3f885 [เข้าถึงเมื่อ 19 พฤษภาคม 2568])

2) แบบซีเอ็นอาร์ (CNR model): ขบวนรถไฟฟ้าโมเดลนี้เป็นขบวนใหม่รุ่นล่าสุดจะเป็นแบบ 4 ตู้ มีทั้งสิ้น 12 ขบวน ประกอบด้วยตู้รถไฟฟ้าไม่มีระบบขับเคลื่อนมีห้องขับเรียกว่า TC-Car หรือ Trailer Car จำนวนสองตู้อยู่ที่ด้านหน้าและด้านหลังขบวน และตู้รถไฟฟ้าแบบ

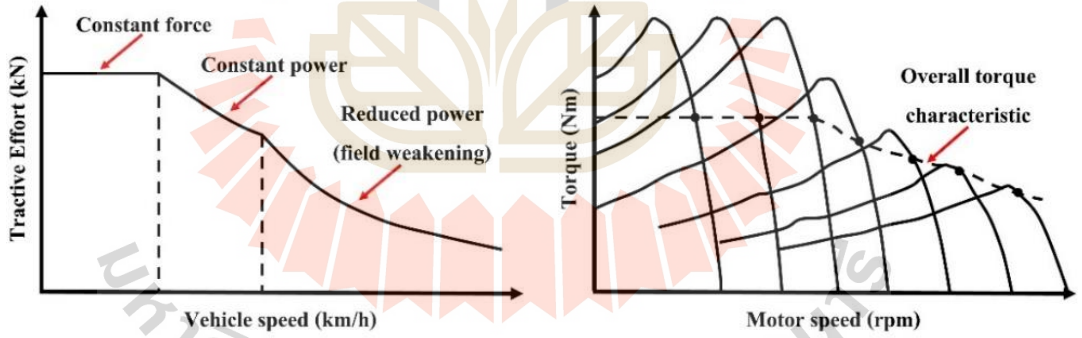
มีระบบขับเคลื่อนแต่ไม่มีห้องขับเรียกว่า M-Car หรือ Motor Car จำนวนสองตู้อยู่ตรงกลางขบวน ตู้รถไฟฟ้า TC-car แต่ละตู้ติดตั้งระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า ACM ขนาด 140 กิโลโวลต์แอมป์ 3 เฟส 400 โวลต์ ACM แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 โวลต์ จากรางที่สามไปเป็น 3 เฟส 400 โวลต์ เพื่อจ่ายให้กับระบบปรับอากาศ ระบบลมอัด ระบบแสงสว่างภายในและภายนอก และโหลดต่าง ๆ นอกจากนั้นแล้ว ACM ยังติดตั้งเครื่องประจุไฟขนาด 22 กิโลวัตต์ 110 โวลต์ สำหรับแบตเตอรี่ของตู้รถไฟฟ้า TC-car สำหรับตู้รถไฟฟ้า M-car เป็นตู้รถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อน และไม่มีห้องขับแต่ละตู้ติดตั้งระบบขับเคลื่อนที่เรียกว่า MCM เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ขับเคลื่อน ตู้รถไฟฟ้า M-car ที่ได้รับไฟฟ้า 750 โวลต์ จากรางจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สาม ความยาวตลอดทั้งขบวน 87.25 เมตร และกว้าง 3.12 เมตร ตู้รถไฟฟ้า TC-car และ M-car มีที่นั่ง 42 ที่นั่ง รองรับผู้โดยสารได้สูงสุด ที่น้ำหนักบรรทุก 8 คนต่อตารางเมตร ผู้โดยสารสูงสุดของแต่ละตู้รถไฟฟ้า TC-car และ M-car คือ 361 คน และ 384 คน ตามลำดับ จำนวนผู้โดยสารทั้งขบวนสูงสุด 1,490 คน ตัวรถทำจากเหล็กปลอดสนิม มีน้ำหนักเบาโครงสร้างเป็นแบบขึ้นรูปเชื่อมประกอบแต่ละตู้รถไฟฟ้าติดตั้งเครื่องปรับอากาศแบบติดตั้งบนหลังคาจำนวนสองเครื่องใช้น้ำยาทำความเย็น R407C ที่ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม การควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง โดยสารใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ (TCMS) ประตูผู้โดยสารติดตั้งแต่ละด้านของตู้รถไฟฟ้า 4 บาน ควบคุมและสั่งการด้วยระบบไฟฟ้าแบบเลื่อนปิดเปิดด้านนอกตัวรถ

รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีพิกัดกำลังไฟฟ้าประมาณ 1–2 เมกะวัตต์ ต่อขบวนรถ ทั้งรถไฟฟ้ามหานครและบีทีเอสรับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงผ่านรางที่สามที่ระดับแรงดัน 750 โวลต์ ยกเว้น ระบบขนส่งทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ (Suvarnabhumi Airport Rail Link: SARL) ที่รับพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับแรงดัน 25 กิโลโวลต์ 50 เฮิร์ต ผ่านตัวนำสายจ่ายเหนือศีรษะ ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนี้มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ระยะห่างระหว่างขบวนรถสองขบวนประมาณ 120 วินาที เมื่อมีรถวิ่งอยู่ในระบบไฟฟ้าหลายขบวนบางขบวนดึงกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัดเพื่อเร่งความเร็ว บางขบวนอาจจะเบรก บางขบวนเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย ส่งผลให้คุณสมบัติของโหลดรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งแตกต่างจากโหลดของสถานีจ่ายไฟทั่วไปของการไฟฟ้านครหลวง

3.3 พลวัตการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นพื้นฐานที่มีความสำคัญสำหรับนำไปประกอบการพิจารณาข้อมูลในส่วนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็น การจัดการการเบรกแบบจ่ายคืน

พลังงานไฟฟ้า การออกแบบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน เป็นต้น ซึ่งต้องอาศัยการพิจารณาภาพรวมของพฤติกรรมการทำงานของขบวนรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส หรือมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเป้าหมายที่กำลังพิจารณาว่าเป็นเทคโนโลยีแบบใดและมีรายละเอียดอย่างไร ดังนั้นการจำลองจึงต้องการลักษณะสมบัติการทำงานของรถไฟฟ้าในรูปของแรงฉุดลาก (tractive force: TE) ที่เกิดจากแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าส่งกำลังขับเคลื่อนผ่านเฟืองทดไปยังล้อ มากกว่าการนำลักษณะสมบัติเส้นโค้งแรงบิดและความเร็วรอบ (torque speed curve) ของมอเตอร์ไฟฟ้ามาใช้งานโดยตรง แสดงดังรูปที่ 3.19(ข) โดยปกติแรงฉุดลากจะถูกนำมาแสดงในรูปแบบที่ผ่านการปรับคูณด้วยอัตราทดของเฟืองให้เหมาะกับการนำไปคำนวณการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ค่าที่ได้จึงสามารถนำมาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดลากหน่วยนิวตัน (N) ที่แปรผันตรงกับความเร็วการเคลื่อนที่เชิงเส้นของรถไฟฟ้าในหน่วย เมตรต่อวินาที (m/s) หรือกิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/h) แสดงดังรูปที่ 3.19(ก) โดยไม่ต้องคำนึงถึงรูปแบบของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อน อินเวอร์เตอร์ และระบบจ่ายไฟว่าเป็นชนิดกระแสตรงหรือกระแสสลับ เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวถูกนำมาคิดเป็นส่วนหนึ่งของตัวปรับคูณที่ใช้กำหนดลักษณะคุณสมบัติของแรงฉุดลากแล้ว (ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2560)



(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดลาก (ข) เส้นโค้งแรงบิดและความเร็วรอบ

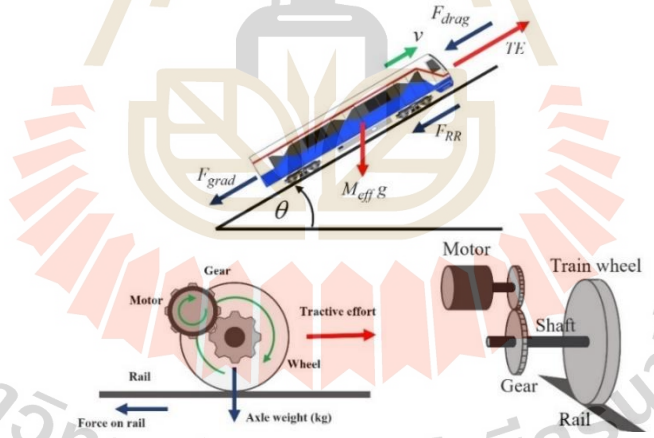
รูปที่ 3.19 ลักษณะสมบัติของแรงฉุดลากของขบวนรถไฟฟ้า

ตามนิยามกราฟแรงฉุดหัวลากมาตราฐานของสหภาพรถไฟระหว่างประเทศ (International Union of Railways: UIC) จะมีตัวแปรความเร็วฐาน (base speed: v_n) เป็นความเร็วสุดท้ายที่แรงฉุดลากจะสามารถคงค่าสถานะการทำงาน ณ ขณะนั้นไว้ได้ ก่อนที่แรงฉุดลากนี้จะมีค่าปรับเปลี่ยนตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วมีค่าเกิน v_1 การทำงานจะเปลี่ยนจากช่วงแรงฉุดลากคงที่

(constant force region) เป็นช่วงกำลังงานคงที่ (constant power region) และหากความเร็วเกิน v_2 การทำงานของระบบจะเปลี่ยนจากช่วงกำลังงานคงที่เป็นกำลังงานมีค่าลดน้อยลง (reduced power) แสดงดังรูปที่ 3.19(ก)

$$TE - R = M_{eff}\alpha \tag{3.1}$$

โดยทั่วไปการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าได้รับพลังงานไฟฟ้ามากพอที่จะสร้างแรงฉุดลากเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยรวม (Overall resistance: R) ดังสมการที่ 3.1 จากนั้นแรงลัพธ์ที่เหลือจะถูกใช้เป็นแรงส่งสำหรับเร่ง (α) ความเร็วให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ต่อไป ในการพิจารณาแรงลัพธ์ในส่วนนี้จะใช้หลักการคำนวณทางพลวัตของรถไฟฟ้า (train vehicle dynamic) ซึ่งเริ่มต้นด้วยการสร้างแผนภาพวัตถุอิสระสำหรับการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่มีมวลประสิทธิผล (effective vehicle mass: M_{eff}) บนรางวิ่งยกระดับเอียงทำมุม (θ) กับแนวราบ ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน แสดงดังรูปที่ 3.20 (Chymera and Goodman, 2012)



รูปที่ 3.20 แผนภาพวัตถุอิสระแสดงการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.20 เมื่อทำการแจกแจงรายละเอียดแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าทั้งหมดที่เกิดขึ้น สามารถแยกแรงนี้ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ แรงเสียดทานต้านทาน (frictional force or rolling resistance: F_{RR}) แรงต้านทานอากาศ (aerodynamic drag force: F_{drag}) และแรงต้านทานโน้มถ่วง (gravitational or gradient force: F_{grad}) ดังสมการที่ 3.2

$$R = F_{RR} + F_{drag} + F_{grad} \tag{3.2}$$

F_{RR} เป็นแรงต้านที่เกิดจากแรงเสียดทานที่สำคัญ 3 ประเภท คือ แรงเสียดทานจากแบริ่ง (bearing torque) แรงเสียดทานจากเฟืองทด (gear teeth friction) และแรงเสียดทานจากระบบเบรก (brake pad) อย่างไรก็ตามแรงต้านการเคลื่อนที่ประเภทนี้สามารถคำนวณจากสมการมาตรฐานอย่างง่าย ดังสมการที่ 3.3 โดยสมการนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ f_0 ที่แปรเปลี่ยนตามลักษณะการใช้งานล้อกับทางวิ่งของรถไฟฟ้า เช่น ล้อเหล็กกับรางมีค่าประมาณ 0.001 ล้อยางกับพื้นถนนมีค่าประมาณ 0.006-0.01 เป็นต้น ในขณะที่สัมประสิทธิ์ f_1 สามารถละทิ้งได้ ดังนั้นค่า f_0 จึงเป็นตัวแปรหลักในการกำหนดค่า F_{RR}

$$F_{RR} = f_{RR} W_{axle} = (f_0 + f_1 v) W_{axle} \tag{3.3}$$

โดย f_{RR} f_0 และ f_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

W_{axle} คือ ค่าน้ำหนักโหลดของแกนขับเคลื่อน (axle load)

F_{drag} เป็นแรงต้านที่แปรผันตามโครงสร้างส่วนหน้าของรถไฟฟ้า เนื่องจากพื้นที่ข้างหน้าของรถไฟฟ้าเป็นส่วนที่ต้องรับแรงดันอากาศขณะที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ การคำนวณแรงต้านนี้สามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_d A_F v_{air}^2 \tag{3.4}$$

โดย ρ_{air} คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ

C_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

v_{air} คือ ค่าความเร็วสัมพัทธ์ของการไหลของอากาศเทียบกับความเร็วของขบวนรถไฟฟ้า

A_F คือ ค่าพื้นที่ด้านหน้าของรถจักรไฟฟ้าที่ฉายให้ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ

F_{grad} เป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดผลมาจากมวลของรถไฟฟ้าที่เคลื่อนที่บนรางวิ่งในแนวเอียงทำมุม θ กับพื้น แรงต้านการเคลื่อนที่ในส่วนนี้สามารถส่งผลในลักษณะเสริมหรือต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าว่าขึ้นเนินหรือลงเนิน โดยทั่วไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รางวิ่งมักมีความชันที่น้อยมากและเปลี่ยนแปลงอยู่บ่อยครั้งในแต่ละจุด การพิจารณาแรงต้านโน้มถ่วงจึงสมมติให้รถไฟฟ้าเป็นจุดมวล (mass point) เพื่อจัดสมการให้อยู่ในรูปอย่างง่าย ดังสมการที่ 3.5

$$F_{grad} = \pm M_{eff}\, g \sin\theta \tag{3.5}$$

นอกจากนี้ขณะที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่บนทางโค้งของรางวิ่งจะทำให้เกิดแรงต้านเพิ่มเติมอีกประเภทหนึ่ง คือ แรงสู่ศูนย์กลาง โดยทางการในส่วนนี้จะรวมไปถึงมวลรถเปล่าและมวลในส่วนที่แปลงมาจากโมเมนต์ความเฉื่อยของโครงสร้างที่เชื่อมกับเพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าของรถไฟฟ้าฝรั่งเศส (Société National des Chemins de fer Français: SNCF) ได้กำหนดให้แรงต้านประเภทนี้มีค่าเท่ากับ $800/r$ เมื่อกำหนดให้ r คือ รัศมีของทางโค้งในหน่วย เมตร (m) และแรงต้านมีหน่วยเป็น นิวตัน (N) และทางการรถไฟเยอรมัน (Deutsche Bahn: DB) กำหนดให้แรงต้านประเภทนี้มีค่า เท่ากับ $650/(r - 30)$ ในกรณีที่ $r \geq 300$ เมตร และมีค่า เท่ากับ $650/(r - 55)$ ในกรณีที่ $r < 300$ เมตร

และอีกสมบัติความสำคัญที่มีผลต่อการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า คือ มวลของรถไฟฟ้าและมวลบรรทุก สำหรับการคำนวณในส่วนนี้เพื่อไม่ให้เกิดความซับซ้อนจนเกินไป จะมีการใช้ตัวประกอบมวลประสิทธิผล (effective mass coefficient: λ_{eff}) แทนผลรวมของน้ำหนักบรรทุก ได้แก่ มวลของผู้โดยสาร (passenger mass: M_{psg}) มวลของสินค้า (freight mass: M_{frgt}) และมวลสมมูลจากโมเมนต์ความเฉื่อยของการหมุน (rotational inertia equivalent mass: M_{rot}) แล้วเทียบอัตราส่วนกับมวลรถเปล่า (tare mass: M_{tare}) (ชัยยุทธ์ สัมภวะคุปต์, 2560) ดังสมการต่อไปนี้

$$M_{eff} = M_{tare}\left(1 + \lambda_{eff}\right) \tag{3.6}$$

$$\lambda_{eff} = \frac{M_{psg} + M_{frgt} + M_{rot}}{M_{tare}} \tag{3.7}$$

โดยค่ามาตราฐานของ λ_{eff} สำหรับรถไฟขนส่งสินค้ามีค่าประมาณ 0.03 - 0.04 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีค่าประมาณ 0.08 - 0.12 และหัวรถจักรไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.15 - 0.3 นอกจากนี้ค่าความเร่งของรถไฟฟ้าในการบริการประเภทต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกัน เพื่อใช้อ้างอิงในการพิจารณาผลให้มีความสอดคล้องกับการทำงานจริง สามารถสรุปค่าความเร่งมาตราฐานสำหรับใช้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ดังตารางที่ 3.2 (ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2560)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.2 ค่าความเร่งมาตรฐานสำหรับใช้กับรถไฟฟ้า

ประเภทรถไฟฟ้า	ความเร่ง (m/s2)
รถไฟฟ้าบรรทุกสินค้าหนัก (Freight train)	0.02-0.2
รถไฟฟ้าโดยสาร (Passenger train)	0.3-0.4
รถไฟฟ้าด่วนระยะไกล (Express long-distance train)	0.4-0.7
รถไฟฟ้าชานเมือง (Suburban train)	0.8-1.2
รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและรางเบา (Metro and light rail train)	1.0-3.0

อย่างไรก็ตามเพื่อให้การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสามารถทำได้ง่ายขึ้น ทางผู้ผลิตระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนิยมระบุค่าแรงเสียดทานต้านการเคลื่อนที่ F_{RR} และแรงต้านทานอากาศ F_{drag} ในรูปของสมการกำลังสอง เรียกว่า สมการเดวีส์ (Davis equation) ดังสมการที่ 3.8 สมการนี้ได้จากการประมาณค่าเส้นโค้ง (curve fitting) ข้อมูลทดสอบของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเพื่อความสะดวกในการคำนวณ การรถไฟในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกได้ทำการพัฒนาสมการเดวีส์สำหรับใช้คำนวณแรงต้านการเคลื่อนที่ให้เหมาะสมกับการให้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศนั้น ๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ a เป็นค่าแสดงผลความต้านทานที่เกิดจากโหลดกดที่แกนเพลา ความเสียดทานของแบริ่ง และแรงต้านการหมุน สัมประสิทธิ์ b เป็นค่าแสดงผลความต้านทานที่มีค่าขึ้นอยู่กับความเสียดทานที่ขอบล้อและการแกว่งของแกนเพลาของรถไฟฟ้า และสัมประสิทธิ์ c เป็นค่าแสดงผลของความต้านทานที่มีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะอากาศพลศาสตร์ของรถไฟฟ้า สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.21 (ชัยยุทธ์ สัมภวะคุปต์, 2560)



รูปที่ 3.21 สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ในระบบขนส่งมวลชนตามสมการเดวีส์

สำหรับการปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสามารถดำเนินการได้จากการคำนวณ v_i กับ v_{i+1} คือ ความเร็วรถไฟฟ้าก่อนและหลังการปรับปรุง Δt คือ ขั้นเวลาที่พิจารณา

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า (time step) และ s_i กับ s_{i+1} คือ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าก่อนและหลังการปรับปรุง ดังสมการที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

$$v_{i+1} = v_i + a\Delta t \tag{3.9}$$

$$s_{i+1} = s_i + v_i\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 \tag{3.10}$$

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถไฟฟ้า (train power consumption: P_{tr}) ให้สามารถทำงานได้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ กำลังไฟฟ้าฉุดลาก (tractive power: P_{ta}) และกำลังไฟฟ้าเสริม (auxiliary power: P_{aux}) ดังสมการที่ 3.11 โดยกำลังไฟฟ้าฉุดลากจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่า TE v และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นกลของมอเตอร์ไฟฟ้า (η) ดังสมการที่ 3.12 และกำลังไฟฟ้าเสริมสำหรับจ่ายให้กับโหลดต่าง ๆ บนรถไฟฟ้า เช่น ระบบแสงสว่าง ระบบเครื่องปรับอากาศ ระบบไฟสัญญาณ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถไฟฟ้า (train energy consumption: E_{tr}) ดังสมการที่ 3.13 เมื่อ $E_{tr,i}$ กับ $E_{tr,i+1}$ คือ พลังงานไฟฟ้าก่อนและหลังการปรับปรุง (Zhang, Wu, and Liu, 2017)

$$P_{tr} = P_{ta} + P_{aux} \tag{3.11}$$

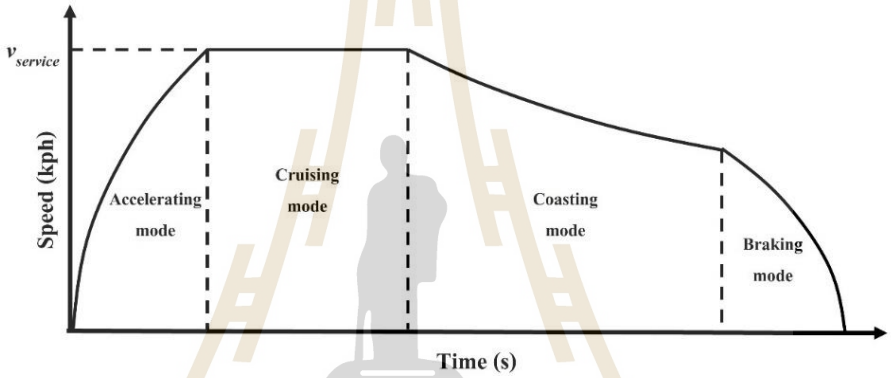
$$P_{ta} = \begin{cases} \dfrac{TE}{\eta} \times v & ;\ \text{if TE} \geq 0 \\ \eta TE \times v & ;\ \text{if TE} < 0 \text{ with regenerative brake} \\ 0 & ;\ \text{if TE} < 0 \text{ without regenerative brake} \end{cases} \tag{3.12}$$

$$E_{tr,i+1} = E_{tr,i} + P_{tr}\Delta t \tag{3.13}$$

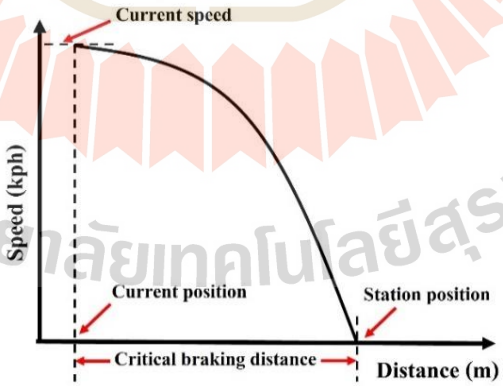
หลังจากพิจารณาการเคลื่อนที่พื้นฐานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนดังสมการต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น จะสามารถสร้างลักษณะสมบัติเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว-เวลาของรถไฟฟ้า (train's speed-time curve) หรือเส้นโครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้า (speed profile) ที่เคลื่อนที่ตามรางวิ่งระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี แสดงดังรูปที่ 3.22 เส้นโค้งนี้แสดงโหมดการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทำงานของรถไฟฟ้าทั้งหมด 4 โหมด ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว (accelerating mode) โหมดการเคลื่อนที่คงที่ (cruising or constant-speed mode) โหมดการแล่นด้วยความเฉื่อย (coasting mode) และโหมดการเบรก (braking mode) อย่างไรก็ตามรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าอาจจะมีการสลับโหมดไปมาตามวัตถุประสงค์การใช้งานที่ต้องการ เช่น หากต้องการประหยัดพลังงานไฟฟ้าอาจจะต้องควบคุมให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยโหมดการใช้แรงเฉื่อย ควบคุมรถไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ด้วยโหมดการรักษาความเร็วที่ความเร็วสูงสุดเป็นเวลานานเมื่อต้องการทำเวลาในการเคลื่อนที่ให้น้อยที่สุด เป็นต้น



รูปที่ 3.22 เส้นโครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้า



รูปที่ 3.23 ระยะวิกฤตการเบรก

จากรูปที่ 3.22 ปกติรถไฟฟ้าจะเริ่มเคลื่อนที่ออกจากสถานีผู้โดยสารต้นทางด้วยโหมดเร่งความเร็ว ซึ่งมีความเร่งในการเคลื่อนที่เป็นค่าบวก ($\alpha > 0$) จนกระทั่งรถไฟฟ้ามีความเร็วเท่ากับ

ความเร็วทำงาน (service speed: $v_{service}$) รถไฟฟ้าจะปรับลดความเร่งให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ($\alpha = 0$) และเข้าสู่โหมดการรักษาระดับความเร็วเพื่อรักษาระดับความเร็วให้คงที่ จากนั้นเมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งเริ่มทำงานของโหมดการใช้แรงเฉื่อยที่ออกแบบไว้ รถไฟฟ้าจะตัดแรงฉุดลากของมอเตอร์ไฟฟ้าออกและปล่อยให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยโมเมนตัมที่ความเร่งมีค่าเป็นลบ ($\alpha < 0$) อย่างไรก็ตามหากรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ลงเนินก็อาจจะทำให้ความเร่งมีค่าเป็นบวกได้ และสุดท้ายรถไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นโหมดการเบรกในขณะที่เคลื่อนที่มาถึงระยะที่ต้องทำการเบรก เรียกว่า ระยะวิกฤตการเบรก (Critical braking distance: CBD) แสดงดังรูปที่ 3.23 เพื่อเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารปลายทางด้วยความเร่งที่เป็นลบ ($\alpha < 0$) ดังสมการที่ 3.14 (ชัยยุทธ์ สัมภวะคุปต์, 2560)

$$CBD = -0.5 \times \frac{v^2}{\alpha} \tag{3.14}$$

3.4 เทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยวิธีการฉีดกระแส

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Analysis) เป็นกระบวนการคำนวณค่าทางไฟฟ้า ณ จุดต่าง ๆ ภายในโครงข่ายระบบจ่ายไฟ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า การใช้พลังงานไฟฟ้ารวม การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบ เป็นต้น เพื่อสนับสนุนการพิจารณาและวางแผนโครงข่ายขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนสูงอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มักประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟและโหลดอยู่หลายจุดตลอดทั้งระบบ และยังมีลักษณะของโหลดที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น (ตามรูปแบบการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกัน) อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับข้อมูลเชิงพลวัตการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าและเทคนิคการคำนวณที่เหมาะสมกับระบบ (Triwijaya, Pradipta, and Wati, 2023)

การปริทัศน์วรรณกรรมในบทที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเทคนิคดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทั้งแบบระบบไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current: DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current: AC) อย่างแพร่หลาย เช่น วิธีเกาส-ไซเดล (Gauss–Seidel Method) วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton–Raphson Method) วิธีฟาสดีคัฟเปิล (Fast Decoupled Method) วิธีขยับถอยหลัง-เดินหน้า (Backward/Forward Sweep Method) วิธีการฉีดกระแส

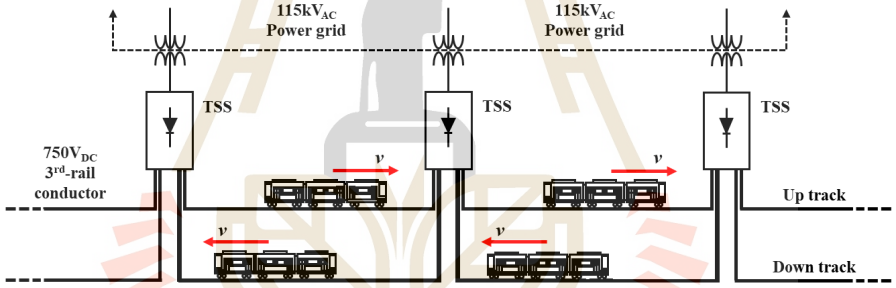
(Current Injection Method) เป็นต้น โดยแต่ละเทคนิคก็จะมีข้อดี ข้อจำกัด และการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป (Triwijaya, Pradipta, and Wati, 2023; Kile, Uhlen, Warland, and Kjølle, 2014) แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

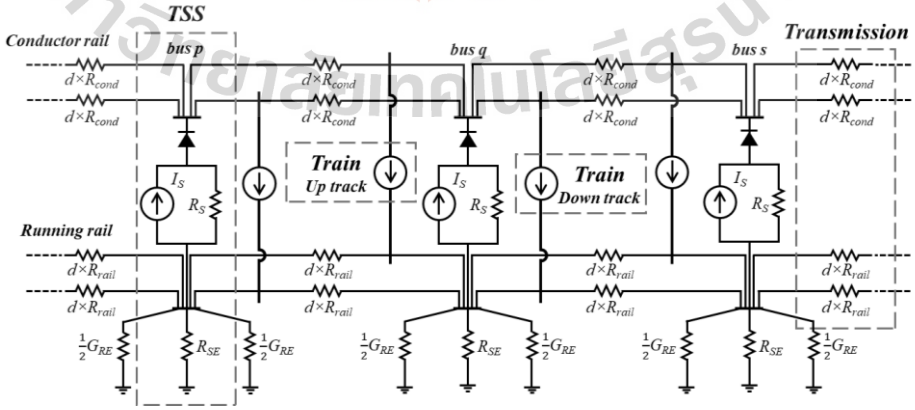
เทคนิค	ข้อดี	ข้อเสีย	เหมาะกับระบบ
วิธีเกาส์-ไซเดล	- ง่าย - ใช้หน่วยความจำน้อย	- คอนเวอร์จช้า - ไม่เหมาะกับระบบขนาดใหญ่	- AC - DC (ระบบเล็ก)
วิธีนิวตัน-ราฟสัน	- แม่นยำสูง - คอนเวอร์จเร็ว	- ต้องใช้เมทริกซ์จาโคเบียน - ใช้หน่วยความจำมาก	- AC - DC (โหลดคงที่)
วิธีขยับถอยหลัง-เดินหน้า	- คอนเวอร์จเร็วมากในระบบ radial - เหมาะกับโหลดไม่เชิงเส้น	- ไม่เหมาะกับระบบที่ซับซ้อน - ต้องจัดลำดับโนด	- AC (ระบบจำหน่ายไฟฟ้า) - DC
วิธีวิธีฟาสดีคัฟเปิล	- คอนเวอร์จเร็วมาก - ใช้หน่วยความจำน้อย - เหมาะกับระบบที่ซับซ้อน	- ใช้กับระบบ DC ไม่ได้ - ความแม่นยำต่ำ	AC (ระบบใหญ่)
วิธีการฉีดกระแส	- แก้สมการได้ง่าย - เหมาะกับโหลดกระแส	- ไม่เหมาะกับโหลดกำลังคงที่	- AC (กรณีพิเศษ) - DC

เมื่อนำเทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.3 มาเทียบหาความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน พบว่าวิธีการฉีดกระแสเป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณของกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเทคนิคนี้ถูกคิดค้นขึ้นมาสำหรับวิเคราะห์ระบบที่มีลักษณะเป็นแบบไฟฟ้ากระแสตรง โดยหลักการของเทคนิคนี้อาศัยพื้นฐานกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law: KCL) ในการกำหนดกระแสไฟฟ้าที่เข้าและออกแต่ละโนดหรือบัสของระบบ แล้วสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบของเมทริกซ์แอดมิทแตนซ์แทนการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเหมือนวิธีการทั่วไป เช่น วิธีเกาส์-ไซเดล วิธีนิวตัน-ราฟสัน วิธีฟาสดีคัฟเปิล เป็นต้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ระบบได้อย่างแม่นยำ รวดเร็ว และลู่เข้าสู่คำตอบได้ง่ายกว่าวิธีอื่น (Triwijaya, Pradipta, and Wati, 2023)

กระบวนการในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจะนำคุณสมบัติการทำงานและโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ปกติมักประกอบด้วย ขบวนรถไฟฟ้าหลายขบวนที่วิ่งให้บริการภายในระบบ สถานีไฟฟ้าย่อยแบบวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่มีการป้องกันกระแสไฟฟ้าที่อาจจะไหลย้อนกลับสู่สถานีไฟฟ้าย่อย ขนาด 600–750 โวลต์ ที่ติดตั้งกระจายอยู่ตามเส้นทางวิ่งทุก ๆ 1–3 กิโลเมตร รางตัวนำที่ใช้ป้อนกระแสให้กับรถไฟฟ้า รางวิ่งที่เป็นเส้นทางกลับกระแสไฟฟ้า และฉนวนคั่นระหว่างรางวิ่งกับดิน แสดงดังรูปที่ 3.24 โดยการประมวลผลการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยวิธีการฉีดกระแส จะต้องทำการแปลงองค์ประกอบทั้งหมดภายในโครงข่ายให้อยู่ในรูปของแบบจำลองพาย (π-model) (Kulworawanichpong, 2015; Mongkoldee, Leeton, and Kulworawanichpong, 2016) เพื่อนำไปดำเนินการพิจารณาด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์ให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 3.25 ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดที่ต้องพิจารณาดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.24 โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน



รูปที่ 3.25 แบบจำลองระบบจ่ายไฟกระแสตรงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ส่วนสถานีไฟฟ้าย่อย: มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแสนอร์ตัน (Norton's equivalent source) ในแบบจำลองนี้ ซึ่งมีลักษณะการวางตัวแปรกระแสลัดวงจร (I_{SS}) และความต้านทาน (R_{SS}) ของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีการเชื่อมต่อกับรางตัวนำ (C) ผ่านไดโอดในอุดมคติ และรางวิ่ง (R) ที่มีความต้านทานต่อสายดิน (R_{SE}) ตามที่แสดงในส่วนสถานีจ่ายไฟ

ส่วนสายส่งไฟฟ้า: สามารถจัดให้อยู่ในรูปของแบบจำลองพายที่ประกอบด้วย รางตัวนำ รางวิ่ง และฉนวนระหว่างรางวิ่งกับดิน โดยในแบบจำลองนี้จะวางความต้านทานรางตัวนำ (Conductor rail resistance: R_{cond}) และความต้านทานรางวิ่ง (Running rail resistance: R_{rail}) ตามเส้นทางวิ่งของรถไฟ และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจะวางตัวนำรางวิ่งกับดิน (Rail-to-earth conductance: G_{RE}) ที่หารครึ่งไว้ในตำแหน่งขอบทั้งสองด้านของรางวิ่ง

ส่วนรถไฟฟ้า: ถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่คร่อมระหว่างรางตัวนำและรางวิ่งในวิธีการฉีดกระแสที่นำมาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

กระบวนการในการพิจารณาค่าทางไฟฟ้าบัสต่าง ๆ ภายในของโครงข่ายจะเริ่มต้นจากการกำหนดแรงดันไฟฟ้าของแต่ละบัสให้มีค่าเท่ากับศูนย์และสร้างสมการวิเคราะห์โนด แสดงดังสมการที่ 3.15 ในขณะที่เมทริกซ์ค่าความนำ $[G]$ จะถูกสร้างขึ้นจากการควบรวมเมทริกซ์ค่าความนำย่อยระหว่างคู่บัส p กับ q หรือ q กับ s ได้แก่ เมทริกซ์ค่าความนำสถานีไฟฟ้าย่อย เมทริกซ์ตัค่าความนำของรางตัวนำกับรางวิ่ง และเมทริกซ์ค่าความนำของรางวิ่งกับดิน แสดงดังสมการที่ 3.16 เมื่อ $G_{pq}^{(C,C)}$ เป็นค่าความนำของรางตัวนำกับรางตัวนำ $G_{pq}^{(C,R)}$ และ $G_{pq}^{(R,C)}$ เป็นค่าความนำของรางตัวนำกับรางวิ่ง และ $G_{pq}^{(R,R)}$ เป็นค่าความนำของรางวิ่งกับรางวิ่ง (Kulworawanichpong, 2015)

$$[I]=[G][V] \tag{3.15}$$

$$\begin{bmatrix} I_1^{(C)} \\ I_1^{(R)} \\ I_2^{(C)} \\ I_2^{(R)} \\ \vdots \\ I_N^{(C)} \\ I_N^{(R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{1,1}^{(C,C)} & G_{1,1}^{(C,R)} \\ G_{1,1}^{(R,C)} & G_{1,1}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{1,2}^{(C,C)} & G_{1,2}^{(C,R)} \\ G_{1,2}^{(R,C)} & G_{1,2}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} G_{1,N}^{(C,C)} & G_{1,N}^{(C,R)} \\ G_{1,N}^{(R,C)} & G_{1,N}^{(R,R)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} G_{2,1}^{(C,C)} & G_{2,1}^{(C,R)} \\ G_{2,1}^{(R,C)} & G_{2,1}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \ddots & \begin{bmatrix} G_{N-1,N}^{(C,C)} & G_{N-1,N}^{(C,R)} \\ G_{N-1,N}^{(R,C)} & G_{N-1,N}^{(R,R)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} G_{N,1}^{(C,C)} & G_{N,1}^{(C,R)} \\ G_{N,1}^{(R,C)} & G_{N,1}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} G_{N,N-1}^{(C,C)} & G_{N,N-1}^{(C,R)} \\ G_{N,N-1}^{(R,C)} & G_{N,N-1}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{N,N}^{(C,C)} & G_{N,N}^{(C,R)} \\ G_{N,N}^{(R,C)} & G_{N,N}^{(R,R)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{(C)} \\ V_1^{(R)} \\ V_2^{(C)} \\ V_2^{(R)} \\ \vdots \\ V_N^{(C)} \\ V_N^{(R)} \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับเมทริกซ์กระแสไฟฟ้า [I] ในสมการที่ 3.15 สามารถหาได้จากการนำกระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อยและกระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้า (I_{tr}) มาคำนวณร่วมกัน โดยที่กระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเป็นผลหารระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_{tr}) กับแรงดันไฟฟ้า (V_{tr}) ที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านบัสที่กำลังพิจารณา กระบวนการต่าง ๆ ข้างต้น จะนำไปสู่การแก้สมการเพื่อหาค่าเมทริกซ์แรงดันไฟฟ้าของบัส [V] ซึ่งจะถูกดำเนินการในลักษณะนี้ซ้ำ ๆ อยู่หลายรอบจนกว่าค่าคาดเคลื่อนของผลเฉลยค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ (Mongkoldee, Leeton, and Kulworawanichpong, 2016)

นอกจากนี้ การเกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเป็นปัญหาหลักที่มักถูกกล่าวถึงบ่อยในการพิจารณาการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทุกระบบ โดยสาเหตุที่มีผลต่อการเกิดการสูญเสียมีด้วยกันหลายปัจจัย เช่น ประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์ ความต้านทานของสายส่ง การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นการคำนวณในส่วนของการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในการจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน อย่างไรก็ตามในที่นี้ได้เลือกใช้วิธีคำนวณค่าการสูญเสียจากผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟขับเคลื่อนลบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ 3.17 สำหรับค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียสามารถคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียคูณกับช่วงเวลาที่ใช้ในการพิจารณา แล้วนำมาบวกสะสมกับค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณก่อนหน้า เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างค่าที่ส่งออกจากสถานีจ่ายไฟและค่าที่ใช้จริงในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ 3.18

$$P_{loss}(i+1) = \sum_{k=1}^{Nsub} P_{SS,k}(i) - \sum_{k=1}^{Ntrain} P_{tr,k}(i) \tag{3.17}$$

$$E_{loss}(i+1) = E_{loss}(i) + P_{loss}(i+1) \times \Delta t \tag{3.18}$$

3.5 ปัญหาไฟดับและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ปัจจุบันในหลายประเทศทั่วโลกมีอัตราการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสัญญาณที่บ่งบอกว่าแต่ละประเทศต่างหันมาให้ความสนใจที่จะพัฒนาเทคโนโลยีและฐานเศรษฐกิจที่จำเป็นต่อการยกระดับความเป็นอยู่ของมนุษยชาติให้เจริญยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็น การศึกษา การแพทย์ การคมนาคม การขนส่งสินค้าและบริการ อุตสาหกรรมการผลิต และอื่น ๆ รวมไปถึงการบริหารและรักษา

ความมั่นคงของประเทศนั้นเอง (Nowakowski, Olczykowski, and Wojciechowski, 2017) จึงไม่อาจปฏิเสธได้ว่ายุคนี้ไฟฟ้าเข้ามามีบทบาทสำคัญและกลายเป็นสิ่งที่ทรงอิทธิพลที่สุดต่อการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้พลังงานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันต้องเผชิญกับปัญหาการขัดข้องมาอย่างยาวนาน โดยปัญหานี้จะส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้าในหลาย ๆ มิติ เช่น คอมพิวเตอร์รีเซ็ตตัวเองขณะทำงานจนนำไปสู่การเสียข้อมูล เครือข่ายอินเตอร์เน็ตภายในองค์กรล่มไม่สามารถเชื่อมต่อได้ เกิดความมืดกระทันหันบดบังทัศนะวิสัย ไฟจราจรไม่ทำงานทำให้เกิดอุบัติเหตุทางท้องถนน ผู้คนถูกขังในพื้นที่ที่มีอากาศจำกัด เป็นต้น ทั้งนี้ผลกระทบที่กล่าวมาจะมีความรุนแรงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขอบเขตของสถานการณ์การขัดข้องและระยะเวลาที่เกิดปัญหา (Chovančíková and Hoterová, 2021) จึงนำมาซึ่งบทเรียนและการพัฒนามาตรการรับมือที่ดีขึ้น การศึกษาปัญหาการขัดข้องในระบบรถไฟฟ้าจึงเป็นกรณีศึกษาที่สะท้อนความท้าทายที่อาจจะต้องเผชิญในอนาคต แสดงดังรูปที่ 3.26 โดยในส่วนนี้จึงได้มีการกล่าวถึงสาเหตุ ผลกระทบ แผนการรับมือที่มีการใช้จริง และกรณีศึกษาของสถานการณ์ไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในปัจจุบันดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.26 ปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

(ที่มาภาพ: https://www.pptvhd36.com/news/ประเด็นร้อน/70276 และ https://www.khaosod.co.th/breaking-news/news_7626345 [เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2568])

3.5.1 สาเหตุของปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุทั้งปัจจัยภายในและภายนอกระบบ ซึ่งมักมีความซับซ้อนในการรับมือและป้องกันการเกิดของปัญหา แม้

เป็นสาเหตุเล็ก ๆ แต่ก็ล้วนสามารถลุกลามจนกลายเป็นความล้มเหลวขนาดใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อทั้งระบบได้ (Chovančíková and Dvořák, 2019; Fabella and Szymczak, 2021) โดยสาเหตุที่มักนำไปสู่ปัญหาไฟดับจะมีอยู่หลายประการ ดังต่อไปนี้

3.5.1.1 ความล้มเหลวของระบบจ่ายไฟหลัก

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนพึ่งพาโครงข่ายระบบจ่ายไฟจากแหล่งจ่ายไฟหลักภายนอก เมื่อเกิดปัญหาจะส่งผลกระทบต่อระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทั้งหมดโดยตรง ซึ่งปกติแล้วมักเกิดจากหลายสาเหตุต่าง ๆ ได้แก่ ความผิดพร่องในโครงข่ายระบบจ่ายไฟหลัก ความไม่สมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทานของการจ่ายไฟภายในโครงข่ายเดียวกัน เป็นต้น

3.5.1.2 ผลกระทบจากภัยธรรมชาติ

ภัยธรรมชาติที่รุนแรงจนยากต่อการควบคุมเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบเกิดการหยุดชะงัก โดยภัยธรรมชาติเหล่านี้จะมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น พายุ น้ำท่วม แผ่นดินไหว ฟ้าผ่า เป็นต้น

3.5.1.3 อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างระบบจ่ายไฟ

อุบัติเหตุในที่นี้อาจเกิดจากมนุษย์เป็นผู้ก่อโดยไม่เจตนา ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบจ่ายไฟจนนำไปสู่ปัญหาไฟดับ เช่น อุบัติเหตุทางรถยนต์ อุบัติเหตุรถยนต์ชนเสาไฟฟ้า ความผิดพลาดของศูนย์ควบคุม เป็นต้น

3.5.1.4 สัตว์ที่ขึ้นเกาะหรือพาดบนสายส่ง

สัตว์จำพวกนก งู หรือกระรอกที่ปีนป่ายบนเสาไฟฟ้าหรือสายส่ง อาจนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าลัดวงจรและความล้มเหลวในระบบจ่ายไฟ

3.5.1.5 สภาพแวดล้อมที่ทรหด

มลภาวะทางอากาศ ฝุ่นละออง คราบสกปรก และเกร็ดน้ำแข็งที่สะสมบนลูกถ้วยฉนวน ทำให้เกิดการกระโดดของกระแสไฟฟ้าที่นำไปสู่การลัดวงจรและไฟดับได้ โดยเฉพาะในพื้นที่อุตสาหกรรมหรือเขตเมืองที่มีมลพิษสูง

3.5.1.6 หน่วยงานที่บริการไฟฟ้าทำการตัดไฟในระบบจ่ายไฟ

การดับไฟตามแผนโดยแจ้งล่วงหน้าเพื่อซ่อมบำรุงหรือปรับปรุงระบบเป็นสาเหตุที่ทำให้หน่วยโหลดต่าง ๆ ไม่มีพลังงานไฟฟ้า แม้จะทำให้เกิดความไม่สะดวกหรือขาดความต่อเนื่องในการใช้งาน แต่เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อความปลอดภัยและเสถียรภาพของระบบจ่ายไฟระยะยาว

3.5.2 ผลกระทบของปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

สำหรับการขับเคลื่อนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าอย่างเต็มรูปแบบ เมื่อเกิดไฟดับขึ้นในระบบขณะที่ขบวนรถไฟฟ้าให้บริการรับส่งผู้โดยสารอยู่ จะส่งผลกระทบต่อการดำเนินการและผู้ใช้บริการระบบไม่มากก็น้อย โดยปัญหาที่มักพบเห็นได้บ่อยครั้งขณะที่เกิดไฟดับในระบบมีอยู่หลายประเด็น (Yuana, Gua, Liua, Zhanga, and Lv, 2012; Xu et al., 2018) ดังต่อไปนี้

3.5.2.1 การหยุดชะงักในการให้บริการระบบ

ขบวนรถไฟฟ้าหยุดชะงักบนเส้นทางให้บริการเนื่องจากไม่มีกำลังไฟฟ้ามาช่วยในการขับเคลื่อนระบบทำงานต่อไปได้ ซึ่งทำให้เกิดการล่าช้าหรืออาจจะต้องยกเลิกการให้บริการขนส่งในช่วงเวลานั้น แสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 การหยุดชะงักในการให้บริการระบบ

(ที่มาภาพ: https://hilight.kapook.com/view/134389/ [เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2568])



รูปที่ 3.28 ผู้โดยสารตกค้างบนขบวนรถไฟฟ้าหรือสถานีผู้โดยสาร

(ที่มาภาพ: https://www.sanook.com/news/7513446/ [เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2568])

3.5.2.2 ผู้โดยสารตกค้างบนขบวนรถไฟฟ้าหรือสถานีผู้โดยสาร

การหยุดทำงานอย่างกะทันหันของระบบอาจทำให้ผู้โดยสารจำนวนมากถูกขังอยู่บนขบวนรถไฟฟ้าหรือตกค้างตามสถานีต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.28 โดยเฉพาะผู้โดยสารที่มีโรคประจำตัวอาจได้รับผลกระทบขณะติดค้าง นอกจากนี้ หากรถไฟฟ้าหยุดอยู่ในอุโมงค์ใต้ดินหรือบนทางยกระดับ ก็อาจทำให้ผู้โดยสารเกิดความตื่นตระหนก ขาดอากาศหายใจ และได้รับผลกระทบร้ายแรงอื่น ๆ

3.5.2.3 ผลกระทบต่อหน้าที่การงานของผู้โดยสาร

ผู้โดยสารที่ติดอยู่บนขบวนรถไฟฟ้าอาจต้องสูญเสียโอกาสในการดำเนินภารกิจสำคัญต่าง ๆ นานเท่ากับระยะเวลาที่ระบบหยุดทำงานหรือจนกว่าจะได้รับการช่วยเหลือ

3.5.2.4 ผลกระทบต่อสุขภาพจิตของผู้โดยสาร

ระหว่างที่ระบบหยุดทำงานอาจทำให้ผู้โดยสารเกิดความเครียดสะสมหรือความวิตกกังวลได้

3.5.2.5 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสูญเสียความเชื่อมั่น

การหยุดทำงานอย่างกระทันหันของการขนส่งไม่ว่าจะในระยะเวลาที่สั้นหรือยาว มักนำไปสู่การลดถอนความเชื่อมั่นที่มีต่อระบบของผู้ใช้บริการเป็นจำนวนมาก และอาจส่งผลระยะยาวต่อการพัฒนาและการเติบโตของระบบในอนาคต

3.5.2.6 ความเสียหายต่ออุปกรณ์

การจ่ายไฟที่ไม่สม่ำเสมอและการฟื้นคืนของระบบจ่ายไฟอย่างกะทันหันอาจทำให้อุปกรณ์บางชิ้นส่วนในระบบได้รับความเสียหาย

3.5.2.7 ผลกระทบทางเศรษฐกิจและสังคม

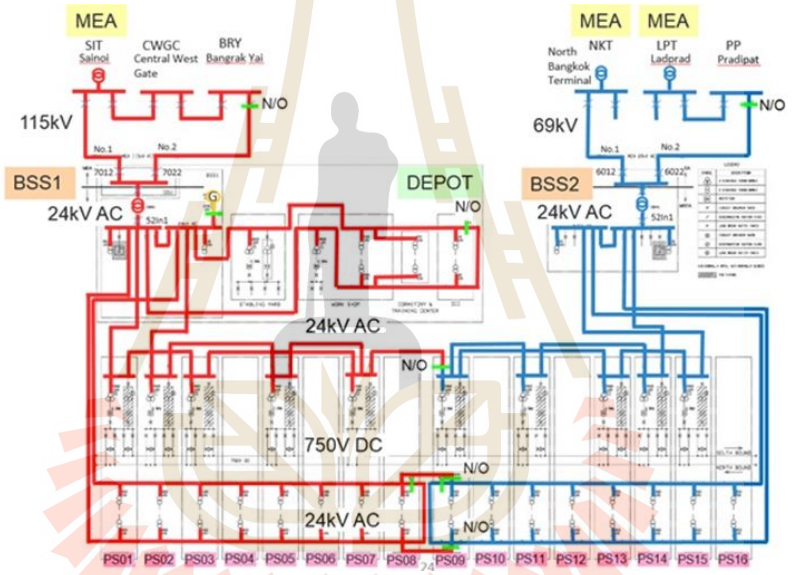
เกิดการชะลอตัวทางเศรษฐกิจในบริเวณที่การขนส่งมวลชนให้บริการอยู่เนื่องจากทำให้การคมนาคมเกิดการติดขัดไม่สามารถดำเนินการต่อได้ในช่วงที่การขนส่งหยุดทำงาน

3.5.3 มาตรการในการรับมือปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

จากปัญหาไฟดับที่เกิดขึ้นกับการขนส่งมวลชนในหลายทศวรรษที่ผ่านมา หลายองค์กรที่เกี่ยวข้องได้เล็งเห็นถึงผลกระทบของปัญหาต่อการให้บริการระบบ ความปลอดภัยของผู้โดยสาร และความเชื่อมั่นของสาธารณชน จึงได้มีการเร่งหาทางการแก้ไขและป้องกันปัญหาอย่างจริงจัง ปัจจุบันจึงมีมาตรการป้องกันปัญหาไฟฟ้าขัดข้องในการขนส่งประเภทนี้อยู่หลายแนวทาง ดังนี้

3.5.3.1 การจ่ายไฟแบบระบบคู่ขนาน

การจ่ายไฟแบบระบบคู่ขนาน (Dual Power Supply) ถือเป็นพื้นฐานการออกแบบระบบจ่ายไฟที่มีความทนทานต่อความล้มเหลว ซึ่งจะมีการรับพลังงานไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟหลักสองแหล่งที่ตั้งอยู่คนละเขตเข้าสู่วงแหวนไฟฟ้า (Ring Networks) เดียวกัน เพื่อให้มีการสับเปลี่ยนแปลงรับพลังงานไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟหลักหนึ่งไปเป็นอีกสถานีจ่ายไฟหนึ่งกรณีที่สถานีจ่ายไฟหลักเกิดความผิดพร่องขึ้น ทำให้สามารถช่วยลดความเสี่ยงจากไฟดับในการขนส่งมวลชนได้มากกว่า 70% โดยปัจจุบันมีเส้นทางการขนส่งที่ใช้มาตราการนี้เพียง 3 สาย ได้แก่ สายสีม่วง สายสีเหลือง และสายสีชมพูเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 3.29 (กรมการขนส่งทางราง, 2563)



รูปที่ 3.29 การจ่ายไฟแบบระบบคู่ขนาน

(ที่มาภาพ: https://www.drt.go.th/library/ระบบการจ่ายไฟฟ้าสำหรับ-2 [เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2568])

3.5.3.2 ระบบสำรองไฟฟ้าและการจัดการพลังงานไฟฟ้าฉุกเฉิน

ระบบสำรองไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบที่สำคัญในการรับมือกับเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยเครื่องสำรองกำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง (Uninterruptible Power Supply: UPS) ที่ออกแบบอย่างเหมาะสมสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบสำคัญได้อย่างต่อเนื่องในระหว่างที่เกิดไฟฟ้าขัดข้อง เช่น ระบบอาณัติสัญญาณ ระบบควบคุมการเดินรถ ระบบสื่อสารฉุกเฉิน เป็นต้น นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการนำเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage Systems) สมัยใหม่อย่างแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนเข้ามาช่วยเพิ่ม

ประสิทธิภาพของระบบสำรองไฟฟ้า ลดพื้นที่ติดตั้ง และลดต้นทุนการบำรุงรักษาในระยะยาวอีกด้วย (ABB Switzerland Ltd., 2021)

3.5.3.3 การบำรุงรักษาเชิงป้องกันและการตรวจสอบสภาพอุปกรณ์

การบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่มีประสิทธิภาพช่วยลดความเสี่ยงจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อาจก่อให้เกิดปัญหาไฟดับได้ ซึ่งปกติในการให้บริการการขนส่งมวลชนจะต้องมีการตรวจสอบอุปกรณ์ตามกำหนดเวลา การทดสอบประสิทธิภาพของระบบป้องกัน และการเปลี่ยนชิ้นส่วนที่เสื่อมสภาพก่อนที่จะเกิดความล้มเหลว เป็นองค์ประกอบสำคัญของแผนบำรุงรักษาที่มีประสิทธิภาพ (Lin et al., 2020)

3.5.3.4 การป้องกันผลกระทบจากสภาพแวดล้อมและการรบกวนภายนอก

ปัจจัยภายนอกเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาไฟดับในการขนส่งประเภทนี้ ซึ่งเกิดได้จากการรบกวนของสัตว์หรือภัยธรรมชาติเป็นหลัก เช่น สัตว์ฟันแทะกัดสาย การพาดบนสายส่งของสัตว์เลื่อนคลาน ฟ้าผ่า น้ำท่วม เป็นต้น ดังนั้น มาตรการป้องกันที่พบเห็นได้บ่อยจึงทำการปิดผนึกช่องว่างในตู้อุปกรณ์อย่างมิดชิด ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน การออกแบบระบบสายส่งที่เหมาะสม การเสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง และการออกแบบระบบระบายน้ำที่มีประสิทธิภาพ (Andrusca, Adam, Dragomir, and Lunca, 2021)

3.5.3.5 การฝึกอบรมด้านความปลอดภัยเพื่อพัฒนาบุคลากร

การรับมือกับปัญหาไฟฟ้าขัดข้องที่อาจจะเกิดขึ้นในการขนส่งมวลชน ต้องอาศัยความพร้อมด้านระบบและบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถที่เหมาะสมเป็นกุญแจสำคัญ การฝึกอบรมด้านความปลอดภัยทางไฟฟ้า การบำรุงรักษาอุปกรณ์ และการตอบสนองต่อเหตุฉุกเฉินช่วยให้พนักงานสามารถปฏิบัติงานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพเมื่อเกิดเหตุการณ์จริงขึ้น การเตรียมความพร้อมเหล่านี้ควรครอบคลุมทั้งการซ้อมบนโต๊ะ การซ้อมเสมือนจริง และการซ้อมเต็มรูปแบบที่มีการอพยพผู้โดยสารและการใช้อุปกรณ์ฉุกเฉินจริง (Bai and Chen, 2024)

3.5.3.6 เทคโนโลยีสำหรับระบบเฝ้าระวังและการจัดการเหตุการณ์ไฟดับ

ระบบเฝ้าระวังและการจัดการเหตุการณ์ที่มีประสิทธิภาพช่วยให้สามารถตรวจจับและตอบสนองต่อความผิดปกติได้อย่างรวดเร็ว โดยระบบที่ทันสมัยสามารถแจ้งเตือนเมื่อตรวจพบความผิดปกติ จัดการเหตุการณ์ตามข้อมูลในคู่มือ และให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาแก่เจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องที่สุด รวมถึงช่วยลดผลกระทบต่อการให้บริการเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน (Andrusca, Adam, Dragomir, and Lunca, 2021)

3.5.3.7 กรณีศึกษาการเกิดไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย

จากการสืบค้นสถิติข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหาไฟดับที่เกิดขึ้นในการขนส่งมวลชนในประเทศไทยในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (ตั้งแต่ปี 2564-ปัจจุบัน) สามารถสรุปเป็นตารางยอดสถิติการเกิดปัญหาไฟดับของการขนส่งมวลชนในแต่ละปี และยอดสถิติการเกิดปัญหาไฟดับของการขนส่งมวลชนรายสายของรถไฟฟ้า (กรมการขนส่งทางราง, 2568; คมชัดลึกออนไลน์, 2568) ดังนี้

ตารางที่ 3.4 ยอดสถิติการเกิดปัญหาไฟดับของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในแต่ละปี

ปี (พ.ศ.)	จำนวนครั้ง	เหตุการณ์สำคัญ
2564	9	- ระบบจ่ายไฟขัดข้อง - อุปกรณ์ของรางจ่ายไฟขัดข้อง - อื่น ๆ
2565	3	- ระบบจ่ายไฟขัดข้อง - อุปกรณ์ของรางจ่ายไฟขัดข้อง
2566	6	- ระบบจ่ายไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง - ระบบจ่ายไฟขัดข้อง
2567	3	- ระบบจ่ายไฟขัดข้อง
2568	1	- อุปกรณ์ของรางจ่ายไฟขัดข้อง

ตารางที่ 3.5 ยอดสถิติการเกิดปัญหาไฟดับของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรายสายของรถไฟฟ้า

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	จำนวนครั้ง (ครั้ง/ปี พ.ศ.)				
	2564	2565	2566	2567	2568
รถไฟฟาบีทีเอส สายสีลม (สายสีเขียวอ่อน)	0	0	0	0	0
รถไฟฟาบีทีเอส สายสุขุมวิท (สายสีเขียวเข้ม)	0	0	0	2	0
รถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล (สายสีน้ำเงิน)	0	0	1	0	0
รถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วง)	0	1	0	0	0
รถไฟฟ้าสายสีทอง	9	1	2	0	0
รถไฟฟ้ามหานคร (สายสีเหลือง)	0	1	1	1	0
รถไฟฟ้ามหานคร (สายสีชมพู)	0	0	2	0	1

ผลการศึกษาข้อมูลสถิติการเกิดปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนประเทศทั้งแบบรายปีและรายสายของรถไฟฟ้า แม้ข้อมูลนี้อาจไม่ครอบคลุมเหตุการณ์ทั้งหมดเนื่องจากหน่วยงานมิได้เปิดเผยข้อมูลทั้งหมดต่อสาธารณะก็ตาม เผยให้เห็นว่าแม้จะมีการพัฒนาและนำมาตรการป้องกันไฟดับมาใช้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายต่าง ๆ แต่สถานการณ์การหยุดการทำงานของระบบจากปัญหาไฟดับก็ยังคงเกิดขึ้นในลักษณะที่คล้ายคลึงกับในอดีต ซึ่งบ่งชี้ถึงความซับซ้อนของปัญหาที่อาจมีสาเหตุจากปัจจัยอื่นนอกเหนือจากมาตรการที่ได้ดำเนินการไปแล้ว

3.6 ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

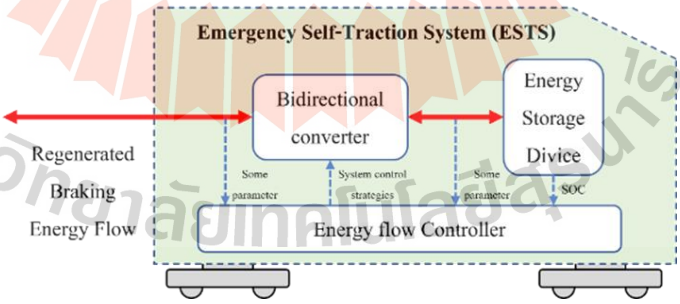
จากเหตุการณ์ไฟดับที่ทำให้การทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนต้องหยุดชะงักลงและไม่สามารถให้บริการรับส่งผู้โดยสารต่อไปได้นั้น มีปัจจัยสิ่งเร้าทั้งภายในและภายนอกหลายส่วนที่ส่งผลกระทบต่อการจ่ายไฟของสถานีไฟฟ้าโดยตรง เช่น ภัยธรรมชาติและอุบัติเหตุ เหตุขัดข้องทางด้านเทคนิคของผลิตไฟฟ้า การส่งจ่ายไฟที่มากเกินไป ระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดชำรุดหรือลัดวงจร สภาพแวดล้อมในขณะนั้น เป็นต้น โดยปัจจัยเหล่านี้มักเกิดขึ้นแบบเหตุสุดวิสัยที่ไม่สามารถทราบได้เลยว่าจะเกิดขึ้นเมื่อไหร่และนานแค่ไหน จึงยากแก่การคาดการณ์และป้องกันไม่ให้เกิดขึ้นได้แบบร้อยเปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีวิธีการหรือมาตรการที่ถูกคิดค้นขึ้นมาสำหรับป้องกันการเกิดไฟดับในระบบต่าง ๆ ที่ใช้ไฟฟ้าแล้วก็ตาม ดังนั้นในระบบทั่วไปจะมีการติดตั้งอุปกรณ์สำรองไฟฟ้า (Uninterruptible Power Supply: UPS) ที่ช่วยในการจ่ายไฟให้กับระบบกรณีที่เกิดไฟดับนั้นเอง ซึ่งในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเองก็นำระบบที่มีลักษณะการทำงานที่คล้ายกันมาติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าเช่นกัน เรียกว่า ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน (Emergency self-traction system: ESTS) เพื่อนำส่งผู้ใช้บริการไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดอย่างปลอดภัยในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ไฟดับระหว่างการให้บริการของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยระบบจะทำงานเป็นอิสระจากระบบจ่ายไฟหลักผ่านการใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานภายในขบวนรถไฟฟ้า เพื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยความเร็วจำกัดไปยังจุดหมายปลายทางที่ปลอดภัย

ในยุคที่วิทยาการของระบบกักเก็บพลังงาน (Energy storage systems: ESS) และการเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับที่ได้จากการเบรก (Regenerative braking) มีความก้าวหน้าถึงขั้นสามารถนำมาติดตั้งใช้งานจริงบนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Chalkhure, Jijankar, Dhore, Sanganwar, and Parihar, 2017) ส่งผลให้ ESTS เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาต่อยอดสำหรับนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ไฟดับขึ้น โดยพื้นฐาน

การทำงานและโครงสร้างของระบบนี้จะยังคงความเป็นระบบกักเก็บพลังงานไว้ตามเทคโนโลยีที่เลือกใช้ภายในโครงสร้าง ดังนั้น การทำงานทั่วไปของ ESTS จะสามารถปรับปรุงเสถียรภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า ลดการใช้ไฟด้วยการเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรก และยกระดับความน่าเชื่อถือของระบบได้เช่นเดียวกัน (Alfieri, Iannuzzi, Mottola, Pagano, and Roscia, 2018)

3.6.1 องค์ประกอบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

จากการประยุกต์ใช้ ESTS ในเชิงการศึกษาวิจัยและการนำไปติดตั้งใช้งานจริงบนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน พบว่าระบบนี้จะต้องอาศัยองค์ประกอบหลักในการดำเนินงานอยู่ทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (Energy storage device) วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้า (Power electronic converters) และส่วนควบคุมระบบ (Controller) แสดงดังรูปที่ 3.30 (Wang, Ge, and Li, 2014) ซึ่งทั้งสามส่วนนี้จะทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานจากแหล่งกำเนิดภายนอก เช่น ไฟฟ้าเคมี กล ความร้อน แม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าและส่งไปจัดเก็บไว้ที่อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน ในขณะที่มีการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ และตรวจสอบทิศทางการทำงานของระบบให้มีรูปแบบสอดคล้องกับความต้องการ เพื่อรอคำสั่งเรียกใช้ไฟฟ้าจากระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในยามที่เกิดสถานการณ์ไฟดับหรือกรณีอื่น ๆ ที่ต้องการใช้งานระบบในลักษณะเดียวกันกับการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานทั่วไป (Yuana, Gua, Liua, Zhanga, and Lv, 2012; Mohammadi Pirouz and Hajizadeh, 2020; Khemkladmuk and Kulworawanichpong, 2021) โดยองค์ประกอบของ ESTS มีหน้าที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.30 องค์ประกอบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

3.6.1.1 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานถือเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญมากที่สุดส่วนหนึ่งในการทำงานของ ESTS โดยอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่นำมาใช้งานต้องมีคุณสมบัติหลักอยู่ทั้งหมด

2 ประการที่เกื้อหนุนการขับเคลื่อนระบบ ได้แก่ การกักเก็บพลังงานได้มาก (High Energy Density) เพื่อให้ระบบสามารถขับเคลื่อนด้วยพลังงานสำรองได้ระยะทางไกล และการจ่ายพลังงานที่รวดเร็ว (High Power Density) เพื่อให้ระบบสามารถเร่งความเร็วในระยะเวลาอันสั้น นอกจากนี้ก็จะเป็นคุณสมบัติอื่น ๆ รองลงมาที่ผู้ใช้งานล้วนอยากได้ เช่น การชาร์จได้เร็ว (Fast Charging) อายุการใช้งานที่ยาวนาน (Long Lifetime) ราคาต้นทุนและค่าซ่อมบำรุงที่ต่ำ (Low Price and Low Maintenance) ประสิทธิภาพในการทำงานที่สูง (High Efficiency) เป็นต้น ซึ่งหากกล่าวถึงอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ตอบโจทย์กับคุณสมบัติดังข้างต้นได้เป็นอย่างดี แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดคือตัวเลือกที่มักถูกหยิบยกนำมาใช้งานจริงใน ESTS นอกจากนี้ในปัจจุบันมียังมีการพัฒนาเทคโนโลยีอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแบบผสมที่ติดตั้งแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดไว้เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ชุดเดียวกัน เพื่ออาศัยจุดเด่นของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแต่ละอุปกรณ์ในการปรับปรุงการทำงานของระบบให้ดียิ่งขึ้น (Nagaura, Oishi, Shimada, and Kaneko, 2017) อย่างไรก็ตามในการเพิ่มความสามารถของระบบในลักษณะนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง-ซ่อมบำรุงรักษา ความซับซ้อนในการสั่งใช้งานระบบ น้ำหนักระบบที่เพิ่มขึ้น ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ เป็นต้น การเลือกใช้งานอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่จะนำมาติดตั้งใน ESTS จึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและคุณสมบัติที่สอดคล้องกับการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่นำมาติดตั้ง

ดังที่ทราบกันดีว่าแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเก่าแก่ที่ใช้หลักปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแบบย้อนเป็นกลไกให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับระหว่างแอโนด (Anode) และแคโทด (Cathode) ที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) จนเกิดเป็นพลังงานไฟฟ้าขึ้น สำหรับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานรูปแบบนี้ถือว่าเป็นระบบที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนานและเป็นที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่อยู่หลายรูปแบบ ซึ่งในแต่ละรูปแบบจะมีคุณสมบัติที่เหมือนหรือแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนและองค์ประกอบของสารเคมีที่นำมาใช้ผลิตแบตเตอรี่ (Miao, Hynan, Jouanne, and Yokochi, 2019) ดังนั้นเมื่อจำแนกแบตเตอรี่ที่นิยมถูกนำมางานในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย 4 ประเภท ได้แก่

(1) แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-Acid) เป็นเทคโนโลยีที่เก่าแก่ที่สุดในบรรดาแบตเตอรี่ทุกประเภท ซึ่งอาศัยการจุ่มสารตะกั่วบริสุทธิ์ (Pb) ที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) ที่เกิดจากการผสมสารตะกั่วบริสุทธิ์ (Pb) กับสารตะกั่วเปอร์ออกไซด์ (PbO_2) ลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่ทำจากกรดซัลฟิวริก โดยแบตเตอรี่ชนิดนี้มักถูก

นำมาใช้งานสตาร์ทรถยนต์สันดาปเสียส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุสูงที่ทำให้กระแสไหลได้มาก อีกทั้งยังเป็นแบตเตอรี่ที่มีต้นทุนต่ำและผลิตได้ง่ายอีกด้วย

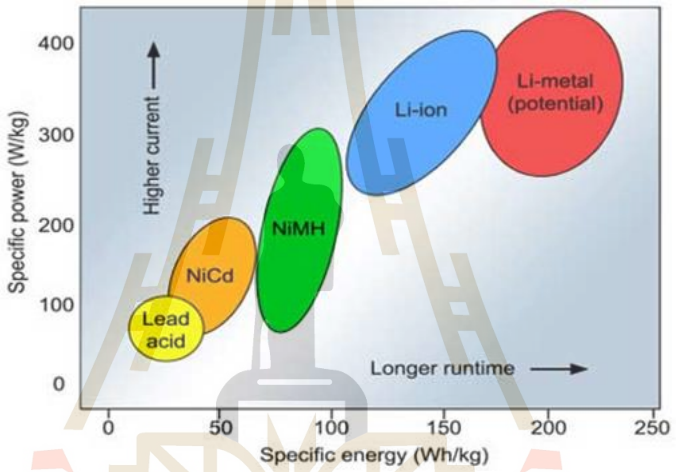
(2) แบตเตอรี่นิกเกิล (Nickel-Based) จะมีการใช้นิกเกิล (Ni) เป็นขั้วแคโทดและขั้วแอโนดจะใช้วัสดุที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติที่ผู้ใช้งานต้องการจุ่มลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ทำจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้อยู่ 3 ประเภท ได้แก่ นิกเกิล-แคดเมียม (Ni-Cd) นิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH) และนิกเกิล-สังกะสี (Ni-Zn) ในงานขนาดเล็ก ๆ ไปจนถึงขนาดใหญ่อย่างแบตเตอรี่สำรองไฟ (Stationary battery) ที่จุได้หลายเมกะวัตต์

(3) แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Lithium ion) เป็นเทคโนโลยีแบตเตอรี่ขั้นสูงที่ใช้ลิเธียมไอออนเป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยจะมีการใช้คาร์บอนหรือแกรไฟต์ (Graphite) เป็นขั้วแอโนด และใช้วัสดุที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติที่ต้องการทำขั้วแคโทด ซึ่งมีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ ลิเธียมโคบอลต์ออกไซด์ (LCO) ลิเธียมแมงกานีสออกไซด์ (LMO) ลิเธียมนิกเกิลโคบอลต์ อลูมิเนียมออกไซด์ (NCA) ลิเธียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (NMC) ลิเธียมเหล็กฟอสเฟส (LFP) ลิเธียมไททาเนต (LTO) เป็นต้น ปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนถูกนำมาใช้งานในระบบยานยนต์ไฟฟ้า ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน และระบบอื่น ๆ มากขึ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติในการจุพลังงานและจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สูงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นที่ขนาดใกล้เคียงกัน จึงทำให้มีการพัฒนาประสิทธิภาพและนำแบตเตอรี่ชนิดนี้ไปติดตั้งแบบบนรถ (On-board installation) หรือติดตั้งแบบอยู่กับที่ (Stationary installation) ในระบบต่าง ๆ รวมไปถึงการใช้งานใน ESTS เช่นกัน

(4) แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium sulphur) ขั้นตอนการคายประจุของแบตเตอรี่ประเภทนี้จะเริ่มต้นเมื่อสารอิเล็กโทรไลท์ในรูปแบบของแข็ง (beta alumina) ยอมให้ไอออนจากโซเดียม (Na) ไหลผ่านไปรวมกับซัลเฟอร์ (S) จนเกิดปฏิกิริยากลายเป็นโซเดียมพอลิซัลไฟด์ (Na_2S_4) ในขณะเดียวกันเองอิเล็กตรอนจะไหลผ่านวงจรภายนอกทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้า 2V สำหรับการอัดประจุจะสามารถทำได้โดยการสร้างปฏิกิริยาย้อนกลับภายในแบตเตอรี่นั้นเอง แม้แบตเตอรี่ประเภทนี้มีความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า อัตราการคายประจุ และประสิทธิภาพที่สูง แต่มีอุณหภูมิระหว่างการทำงานที่สูงมาก จึงทำให้การใช้งานแบตเตอรี่ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ระบายอากาศสำหรับลดอุณหภูมิระหว่างการทำงานให้น้อยลงด้วย

นอกจากเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่กล่าวมาข้างต้น ในปัจจุบันยังมีการคิดค้นและพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่าแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ ที่มีการใช้งาน

เช่น แบตเตอรี่ลิเธียมเมทัล (Li-Metal) แบตเตอรี่โซลิดสเตต (Solid-state Battery) แบตเตอรี่ซิงค์-แอร์ (Zinc-Air Battery) แบตเตอรี่ลิเธียม-แอร์ (Li-Air Battery) แบตเตอรี่รีดอกซ์โฟลว์ (Redox Flow Battery) เป็นต้น อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่เหล่านี้ยังอยู่ในสถานะที่กำลังพัฒนาปรับปรุงและยังไม่สามารถการันตีได้ว่าเป็นแบตเตอรี่ชนิดที่เหมาะสมกับการใช้งานใน ESTS จึงไม่ได้มีการหยิบยกมากล่าวถึงในการศึกษาในส่วนนี้ สำหรับแบตเตอรี่ที่ยกตัวอย่างมาในข้อ (1) - (4) สามารถสรุปการเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของแบตเตอรี่แต่ละประเภท แสดงดังรูปที่ 3.31 และตารางที่ 3.6 (Ghaviha, Campillo, Bohlin, and Dahlquist, 2016)



รูปที่ 3.31 ความสามารถในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละประเภท
(ที่มาภาพ: https://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=43172.php [เข้าถึงเมื่อ 22 พฤษภาคม 2568])

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของแบตเตอรี่แต่ละประเภท

No.	PARAMETER	BATTERY ENERGY STORAGE DEVICES TECNOLOGY			
		Lead-acid	Nickel-Based	Lithium ion	Sodium Sulphur
1	Specific Energy (Wh/kg)	20-50	60-80	75-200	120-240
2	Specific Power (W/kg)	25-300	200-250	100-350	120-230
3	Efficiency (%)	70-90	65-70	90-100	70-90
4	Discharge Time (Second)	1-3,600	1-3,600	1-3,600	1-3,600

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของแบตเตอรี่แต่ละประเภท (ต่อ)

No.	PARAMETER	BATTERY ENERGY STORAGE DEVICES TECNOLOGY			
		Lead-acid	Nickel-Based	Lithium ion	Sodium Sulphur
5	Cycle Life (Cycle)	200-2,000	1,500-3,000	1,000-1,0000	2,000-3,000
6	Self-discharge (%/day/Wh)	0.5-3	1-2	1-3	20
7	Environmental Impact	High	Moderate	Low	Low

จากตารางที่ 3.6 เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกักเก็บพลังของแบตเตอรี่ทั้ง 4 ประเภทข้างต้น พบว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนมีความสามารถและประสิทธิภาพในการทำงานอยู่ในเกณฑ์ที่ดีกว่าแบตเตอรี่ประเภทอื่น ทั้งในส่วนของค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (specific energy) ที่บ่งบอกถึงความสามารถในการจุพลังงานไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่ กำลังไฟฟ้าจำเพาะ (specific power) ที่บ่งบอกถึงความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลด และรอบอายุการใช้งาน ทำให้มีการประยุกต์ใช้งานแบตเตอรี่ประเภทนี้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมากมาย

3.6.1.2 วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทาง

วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทาง (The bidirectional DC-DC power converters) เป็นส่วนหนึ่งของ ESTS ที่ทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้าที่ได้รับมาจากสายจ่ายเหนือศีรษะ รางที่สาม หรือการเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับให้อยู่ในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสำหรับเก็บเป็นพลังงานสำรองในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและแปลงไฟฟ้าที่ ESTS เรียกใช้จากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานให้มีรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับจ่ายโหลดต่าง ๆ ภายในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ซึ่งปกติแล้วการทำงานของเครือข่ายวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานต้องมีการเชื่อมต่อวงจรเชื่อมโยงทางดีซี (DC-Link) เพื่อกรองแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าให้มีความเรียบขึ้น (Chalkhure, Jijankar, Dhore, Sanganwar, and Parihar, 2017; Khodaparastan, Mohamed, and Brandauer, 2019; Rechard and Gouttefangeas, 2017) อย่างไรก็ตามปัจจัยที่บ่งบอกว่าวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและเงื่อนไขการใช้งานที่สำคัญบางประการที่ต้องพิจารณา เช่น ความเร็วในการตอบสนอง กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบรองรับ ช่วงอุณหภูมิที่ระบบสามารถคงสถานะการ

ทำงานไว้ได้ ขนาดของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่เล็กและน้ำหนักที่เบา (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานบนรถ) และความสามารถในการแปลงแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่ต้องการ ได้แก่ 600 750 1,500 หรือ 3,000 โวลต์ ก่อนเข้าวงจรเชื่อมโยงทางดีซี (Abad, 2017)

วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ชนิดแยกกราวด์ (isolated type) และชนิดไม่แยกกราวด์ (non-isolated type) โดยวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าชนิดแยกกราวด์นั้นจะมีข้อเสียและข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง เนื่องจากต้องอาศัยหม้อแปลงกัลป์วานิก (galvanic transformer) ที่มีอัตราส่วนการพันขดลวดสูง (large turn ratio) ในการแยกกราวด์ระหว่างด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำและสูง ซึ่งทำให้วงจรที่ใช้มีขนาดที่ใหญ่และหนักจากการติดตั้งหม้อแปลงในระบบ นอกจากนี้ในการทำงานของวงจรจะต้องมีการแปลงผันแรงดันไฟฟ้าจากกระแสตรงไปเป็นกระแสสลับ แล้วแปลงไฟฟ้ากระแสสลับกลับมาเป็นกระแสตรงหลังจากที่ทำการปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงอีกครั้ง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance) และตัวเก็บประจุแอบแฝง (parasitic capacitance) ที่ส่งผลให้สมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบลดลงจากการกระชาก (spike) ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในวงจรส่วนขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงอีกด้วย (Kale, 2019) ในทางกลับกันวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบไม่แยกกราวด์ปกติจะใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าที่มีอัตราการถ่ายโอนขนาดเล็ก (ปกติจะน้อยกว่า 4 ต่อ 1) และไม่ต้องมีหม้อแปลงช่วยในการทำงาน จึงทำให้ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าชนิดนี้สูงกว่าชนิดแยกกราวด์ (Abad, 2017) โดยวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีหลายรูปแบบดังต่อไปนี้

(1) วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบัค-บูสท์สองทิศทางชนิดไม่แยกกราวด์ (non-isolated buck-boost bi-directional DC-DC converter) หรือที่เรียกกันว่าวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบฮาล์ฟบริดจ์ สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรบัคสำหรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจากระบบไฟฟ้าภายนอกให้มีขนาดเหมาะก่อนเก็บไว้ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน และจะทำหน้าที่เป็นวงจรบูสท์สำหรับเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่อุปกรณ์กักเก็บพลังงานส่งออกไปยังโหลดต่าง ๆ โดยใช้สวิตช์สารกึ่งตัวนำกำลังประเภททรานซิสเตอร์สองขั้วฉนวน (Insulate Gate Bipolar Junction Transistor : IGBTs) เพียง 2 ตัว ขดลวดเหนี่ยวนำ และวงจรเชื่อมโยงทางดีซีในการทำงาน วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้านี้มีข้อดีอยู่หลายประการ ได้แก่ อุปกรณ์กักเก็บพลังงานได้รับผลกระทบจากคลื่นความถี่ที่เกิดจากการสับสวิตช์น้อยมาก การควบคุมวงจรทำได้ง่าย มีขนาดเล็กและเบากว่าวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าทั่วไป และมีประสิทธิภาพที่สูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ แต่มีข้อเสียในส่วนที่อุปกรณ์

กักเก็บพลังงานกับวงจรเชื่อมโยงทางดีซีในระบบจะไม่สามารถแยกออกจากกันได้ จึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียสวิตช์และไม่สามารถเพิ่มค่าของแรงดันไฟฟ้าระหว่างโหมดบูสท์ได้ตามต้องการ (Abad, 2017; Gorji, Sahebi, Ektesabi, and Rad, 2019)

(2) วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบัค-บูสท์สองทิศทางแบบหลายเฟส (Multiphase Buck-Boost Bi-directional DC-DC Converter) เป็นวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเพิ่มระดับพลังงานไฟฟ้าและกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น โดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มอัตราการสับสวิตช์ให้ถี่ขึ้นหรือปรับเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำมาเชื่อมต่อในวงจร แต่อาศัยการนำวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบัค-บูสท์สองทิศทางชนิดไม่แยกกราวด์มาต่อแบบขนาดกันหลายวงจรและควบคุมลำดับการสับสวิตช์ในวงจรด้วยการปรับมุมเฟสที่ 360 องศา/N โดยที่ N หมายถึงจำนวนคู่สวิตช์ที่ทำงานร่วมกัน ในการใช้งานวงจรในลักษณะนี้ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับการทำงานของ ESTS เนื่องจากมีสวิตช์สารกึ่งตัวนำหลายชุดเชื่อมต่อกันอยู่ในวงจร จึงส่งผลให้แม้มีสวิตช์คู่ใดคู่หนึ่งเกิดขัดข้องก็ยังมีสวิตช์ในส่วนอื่น ๆ ทำงานทดแทนต่อไปได้ อย่างไรก็ตามจำนวนสวิตช์ในวงจรที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้องใช้วิธีการควบคุมที่ซับซ้อนและราคาแพง เมื่อเทียบกับวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบัค-บูสท์หนึ่งเฟสทั่วไป (Abad, 2017; García, Zumel, De Castro, and Cobos, 2006)

(3) วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบัค-บูสท์สองทิศทางแบบต่อเรียง (Cascaded Buck-Boost Bi-directional DC-DC converter) เป็นการนำวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบัค-บูสท์สองทิศทางชนิดไม่แยกกราวด์ 2 ชุดมาเชื่อมเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นและลดการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าให้ต่ำลง โดยวงจรนี้ถูกนำไปใช้งานกับรถยานยนต์ไฟฟ้าในลักษณะที่เชื่อมต่อวงจรเข้ากับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและวงจรเชื่อมโยงทางดีซี (Gorji, Sahebi, Ektesabi, and Rad, 2019)

(4) วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางแบบบริดจ์คู่ขนาน (Dual Active Full-Bridge Bi-directional DC-DC Converter) เป็นวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางชนิดแยกกราวด์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างชุดสวิตช์สารกึ่งตัวนำแบบบริดจ์ 2 ชุด ซึ่งมีหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเป็นส่วนเชื่อมระหว่างวงจรบริดจ์ทั้งสอง ส่วนประกอบอื่น ๆ ในวงจรก็จะมีตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อข้างวงจรบริดจ์ทั้งสองฝั่งและตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงมีการทำงานแบบการแยกกัลวานิกจึงช่วยให้สามารถควบคุมค่าพลังงานไฟฟ้าที่จะถ่ายโอนระหว่างทั้งสองด้านของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าเมื่อพลังงานไฟฟ้าไหลผ่านวงจรเชื่อมโยงทางดีซีในทิศทางที่เข้าหาอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (โหมดอัด

ประจุให้กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน) วงจรบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะทำหน้าที่เป็นวงจรอินเวอเตอร์แปลงไฟฟ้าในระบบจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ขณะที่วงจรบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับด้านทุติยภูมิจะทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ในทางกลับกันเมื่อพลังงานไฟฟ้าไหลในทิศออกจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (โหมดการคายประจุอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน) วงจรบริดจ์ทั้งสองก็จะทำหน้าที่สลับกัน (Gorji, Sahebi, Ektesabi, and Rad, 2019; Kan, Wu, Tang, Zhang, and Zhang, 2016)

(5) วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางแบบครึ่งบริดจ์คู่ขนาน (Dual Active Half-Bridge Bi-directional DC-DC Converter) เป็นวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางแบบบริดจ์คู่ขนาน โดยนำตัวเก็บประจุมาต่อแทนที่สวิตช์สารกึ่งตัวนำ 2 ตัวในบริดจ์ที่อยู่แต่ละฝั่งของแท็ปหม้อแปลง ซึ่งทำให้จำนวนสวิตช์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในส่วนบริดจ์ของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าลดลงและมีลักษณะเป็นแบบครึ่งบริดจ์ อย่างไรก็ตามวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าประเภทนี้มักถูกนำไปประยุกต์ใช้กับระบบที่ทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำเนื่องจากการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างสองด้านของแท็ปหม้อแปลงจะทำได้น้อยเมื่อเทียบกับวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางแบบบริดจ์คู่ขนาน (Abad, 2017; Gorji, Sahebi, Ektesabi, and Rad, 2019; Park and Song, 2011)

3.6.1.3 ชุดควบคุมและจัดการระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ESTS มีองค์ประกอบทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทาง และชุดควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งแต่ละส่วนต่างมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการควบคุมและการจัดการกับพลังงานไฟฟ้าของ ESTS ที่ถูกนำไปติดตั้งบนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เนื่องจากลักษณะการทำงานของรถไฟฟ้าทุกระบบจะมีการเร่งความเร็วและการเบรกขบวนรถอยู่บ่อยครั้ง แม้สถานีจ่ายไฟภายในระบบจะทำงานปกติหรือเกิดสถานการณ์ไฟดับในระบบก็ตาม ซึ่งส่งผลให้เกิดการอัดประจุและคายประจุของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในอัตาส่วนที่สูงมาก ดังนั้นการควบคุมและจัดการพลังงานไฟฟ้าของ ESTS จึงต้องเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ และปรับปรุงให้การทำงานของระบบมีความเหมาะสมกับระบบรถไฟฟ้าที่นำไปติดตั้งให้มากที่สุด และในขณะเดียวกันก็ต้องการคำนึงถึงความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของระบบให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ด้วยเช่นกัน (González-Gil, Palacin, and Batty, 2013; Barrero, Tackoen, and Mierlo, 2008)

โดยทั่วไปการควบคุม ESTS สำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในกรณีที่เกิดปัญหาสถานการณ์ไฟดับนั้น จะสามารถแบ่งหน้าที่ในการควบคุมระบบออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมการจัดการการไหลของพลังงานไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน รถไฟฟ้า และสถานีจ่ายไฟย่อย และการควบคุมวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางที่ใช้จัดการการไหลของพลังงานไฟฟ้าทั้งขาเข้าและขาออกจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน ซึ่งในการควบคุมระบบทั้งสองส่วนนี้จะสามารถดำเนินการได้ด้วยการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทาง เพื่อให้แน่ใจว่าการควบคุมนี้จะสามารถจัดการ ESTS โดยรวมและพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Camara, Gualous, Gustin, Berthon, and Dakyo, 2010; Lin, Li, Zhao, and Yang, 2016) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

(1) การควบคุมอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน มีวัตถุประสงค์สำหรับการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน จะมุ่งเน้นไปที่การจัดการกับพลังงานไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน ไม่ว่าจะเป็น การควบคุมปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่จะนำไปจัดเก็บไว้ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน การควบคุมจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน และยังช่วยป้องกันอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากสถานการณ์ความผิดปกติต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบ โดยการควบคุมสิ่งเหล่านี้ต้องคำนึงถึงข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน รูปแบบการทำงานของระบบที่นำไปติดตั้ง และเงื่อนไขอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งปกติแล้วทางผู้ผลิตอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีการใช้งานทั่วไปตามท้องตลาด จะให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ในส่วนของข้อมูลจำเพาะ ภาพโครงสร้าง ลักษณะการทำงาน และข้อดีเท่านั้น อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ให้มาจะไม่ได้มีการลงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการเชื่อมอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเข้ากับระบบต่าง ๆ ไม่ได้มีการอธิบายวิธีการหรือเทคนิคในการควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นการใช้งานอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจึงต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ใช้งาน และการเลือกประเภทของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางที่เหมาะสม (Khodaparastan, Mohamed, and Brandauer, 2019; Battistelli, Fantauzzi, Iannuzzi, and Lauria, 2012)

(2) การควบคุมวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทาง โดยทั่วไปอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่นำมาใช้งาน ESTS ต้องมีการติดตั้งวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางสำหรับเป็นตัวกลางในการควบคุมการไหลของพลังงานไฟฟ้าภายในระบบ ซึ่งปกติแล้วอุปกรณ์กักเก็บพลังงานส่วนใหญ่จะไม่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบภายนอกได้โดยตรง ด้วยเงื่อนไขการใช้ไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีแรงดันฝั่งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและฝั่งระบบส่วนอื่น ๆ ที่มีขนาดแตกต่างกัน (Abad, 2017) ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นอีกหนึ่งระบบที่มีความผันผวนของการใช้

พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด การเลือกใช้วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบสองทิศทางจึงต้องสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว และเป็นตัวกลางที่ดีในการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานกับอุปกรณ์อื่น ๆ ให้มีขนาดที่สอดคล้องกัน โดยทั้งสองประเด็นนี้คือหัวใจหลักที่ต้องคำนึงในการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นการเลือกเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับระบบจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการควบคุมวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบสองทิศทาง เพื่อให้แน่ใจได้ว่าการทำงานของ ESTS นั้นมีเสถียรภาพ ปลอดภัย และปราศจากการรบกวนที่อาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายในส่วนต่าง ๆ ได้ (Camara, Gualous, Gustin, Berthon, and Dakyo, 2010) โดยการเลือกเทคนิคควบคุมวงจรต้องพิจารณาในส่วนของชนิดวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบสองทิศทางที่เลือกใช้และรูปแบบการนำไปใช้ ซึ่งในปัจจุบันจะมีเทคนิคพื้นฐานที่มักใช้กับการควบคุมวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้า เช่น ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (Proportional Integral Derivative Control หรือ PID Control) การควบคุมแบบสไลด์ดิง (Sliding Mode Control) การควบคุมเชิงคาดการณ์แบบจำลอง (Model Predictive Control: MPC) การควบคุมแบบฟัซซีโลจิก (Fuzzy Logic Control: FLC) การควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network :ANN) การควบคุมแบบพลวัตวิวัฒนาการ (Dynamic evolution controller) การควบคุมแบบย้อย (Backstepping control) การควบคุมแบบขอบเขต (Boundary control) เป็นต้น (Gorji, Sahebi, Ektesabi, and Rad, 2019; Camara, Gualous, Gustin, Berthon, and Dakyo, 2010; Lin, Li, Zhao, and Yang, 2016; Rashid, 2018) ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเลือกใช้เทคนิคควบคุม ESTS จึงขึ้นอยู่กับความถนัดของผู้ใช้งาน รูปแบบของระบบที่นำไปควบคุม และเงื่อนไขทางสภาพแวดล้อม ณ ขณะนั้น อย่างไรก็ตามการควบคุมระบบต่าง ๆ ในปัจจุบันมีการปรับมาใช้เป็นเทคนิคปัญญาประดิษฐ์มากขึ้น

3.6.2 ภาพรวมการทำงานของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

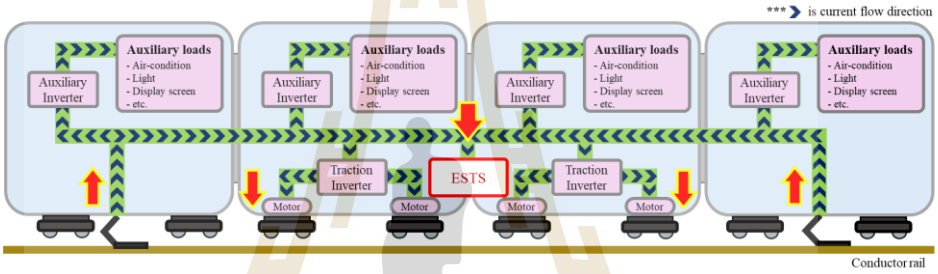
ESTS ถูกออกแบบให้สามารถรองรับการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทั้งในขณะที่ระบบจ่ายไฟในระบบมีการทำงานที่ปกติ และขณะที่ระบบจ่ายไฟมีความผิดพร่องจนเกิดสถานการณ์ไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขึ้น ซึ่งในแต่ละสถานการณ์จะมีรูปแบบการทำงานของ ESTS ที่แตกต่างกัน (Nagaura, Oishi, Shimada, and Kaneko, 2017) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.6.2.1 การทำงานขณะสถานีจ่ายไฟทำงานปกติ

ระบบจะมีการจัดสรรพลังงานไฟฟ้าที่รับมาจากแหล่งจ่ายไฟหลักหรือการเรียกพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรกในการอัดประจุให้กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน เพื่อ

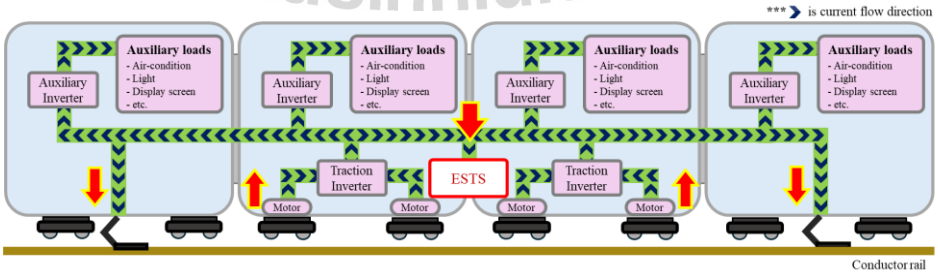
เตรียมพร้อมรับมือกับเหตุการณ์ฉุกเฉินที่อาจเกิดขึ้นหรืออาจใช้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าด้วยการจ่ายทดแทนพลังงานไฟฟ้าที่ต้องรับมาจากแหล่งจ่ายไฟหลักในช่วงที่ขบวนรถไฟฟ้าออกตัวจากสถานี โดยหลักการทำงานของ ESTS จะมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

(1) ESTS ทำการรับพลังงานไฟฟ้าผ่านทางสายจ่ายเหนือศีรษะหรือรางที่สามขณะที่ระบบจ่ายไฟหลักทำงานปกติ เพื่ออัดประจุให้กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานภายในระบบตามขนาดความจุที่ถูกออกแบบไว้ ซึ่งในบางระบบอาจมีการจำกัดการอัดประจุจากระบบจ่ายไฟหลักไว้บางส่วน ส่วนที่เหลืออาจรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรก แสดงดังรูปที่ 3.32

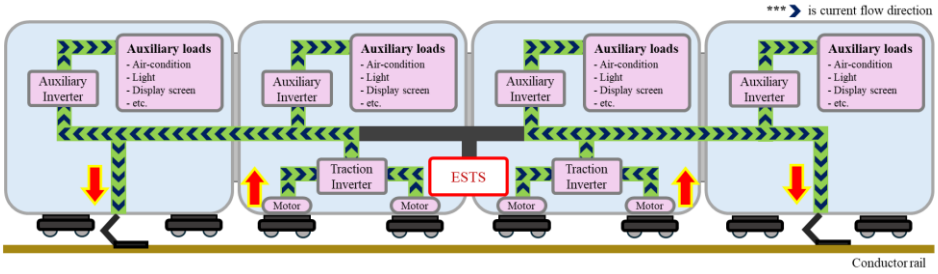


รูปที่ 3.32 การรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟหลัก

(2) ESTS ทำการรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรกขณะที่ขบวนรถไฟฟ้าเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร เพื่ออัดประจุให้กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไว้ใช้ในช่วงที่เกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินหรือจ่ายให้กับส่วนต่าง ๆ บนขบวนรถไฟฟ้าแทนการรับพลังงานไฟฟ้ามาจากสถานีจ่ายไฟหลัก แสดงดังรูปที่ 3.33 แต่หากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเต็มก็อาจมีการส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินนี้ไปให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ ผ่านสายจ่ายเหนือศีรษะหรือรางที่สาม แสดงดังรูปที่ 3.34

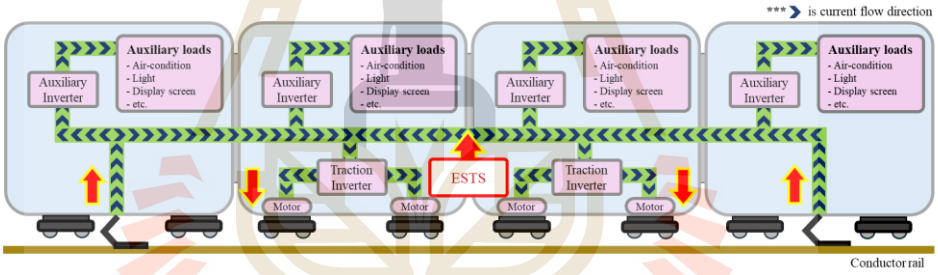


รูปที่ 3.33 การรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรก

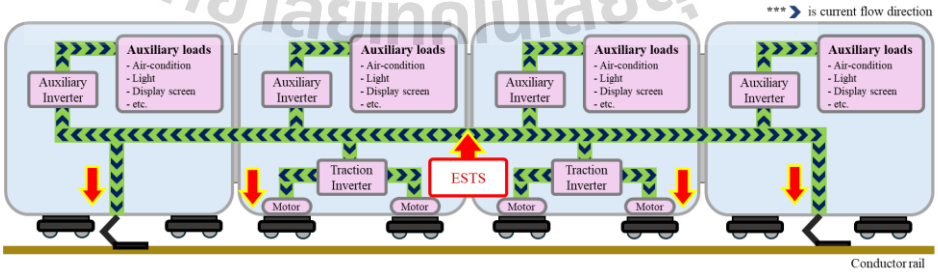


รูปที่ 3.34 การส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ

(3) ESTS ทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานให้กับระบบขับเคลื่อนของขบวนรถไฟฟ้าร่วมกับระบบจ่ายไฟหลัก แสดงดังรูปที่ 3.35 โดยบางระบบอาจมีการส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนนี้ไปยังรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ ผ่านสายจ่ายเหนือศีรษะหรือรางที่สาม เพื่อลดการรับพลังงานไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟหลัก แสดงดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.35 การขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าด้วยพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและระบบจ่ายไฟหลัก

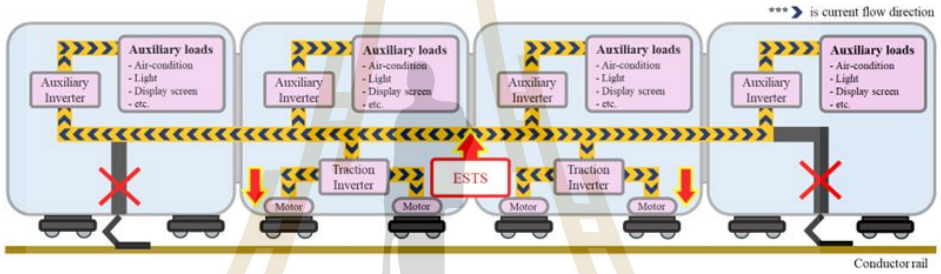


รูปที่ 3.36 การส่งพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานให้กับส่วนอื่น ๆ ของระบบ

3.6.2.2 การทำงานขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับ

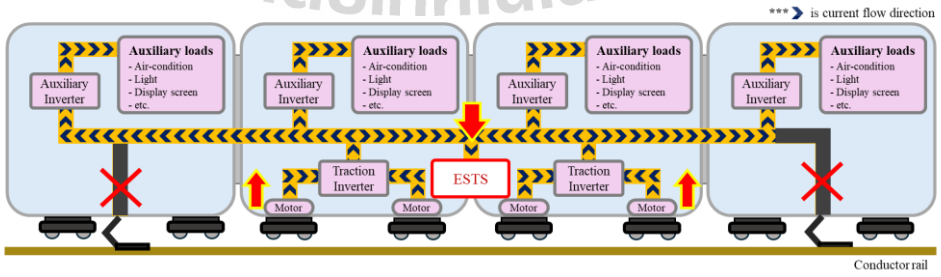
ระบบจะมีการดึงพลังงานไฟฟ้าที่ประจุไว้ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานมาใช้ขับเคลื่อนระบบ เพื่อให้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสามารถดำเนินการให้บริการต่อไปได้ในขณะที่เกิดสถานการณ์ไฟดับขึ้น หลักการทำงานของ ESTS จะมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

(1) ESTS จะทำการดึงเอาพลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บไว้มาใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าในกรณีที่ระบบสถานีจ่ายไฟเกิดขัดข้องและไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายจ่ายเหนือศีรษะหรือรางที่สามได้ เพื่อให้ขบวนรถไฟฟ้าสามารถวิ่งอพยพผู้โดยสารไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดด้วยความเร็วต่ำ แสดงดังรูปที่ 3.37

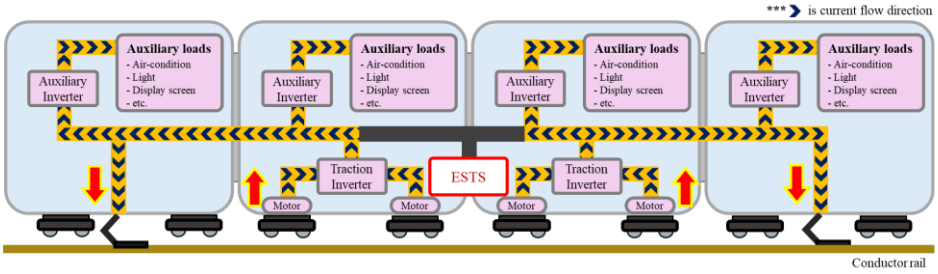


รูปที่ 3.37 การดึงพลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บไว้มาใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าขณะระบบจ่ายไฟขัดข้อง

(2) ESTS จะทำการรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรกของขบวนรถไฟฟ้า เพื่อช่วยในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าให้กับ ESTS ในอีกทางหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 3.38 อย่างไรก็ตาม หากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานภายในระบบเต็มก็อาจมีการจ่ายไปให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่นผ่านสายจ่ายเหนือศีรษะหรือรางที่สาม แสดงดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.38 การรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรกในกรณีที่ระบบจ่ายไฟหลักขัดข้อง



รูปที่ 3.39 การส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกไปยังรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ กรณีระบบจ่ายไฟหลักเกิดขัดข้อง

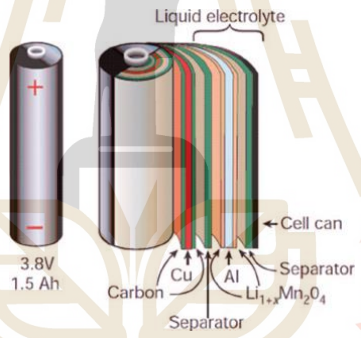
3.7 แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Lithium-ion battery หรือ Li-ion battery) เป็นแบตเตอรี่ที่พัฒนาขึ้นจากสารประกอบลิเธียม ซึ่งเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา สามารถผลิตศักย์ไฟฟ้าได้สูง และมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารประกอบต่าง ๆ ได้ดี เมื่อนำโลหะชนิดนี้มาประกอบเป็นแบตเตอรี่จึงทำให้ได้แบตเตอรี่ที่มีคุณสมบัติเก็บพลังงานไฟฟ้าได้สูงและสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันจึงมีการนำแบตเตอรี่ประเภทนี้มาใช้กับงานต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้า หุ่นยนต์ แบตเตอรี่สำรอง (Power Bank) เป็นต้น (Miao, Hynan, Jouanne, and Yokochi, 2019) เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟหลักหรือสำรองให้กับอุปกรณ์ที่หลากหลายประเภท โดยการใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนจะช่วยให้สามารถจำกัดขนาดของอุปกรณ์ที่เคยมีขนาดใหญ่ เทอะทะไม่สะดวกในการใช้งานนอกสถานที่กลับมีขนาดเล็กลงได้ นอกจากนี้ยังมีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาระบบขนาดใหญ่ที่ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ เช่น ยานยนต์ไฟฟ้า ดาวเทียม ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เป็นต้น ได้อีกด้วย (Nagaura, Oishi, Shimada, and Kaneko, 2017)

3.7.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

จากรูปที่ 3.40 แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนประกอบด้วยองค์ประกอบหลักจำนวน 5 ส่วน ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อกลไกการทำงาน สมรรถนะ และความปลอดภัยของเซลล์แบตเตอรี่ (Song, Lu, Ji, and Zhang, 2012) ได้แก่ ขั้วบวก ขั้วลบ อิเล็กโทรไลต์ แผ่นกั้นแยก และตัวสะสมกระแส โดยขั้วบวก (positive electrode) หรือขั้วแคโทด (cathode) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บลิเธียมไอออนและมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าและความจุของแบตเตอรี่ มักใช้สารประกอบจำพวกลิเธียมหรือเกลือของลิเธียม เช่น $LiCoO_2$ (LCO) $LiMn_2O_4$ (LMO) $LiMnNiCoO_2$ (NMC) $LiFePO_4$ (LFP) เป็นต้น ส่วน

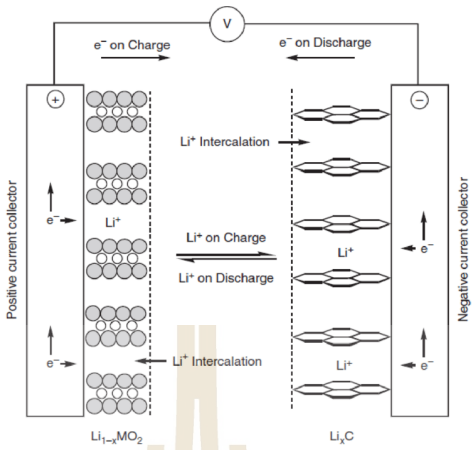
ขั้วลบ (negative electrode) หรือแอโนด (anode) ทำหน้าที่รับและปล่อยลิเธียมไอออนในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้สารประเภทคาร์บอนหรือแกรไฟต์เป็นหลัก เนื่องจากมีเสถียรภาพและเหมาะสมต่อการแทรกตัวของไอออน อิเล็กโตรไลต์ (electrolyte) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำพาไอออนของ Li^+ แต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ขณะที่แผ่นกั้นแยก (separator) มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ขั้วบวกและขั้วลบสัมผัสกันโดยตรง อันเป็นการลดความเสี่ยงของการลัดวงจรภายในเซลล์ ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) หรือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นต้น สำหรับตัวสะสมกระแส (current collector) ทำหน้าที่ลำเลียงอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุขั้วไฟฟ้ากับวงจรภายนอกอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ส่วนมากตัวรับกระแสจะทำมาจากอลูมิเนียม (Al) และทองแดง (Cu) ดังนั้นองค์ประกอบทั้ง 5 ส่วนจึงต้องได้รับการออกแบบให้เหมาะสมและสอดประสานกัน เพื่อให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพสูง มีความปลอดภัย และรองรับการใช้งานได้อย่างมีเสถียรภาพในระยะยาว



รูปที่ 3.40 ส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน
(ที่มาภาพ: Song, Lu, Ji, and Zhang, 2012)

3.7.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

ปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดไฟฟ้าในแบตเตอรี่ชนิดนี้เกิดจากการแพร่ของ Li^+ จากขั้วไฟฟ้าที่มีพลังงานศักย์ทางเคมีสูงไปยังขั้วไฟฟ้าที่มีพลังงานศักย์ต่ำกว่า แต่การแพร่ของสารนั้นจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อประจุรวมของสารที่แพร่ทั้งหมด (ไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน) มีค่าเป็นกลาง เนื่องจากอิเล็กโตรไลต์ไม่สามารถเป็นสื่อนำอิเล็กตรอนได้ การแพร่ของ Li^+ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีวงจรภายนอกหรือมีโลหะตัวนำมาเชื่อมต่อให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่าน ก่อให้เกิดไฟฟ้าที่เราสามารถนำไปใช้ได้ หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Tran, DaCosta, Mevawalla, Panchal, and Fowler, 2020) แสดงดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

(ที่มาภาพ: Tran, DaCosta, Mevawalla, Panchal, and Fowler, 2020)

จากรูปที่ 3.41 เมื่อมีการอัดประจุไฟฟ้า (charge) ให้กับแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนที่ใช้งาน ไอออนจากลิเธียมจะเคลื่อนออกจากโครงสร้างฝั่งขั้วบวกไปยังแผ่นกั้นและทะลุเข้าสู่ขั้วลบจนเกิดเป็นสารประกอบของลิเธียมและคาร์บอน ซึ่งในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากขั้วบวกสู่ขั้วลบผ่านวงจรภายนอกด้วย สำหรับการคายประจุไฟฟ้า (discharge) ของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนจะเกิดปฏิกิริยาในทิศทางที่ตรงข้ามกับการอัดประจุไฟฟ้า สามารถแสดงปฏิกิริยาทางเคมีได้ดังนี้

ปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่:

$$MO_2(s) + LiC_6(s) \underset{\text{charge}}{\rightleftharpoons} LiMO_2(s) + 6C(s)$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวก:

$$MO_2(s) + Li{+}(aq) + e \underset{\text{charge}}{\rightleftharpoons} LiMO_2(s)$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ:

$$LiC_6(s) \underset{\text{charge}}{\rightleftharpoons} 6C(s) + Li{+}(aq) + e$$

3.7.3 ประเภทของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

แบตเตอรี่ชนิดนี้ถูกวางจำหน่ายออกสู่ตลาดเมื่อปี ค.ศ.1991 (Buchmann, 2017) และภายในระยะเวลาอันสั้นความต้องการของตลาดได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปจะแบ่งตาม

วัสดุที่ใช้ทำขั้วบวก ส่วนขั้วลบทำมาจากแกรไฟต์เป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน จึงเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกันด้วย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.7.3.1 แบตเตอรี่ลิเธียมโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Cobalt Oxide: LiCoO2 or LCO)

เป็นแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนประเภทที่ใช้โครงสร้างขั้วบวกคือโลหะลิเธียมโคบอลต์ออกไซด์ (LiCoO2) และขั้วลบคือแกรไฟต์ ปกติแบตเตอรี่ลิเธียมโคบอลต์ออกไซด์ 1 เซลล์จะให้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 3.7 โวลต์ สำหรับแบตเตอรี่ประเภทนี้แล้วจะมีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูง ในขณะที่กำลังไฟฟ้าจำเพาะต่ำ กล่าวคือสามารถจ่ายไฟได้นานแต่จ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงมากได้ไม่ดี ทำให้การใช้งานแบตเตอรี่ลิเธียมโคบอลต์ออกไซด์ไปอยู่ในส่วนของอุปกรณ์ขนาดเล็กที่ต้องการกำลังน้อย ๆ แต่ใช้งานได้นาน ๆ เช่นเดียวกับแบตเตอรี่ลิเธียมฟอสเฟต

3.7.3.2 แบตเตอรี่ลิเธียมแมงกานิสออกไซด์ (Lithium Manganese Oxide: $LiMn_2O_4$ or LMO)

เป็นแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนประเภทที่ใช้โครงสร้างขั้วบวกคือลิเธียมแมงกานีสออกไซด์ ($LiMn_2O_4$) และขั้วลบคือแกรไฟต์ ซึ่งจากการรวมกันขององค์ประกอบทั้งสามธาตุที่ขั้วบวกของแบตเตอรี่นี้ ทำให้เกิดโครงสร้างแบบ 3 มิติที่มีส่วนช่วยในการไหลของไอออนให้ดีขึ้น มีความต้านทานภายในแบตเตอรี่ลดลงจึงช่วยให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลสู่ภายนอกมากขึ้น และมีค่าการทนต่อความร้อนได้มากขึ้น แต่มีสิ่งที่ต้องแลกมาคือการที่แบตเตอรี่จะเก็บพลังงานไฟฟ้าได้น้อยและอายุการใช้งานที่ไม่ได้ยาวมากนัก จากการค้นพบแบตเตอรี่ประเภทนี้เมื่อปี ค.ศ.1981 ถือเป็นความสำเร็จก้าวสำคัญในวงการแบตเตอรี่แบบชาร์จเร็ว (fast charge) และจ่ายกระแสไฟฟ้าสูง (high dis-charge current) เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเธียมแมงกานิสออกไซด์สามารถที่จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ถึง 20 - 30 แอมแปร์ โดยแบตเตอรี่ประเภทนี้มักถูกนำมาใช้ในระบบต่าง ๆ เช่น เครื่องมือทางการแพทย์ ระบบส่งกำลังในยานยนต์ไฟฟ้า รถไฟฟ้า เป็นต้น

3.7.3.3 แบตเตอรี่ลิเธียมนิเคิลแมงกานิสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Nikel Manganese Cobalt Oxide: $Li(Ni,Mn,Co)O_2$ or NMC)

จากการเพิ่มนิเคิล (Ni) ที่มีความจุพลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูงเข้าไปในส่วนแคโทดของแบตเตอรี่ ทำให้แบตเตอรี่ประเภทนี้มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูงขึ้นตามไปด้วย และการเพิ่มแมงกานิสเข้าไปทำให้การทำงานของแบตเตอรี่มีความเสถียรยิ่งขึ้น ผลที่ได้คือเซลล์แบตเตอรี่ที่มีความเสถียรในการทำงานที่สูงในขณะที่มีความสามารถในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 4 โวลต์ การ

ปรับเปลี่ยนส่วนผสมระหว่าง นิเคิล แมงกานีส และโคบอลต์ ทำให้เกิดชนิดย่อยและคุณสมบัติที่แตกต่างกันและยังคงเป็นจุดขายของผู้ผลิตแต่ละราย เช่น NMC111 (ส่วนผสมเท่ากัน) NMC442 NMC622 NM811 เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเธียมนิเคิลแมงกานิสโคบอลต์ออกไซด์กำลังเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่สูง มีเสถียรภาพการทำงานที่ดี และทนต่ออุณหภูมิได้ดีมาก

3.7.3.4 แบตเตอรี่ลิเธียมฟอสเฟต (Lithium Ion Phosphate: $LiFePO_4$ or LFP)

เป็นแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนประเภทที่ใช้โครงสร้างขั้วบวกคือโลหะลิเธียมฟอสเฟต ($LiFePO_4$) และขั้วลบคือแกรไฟต์ ซึ่งปกติแบตเตอรี่ลิเธียมฟอสเฟต 1 เซลล์จะให้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 3.2V หากต้องการให้แบตเตอรี่จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 12 โวลต์ ก็เพียงนำเซลล์แบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน 4 เซลล์เท่านั้น จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้แบตเตอรี่ประเภทนี้ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์มือถือ แท็บแล็ต แล็ปท็อป กล้องดิจิทัล เป็นต้น รวมถึงการนำไปใช้แทนแบตเตอรี่ตะกั่วกรดในระบบโซล่าเซลล์ของไฟถนนอีกด้วย

3.7.3.5 แบตเตอรี่ลิเธียมนิเคิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์ (Lithium Nikel Cobalt Aluminum Oxide: $Li(Ni,Co,Al)O_2$ or NCA)

แบตเตอรี่ประเภทนี้มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับ NMC คือเก็บไฟได้มากและจ่ายไฟได้นาน แต่มีข้อเสียคือด้านความปลอดภัยยังไม่ค่อยสูงมากนัก ต้องอาศัยระบบตรวจเช็คความปลอดภัยอยู่ตลอดเวลาเมื่อนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า จนถึงตอนนี้มี Tesla เพียงเจ้าเดียวที่นำแบตเตอรี่ลิเธียมนิเคิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์มาใช้กับยานยนต์ไฟฟ้า รุ่น Model 3 และ Model S รุ่นแรก

3.7.3.6 แบตเตอรี่ลิเธียมไททาเนตออกไซด์ (Lithium Titanate Oxide: $Li_4Ti_5O_{12}$ or LTO)

เป็นแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนแอโนดจากกราไฟต์เป็นลิเธียมไททาเนต ส่วนแคโทดมีทั้งเป็นแบบ LMO และ NMC ผลคือได้แบตเตอรี่ที่ทั้งชาร์จเร็ว อายุการใช้งานนาน และมีความปลอดภัยสูง แบตลิเธียมไททาเนตถูกนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าภายในประเทศญี่ปุ่น เช่น รถยนต์ไฟฟ้า Mitsubishi i-MiEV Honda Fit EV Tosa Electric Concept Bus เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีใช้ในเครื่องมือทางการทหาร ไฟถนนโซล่าเซลล์ รถ EV สถานีชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า แหล่งจ่ายไฟสำรอง เครื่องมือสื่อสาร รวมไปถึงอุปกรณ์ทางอวกาศอีกด้วย

จากข้อมูลแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแต่ละประเภทข้างต้น พบว่าแบตเตอรี่แต่ละประเภทมีคุณสมบัติเด่น ข้อจำกัด และรูปแบบการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งในด้านความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้า ความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้า ความปลอดภัย อายุการใช้งาน และต้นทุน ดังนั้น เมื่อสรุปข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแต่ละประเภท (Kang, 2020) สามารถแสดงรายละเอียดเปรียบเทียบได้ ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแต่ละประเภท

No.	Parameter	Lithium battery technology					
		LCO	LMO	NMC	LFP	NCA	LTO
1	Nominal cell voltage (V)	3.6	3.7-3.8	3.6-3.7	3.2-3.3	3.6	2.4
2	Full charge (V)	4.2	4.2	4.2+	3.65	4.2	2.85
3	Full discharge (V)	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0	1.8
4	Specific Energy (Wh/kg)	150-200	100-150	150-220	90-120	200-260	70-80
6	Charge current rate (C)	0.7-1	0.7-1	0.7-1	1	0.7	1
7	Discharge current rate (C)	1	1	1.2	1	1	10
8	Cycle Life (Cycle)	500-1000	300-700	1000-2000	1000-2000	500	3000-7000
9	Thermal runaway (°C)	150 (higher when empty)	250 (higher when empty)	210 (higher when empty)	270 (safe at full charge)	150 (higher when empty)	One of safest Li-ion batteries
10	Efficiency (%)	90	90	85	95	-	95
11	Maintenance	Keep cool; store partially charged; prevent full charge cycles, use moderate charge, and discharge currents					
12	Security	Bad	Middle	Middle	Good	Bad	Good
13	Prices	Low	Low	Low	Low	Middle	High

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแต่ละประเภท (ต่อ)

No.	Parameter	Lithium battery technology					
		LCO	LMO	NMC	LFP	NCA	LTO
14	Applications	Mobile phones, tablets, laptops, cameras	Power tools, medical devices, railway	E-bikes, medical devices, EVs, industrial	Stationary with high currents and endurance	Medical, industrial, EV (Tesla)	UPS, EV, solar street lighting, railway
15	Comments	High energy, limited power. Market share has stabilized	High power, less capacity; safer than Li-cobalt; mixed with NMC to improve perform	High capacity and high power. Market share is increasing Also NCM, CMN, MNC, MCN	Flat discharge voltage, high power low capacity, very safe; elevated self-discharge	Highest capacity with moderate power. Like Li-cobalt	Long life, fast charge, wide temperature range and safe. Low capacity, expensive

3.7.4 การวิเคราะห์ข้อมูลแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน

เทคโนโลยีของแบตเตอรี่ที่พิจารณาเลือกใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ แบตเตอรี่ทุติยภูมิประเภทลิเธียมไอออน ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่มีหลากหลายชนิดและหลากหลายรูปแบบ การพิจารณาเลือกใช้เซลล์แบตเตอรี่ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญ เพื่อให้การเลือกใช้เซลล์แบตเตอรี่สำหรับชุดแบตเตอรี่นี้ตรงตามคุณสมบัติที่ออกแบบไว้และคุ้มค่าในการลงทุน การพิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนที่มีอยู่ในท้องตลาดสำหรับวิเคราะห์ออกแบบและนำไปทดสอบในแบบจำลองต่อในบทถัดไป

3.7.4.1 หลักการเลือกเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

เซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนสามารถสร้างพลังงานทางไฟฟ้าได้จากการออกซิเดชั่นและการรีดักชันของลิเธียม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558) ซึ่งเป็นเซลล์ที่สามารถคายประจุ (Discharge) และ ประจุพลังงาน (Charge) ได้หลายครั้ง คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้ในการพิจารณาเซลล์แบตเตอรี่ ได้แก่

1) แรงดันไฟฟ้าระบุ (Nominal voltage) หมายถึง ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้ว มีหน่วยคือ โวลต์ (V)

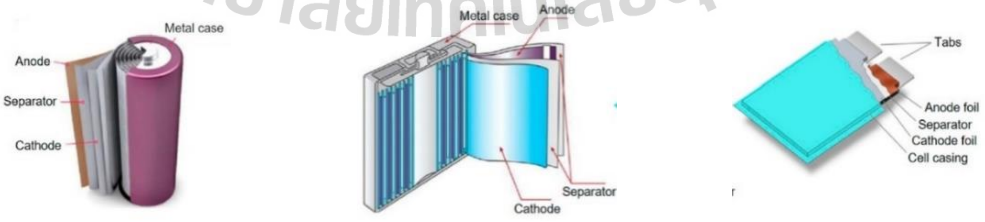
2) พลังงานจำเพาะ (Specific energy) หมายถึง ค่าพลังงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก มีหน่วย คือ วัตต์ชั่วโมง/กิโลกรัม (Wh/kg)

3) ความจุไฟฟ้าที่กำหนด (Capacity) หมายถึงความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้า ที่จำนวนชั่วโมงหนึ่งมีหน่วย คือ แอมแปร์-ชั่วโมง (Ah)

4) กระแสไฟฟ้าประจุและกระแสไฟฟ้าคายประจุ ปกติค่ากระแสไฟฟ้าทั้งสองจะแสดงเป็นจำนวนเท่าของค่าความจุไฟฟ้า (C-rate) หรือในรูป C หารด้วยตัวเลข เช่น 0.2C หรือ C/5 C เป็นต้น (ตามมาตรฐาน มอก. จะแสดงในรูปแบบ C_n โดยที่ n หมายถึง ตัวเลข) ตัวเลขที่ห้อยท้ายหมายถึงจำนวนชั่วโมงในการประจุและคายประจุที่กระแสไฟฟ้าคงที่ เมื่อขนาดของกระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับอัตราส่วนระหว่างขนาดความจุไฟฟ้าและตัวเลข มีหน่วย คือ แอมแปร์ (A)

5) ความคงทนเป็นวัฏจักร หรืออายุการใช้งาน ซึ่งแสดงเป็นจำนวนรอบของวัฏจักรการประจุและคายประจุที่เซลล์แบตเตอรี่สามารถคงทนอยู่ได้ก่อนที่ความจุไฟฟ้าที่ใช้งานจะลดลง เหลือประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ของความจุไฟฟ้าที่กำหนด มีหน่วย คือ รอบ (cycle)

นอกจากนี้ รูปทรงของเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติการทำงานของแบตเตอรี่ ซึ่งจะสามารถแบ่งออกได้ 2 รูปทรง ตามมาตรฐานมอก. 2218-2548 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558; Mun and Won, 2021) ได้แก่ ทรงกระบอก (Cylindrical cell) และทรงเหลี่ยม (เช่น เซลล์แบบกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Prismatic cell) และเซลล์แบบถุงกาแฟ (Pouch-bag cell) แสดงดังรูปที่ 3.42



(ก) ด้านข้าง (ข) ตรงกลาง (ค) ซ้อนกัน

รูปที่ 3.42 รูปทรงของเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

(ที่มาภาพ: Mun and Won, 2021)

จากการสำรวจในท้องตลาดเบื้องต้น พบว่าสำหรับเซลล์แบตเตอรี่แบบทรงกระบอกจะเป็นเซลล์ประเภท LCO NMC และ LFP เซลล์แบตเตอรี่แบบทรงถุงกาแฟจะเป็นเซลล์ประเภท LFP และ LTO และแบตเตอรี่แบบทรงกล่องสี่เหลี่ยมมักจะเป็นเซลล์ประเภท LMO LFP และ LTO โดยปกติเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแต่ละรูปทรงมีข้อได้เปรียบและข้อด้อยแตกต่างกัน โดยเซลล์แบตเตอรี่แบบทรงกระบอกและเซลล์แบตเตอรี่แบบกล่องสี่เหลี่ยมจะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ง่ายต่อการประกอบเป็นแพ็คแบตเตอรี่ ถึงแม้ลักษณะของเซลล์แบตเตอรี่แบบถุงกาแฟจะทำให้มีความสามารถในการใช้พื้นที่สำหรับการประกอบแพ็คที่ดีกว่าเซลล์รูปแบบอื่น แต่เซลล์แบตเตอรี่รูปแบบนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับยึดและประกอบเซลล์ภายในแพ็คด้วย ซึ่งมีความยุ่งยากในการออกแบบและประกอบมากกว่าเซลล์แบตเตอรี่รูปแบบอื่น สำหรับเซลล์แบตเตอรี่แบบกล่องสี่เหลี่ยมจะมีความซับซ้อนในการประกอบแพ็คค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตามแพ็คแบตเตอรี่จากเซลล์แบตเตอรี่แบบกล่องสี่เหลี่ยมรวมถึงเซลล์แบตเตอรี่แบบถุงกาแฟจะต้องมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่ซับซ้อนกว่าแพ็คแบตเตอรี่จากเซลล์แบตเตอรี่แบบทรงกระบอก (iGet Solar Cell, n.d.; A123systems, n.d.; Samsung SDI., n.d.)

3.7.4.2 ศึกษาข้อมูลของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนในท้องตลาด

จากข้อมูลในตารางที่ 3.7 ชี้ให้เห็นว่าเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนที่ถูกนำมาติดตั้งใช้งานจริงในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมี 2 ชนิด ได้แก่ LCO และ LTO โดยเฉพาะอย่างยิ่ง LTO ที่ได้กลายเป็นตัวเลือกหลักสำหรับใช้งานระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบรถไฟรางเบา เนื่องจากว่าเซลล์แบตเตอรี่ประเภทนี้มีความโดดเด่นด้านความปลอดภัยที่สูง (ไม่ติดไฟแม้เกิดการกระแทกหรือร้อนจัด) อายุการใช้งานยาวนาน (สามารถรองรับได้มากกว่า 15,000–25,000 รอบการชาร์จ-คายประจุ) ทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (-30°C ถึง +55°C) โดยไม่ต้องมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่ซับซ้อน และมีอัตราการชาร์จ-คายประจุ (C-rate) ที่สูงมากพอที่จะสามารถรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรกได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังรองรับการชาร์จเร็ว เหมาะกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเมืองที่มีการหยุด-ออกตัวของขบวนรถไฟฟ้าที่ถี่ในแต่ละสถานี เหตุผลเหล่านี้มีส่วนช่วยส่งเสริมให้มีการเลือกใช้ LTO ที่ตอบโจทย์ทั้งด้านประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และต้นทุนตลอดอายุการใช้งานได้อย่างลงตัวสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Meishner, Ünlübayir, and Sauer, 2022; Fedele, Iannuzzi, Tricoli, and Del Pizzo, 2021)

เมื่อพิจารณาในเชิงการใช้งานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จะพบว่าการเลือกใช้แบตเตอรี่ที่สามารถรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงในช่วงเวลาสั้นมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพ

ของระบบโดยรวม อีกทั้งความสามารถในการทนต่อรอบการใช้งานจำนวนมากยังช่วยลดความถี่ในการเปลี่ยนแบตเตอรี่และลดภาระค่าบำรุงรักษาในระยะยาว แม้ว่า LTO จะมีความหนาแน่นพลังงานต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนบางชนิด แต่ข้อจำกัดดังกล่าวมักไม่ใช่ประเด็นหลักสำหรับระบบรางที่ให้ความสำคัญกับความปลอดภัย ความเชื่อถือได้ และความพร้อมใช้งานของระบบมากกว่า ดังนั้น เพื่อประเมินขีดความสามารถเชิงพาณิชย์ของเทคโนโลยี LTO ในปัจจุบัน จึงได้ทำการสำรวจข้อมูลของเซลล์แบตเตอรี่ LTO จากบริษัทผู้ผลิตชั้นนำ 3 รุ่นที่มีจำหน่ายและนิยมนำมาใช้งานจริงในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (GS Yuasa Corporation, 2014; Microvast Holdings, Inc., 2025; Toshiba Corporation, n.d.) ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเธียมไททาเนตออกไซด์ยี่ห้อต่าง ๆ ในท้องตลาด

ที่	ข้อมูลจำเพาะ	แบตเตอรี่ ยี่ห้อ-รุ่น		
		GS Yuasa LIM30H	Microvast LpTO 34Ah	Toshiba SCiB™ 23Ah
1	รูปทรง	ทรงกล่องสี่เหลี่ยม	ทรงถุงกาแฟ	ทรงกล่องสี่เหลี่ยม
2	แรงดันไฟฟ้าระบุ (Nominal voltage: V)	3.6	2.3	2.3
3	ความจุไฟฟ้าที่กำหนด (Rated capacity: Ah)	30	34	23
4	ขนาด (กว้าง*ยาว*สูง) (Dimensions: mm)	170×47×133	173×45×140	116×22×107
5	น้ำหนัก (Weight: g)	2000	1000	506
6	ความหนาแน่นทางพลังงานไฟฟ้า (Volumetric energy density: Wh/L)	101.63	75	229
7	พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Weight energy density: Wh/kg)	54	100	106

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเธียมไททาเนตออกไซด์ยี่ห้อต่าง ๆ ในท้องตลาด (ต่อ)

ที่	ข้อมูลจำเพาะ	แบตเตอรี่ ยี่ห้อ-รุ่น		
		GS Yuasa LIM30H	Microvast LpTO 34Ah	Toshiba SCiB™ 23Ah
8	ราคา (Prices: USD)	≈ 180–220 USD/cell	≈150–180 USD/cell	≈ 100–130 USD/cell
9	การนำไปใช้งานจริง	JR East ACCUM Metro	Metro China, Tram China	Mireo Plus B, Shinkansen N700S, TWILIGHT EXPRESS MIZUKAZE, Tokyo Metro

ตารางที่ 3.9 การประเมินเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไททาเนตออกไซด์ยี่ห้อต่าง ๆ ในท้องตลาด

ที่	เกณฑ์การประเมินเซลล์แบตเตอรี่เบื้องต้น	แบตเตอรี่ ยี่ห้อ-รุ่น		
		GS Yuasa LIM30H	Microvast LpTO 34Ah	Toshiba SCiB™ 23Ah
1	ความหนาแน่นทางพลังงานไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ	+	+ +	+ + +
2	กระแสไฟฟ้าอัดประจุและคายประจุสูงสุด	+ + +	+ + +	+ + +
3	กระแสไฟฟ้าคายประจุแบบชั่วขณะ	+ + +	+ + +	+ +
4	ความคงทนเป็นวัฏจักร	+ + +	+ +	+ + +
6	ราคา	+ +	+ + +	+ + +
7	ความง่ายในการจัดซื้อ	+ +	+ + +	+ +

หมายเหตุ +++ หมายถึง ดีมาก ++ หมายถึง พอใช้ + หมายถึง ไม่ดี

จากการศึกษาข้อมูล LTO ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์และมีการนำไปใช้งานจริงกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในปัจจุบัน พบว่าแบตเตอรี่แต่ละรุ่นที่นำเสนอในตารางที่ 3.8 และ 3.9 ถือเป็นตัวเลือกที่ได้รับความนิยมสูงและมีสมรรถนะที่เหมาะสมกับการใช้งานในประเด็นนี้ โดย GS Yuasa LIM30H มีจุดเด่นในด้านอายุการใช้งานที่ยาวนานและรองรับกระแสไฟฟ้าคายประจุแบบชั่วขณะได้สูง จึงเหมาะสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีการตั้งสถานีผู้โดยสารที่ถี่ เพื่อรองรับพลังงานไฟฟ้าคืนกลับจากการเบรกได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ขณะที่ Microvast LpTO 34Ah มีความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าเชิงน้ำหนักสูงและรองรับกระแสไฟฟ้าคายประจุสูง จึงมีความเหมาะสมสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบรถไฟรางเบาที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่การติดตั้ง ส่วน Toshiba SCiB™ 23Ah แม้จะมีความจุไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าคายประจุชั่วขณะต่ำกว่าแบตเตอรี่อีก 2 รุ่นที่เหลือ แต่มีจุดเด่นด้านความปลอดภัยและมีความหนาแน่นพลังงานสูงสุด จึงเหมาะสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่เน้นความปลอดภัยสูงเป็นพิเศษ เช่น สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเมืองหรือรถไฟความเร็วสูง โดยสรุปแล้วแบตเตอรี่ทั้งสามรุ่นมีความเหมาะสมแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแต่ละประเภท โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23Ah สำหรับจำลองการทำงานของ ESTS ด้วยเหตุผลด้านคุณสมบัติทางเทคนิคที่มีความเหมาะสมต่อการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนได้และข้อได้เปรียบอื่น ๆ ของแบตเตอรี่ยี่ห้อนี้ ซึ่งกล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 4 และภาคผนวก ก

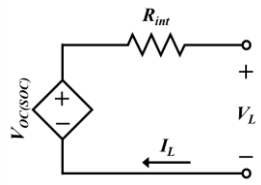
3.7.5 แบบจำลองแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน

เทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับพิจารณาแบบจำลอง ESTS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำแบบจำลองแบตเตอรี่มาอ้างอิง เพื่อประเมินการทำงานของระบบในส่วนการจัดการพลังงานไฟฟ้าและผลที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในรูปแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน โดยทั่วไปแบบจำลองแบตเตอรี่จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ (1) แบบจำลองที่สร้างจากสมการไฟฟ้าเคมี (2) แบบจำลองจากสมการทางคณิตศาสตร์ และ (3) แบบจำลองวงจรไฟฟ้า ซึ่งจากแบบจำลองทั้งสามแบบพบว่าแบบจำลองจากสมการไฟฟ้าเคมีจะมีความแม่นยำที่สูงที่สุด แต่แลกมาด้วยความซับซ้อนและเวลาในการพัฒนาที่มากขึ้นมาด้วย ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงหรืองานที่เฉพาะกรณี เช่น การออกแบบแบตเตอรี่ชนิดใหม่ เป็นต้น ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 2 และ 3 นั้นจะมีความซับซ้อนน้อยกว่า อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการนำแบบจำลองเหล่านี้มาสร้างใหม่โดยอาศัยผลการทดสอบพฤติกรรมของเซลล์แบตเตอรี่ (Empirical model) เพื่อความง่ายและแม่นยำในการจำลองผลการทำงานของแบตเตอรี่ยิ่งขึ้น ทำให้แบบจำลอง

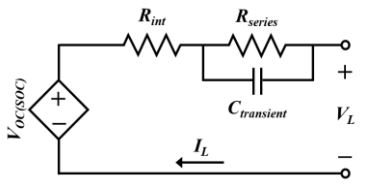
ดังกล่าวถูกนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมของแบตเตอรี่ในระดับต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง แบบจำลองนี้ยังสามารถสร้างขึ้นจากการผสมผสานกันระหว่างแบบจำลองจากสมการทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองวงจรไฟฟ้า โดยใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น จากฐานข้อมูลของโปรแกรมจำลองผลสำเร็จรูปมาประกอบกับฟังก์ชันคณิตศาสตร์ ทำให้แบบจำลองชนิดนี้มีความซับซ้อนน้อยและใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยลง นอกจากนี้ยังสามารถแก้ไขพารามิเตอร์หรือรูปแบบของวงจรได้ง่ายและยังสามารถตรวจสอบสถานะของตัวแปรได้จากรูปสัญญาณของวงจรไฟฟ้าได้ ดังนั้นแบบจำลองรูปแบบนี้จึงนิยมนำมาใช้ในกระบวนการศึกษาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบยานยนต์ไฟฟ้า การออกแบบระบบกักเก็บพลังงาน หรือระบบจัดการพลังงานของแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) ข้อจำกัดประการหนึ่งของแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากกลุ่มข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคือผลจำลองจะมีความคลาดเคลื่อนออกไปตามสถานะทำงานที่เปลี่ยนแปลงไปของระบบ และจะไม่สามารถนำไปใช้ทำนายพฤติกรรมของแบตเตอรี่ชนิดอื่นได้ ลักษณะของแบบจำลองแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ ที่มีพื้นฐานอยู่บนวงจรไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.43 โดยแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่ายอาจสร้างจากแหล่งจ่ายไฟที่ต่ออนุกรมกับความต้านทานภายในหนึ่งตัวเท่านั้น ผลที่ได้จากการจำลองอาจจะมีความคลาดเคลื่อนสำหรับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง แต่อาจเพียงพอสำหรับงานบางประเภท อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วความเที่ยงตรงของแบบจำลองมักแลกมาด้วยความซับซ้อนของแบบจำลองที่ต้องสร้างขึ้น ซึ่งสามารถนำเสนอเปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลองแต่ละแบบสำหรับศึกษาพฤติกรรมที่สำคัญของแบตเตอรี่ แสดงดังตารางที่ 3.10 และรูปที่ 3.44 - 3.46 (Okedu, 2022; เกษม อุทัยไขฟ้า และสุภนันท์ ต้นวรรณรักษ์, 2559)

ตารางที่ 3.10 การเปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลองแต่ละแบบ

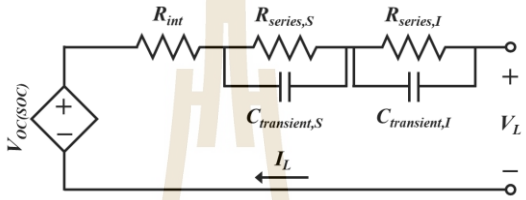
ลำดับ	แบบจำลองของแบตเตอรี่	การทำงาน
1	แบบจำลองอย่างง่าย	สามารถคำนวณได้เฉพาะแบตเตอรี่ที่มีค่าคงที่
2	แบบจำลองสมมูลเทวินิน	สามารถคำนวณสถานะการชาร์จ (State of charge: SOC)
3	แบบจำลองสมมูลเทวินินแบบปรับปรุง	สามารถคำนวณอุณหภูมิและค่าความจุของแบตเตอรี่ได้
4	แบบจำลองตามเวลา	สามารถคำนวณเวลาวัฏจักรของแบตเตอรี่ได้



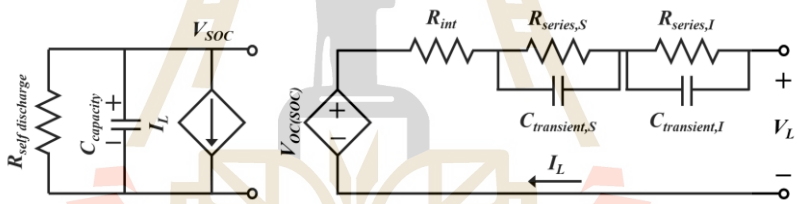
รูปที่ 3.43 แบบจำลองอย่างง่าย



รูปที่ 3.44 แบบจำลองสมมูลเทวินิน



รูปที่ 3.45 แบบจำลองสมมูลเทวินินแบบปรับปรุง



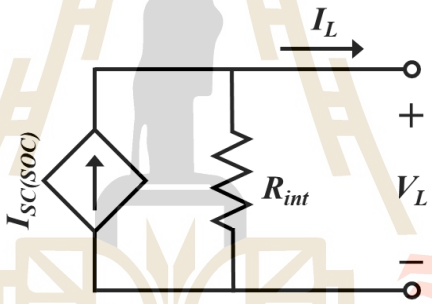
รูปที่ 3.46 แบบจำลองตามเวลา

จากวัตถุประสงค์หลักของการจำลอง ESTS คือ การศึกษาลักษณะการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบที่มีความสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าในขณะเกิดเหตุฉุกเฉินขึ้นกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเท่านั้น โดยไม่ได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ไฟฟ้าอย่างละเอียดของแบตเตอรี่ เช่น ผลกระทบด้านอุณหภูมิ เวลาวัฏจักรของแบตเตอรี่ เป็นต้น ดังนั้น เมื่อพิจารณารูปแบบแบบจำลองที่เหมาะสมดังปรากฏในรูปที่ 3.43 – 3.46 แล้ว พบว่า แบบจำลองที่เลือกใช้ในที่นี่จะเป็นแบบจำลองอย่างง่ายของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ซึ่งมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open-circuit voltage: $V_{OC(SOC)}$) ต่ออนุกรมกับความต้านทานภายใน (internal resistance: R_{int}) และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านโหลด (Load voltage: I_L) ภายในวงจรลูปเป็นองค์ประกอบหลัก จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law :KVL) จะทำให้ทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ภายใต้โหลด (Terminal under load voltage: V_L) โดยทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า

จะกำหนดสถานะการทำงานเป็น 2 กรณี ได้แก่ แบตเตอรี่จะคายประจุเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางบวก ($I_L>0$) และแบตเตอรี่จะอัดประจุเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางลบ ($I_L<0$) แสดงดังสมการที่ 3.19

$$V_L = V_{OC} - I_L R_{\text{int}} \tag{3.19}$$

โดยในที่นี่จำได้ทำการแปลงแบบจำลองอย่างง่ายที่เดิมทีถูกจัดให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลเทวินิน (Thevenin Equivalent Circuit) เป็นวงจรสมมูลนอร์ตัน (Norton Equivalent Circuit) เพื่อให้สอดคล้องกับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแสที่จะใช้ในการวิเคราะห์ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ซึ่งเมื่อจัดรูปใหม่จะได้แบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.47 แบบจำลองอย่างง่ายแบบวงจรสมมูลนอร์ตัน

จากโครงสร้างของแบบจำลองในรูปของวงจรสมมูลนอร์ตันที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าวงจรปิด (Short-circuit current: $I_{SC(SOC)}$) ต่อขนานกับความต้านทานภายใน (internal resistance: R_{int}) เมื่อพิจารณาแบบจำลองจากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law :KCL) ร่วมกับความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ภายใต้โหลด กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโหลด เป็นต้น สามารถสรุปความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในแบบจำลองจะสามารถแสดงดังสมการที่ 3.20

$$I_L = I_{sc(soc)} - \frac{V_L}{R_{int}} \tag{3.20}$$

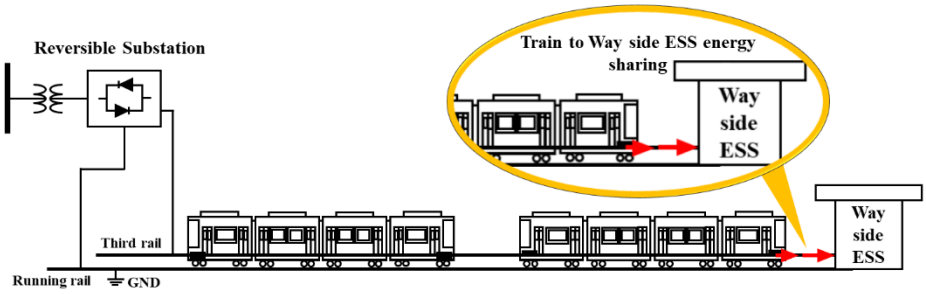
องค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและแบบจำลองอย่างง่ายในรูปวงจรสมมูลแบบนอร์ตัน เป็นกุญแจสำคัญต่อการศึกษาพฤติกรรมของ ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยเฉพาะในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแส

3.8 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า (Energy sharing) ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นเทคโนโลยีสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยการนำพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานของระบบจ่ายคืนกลับสู่โครงข่ายระบบจ่ายไฟหลักหรือกักเก็บไว้ในระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อดึงมาใช้ประโยชน์ในส่วนต่าง ๆ แทนการรับพลังงานไฟฟ้าจากโครงข่ายระบบจ่ายไฟหลัก (Kou, Fan, and Song, 2020) การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้านี้จะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟหลักได้กว่า 15–40% (Meishner and Sauer, 2019) นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในการยืดอายุการใช้งานอุปกรณ์เบรกและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอีกด้วย จึงกล่าวได้ว่าการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าถือเป็นก้าวสำคัญสู่การยกระดับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ยั่งยืนและคุ้มค่าอย่างแท้จริง สำหรับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสามารถแบ่งตามลักษณะการดำเนินการได้ 3 แบบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.8.1 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งข้างทาง

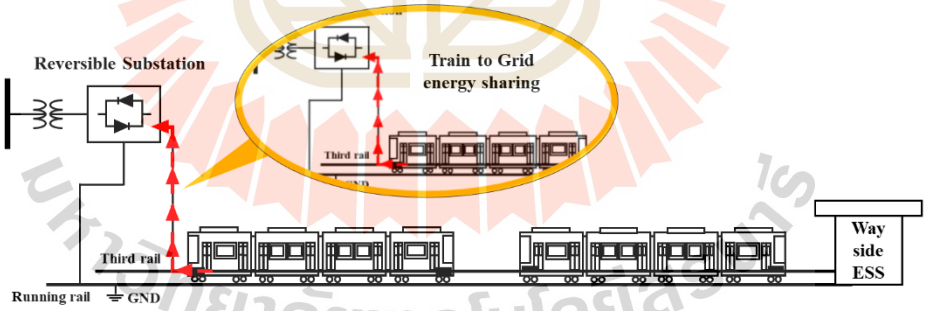
รูปแบบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานเป็นแนวคิดที่ได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยเฉพาะในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบกระแสตรงที่มีการนำพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับที่ได้จากการเบรกของขบวนรถไฟฟ้ามากักเก็บไว้ในระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งข้างทาง เช่น ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน เป็นต้น เพื่อนำมาจ่ายให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ ในระบบที่อยู่ในช่วงเร่งตัวออกจากสถานีผู้โดยสาร ซึ่งสามารถลดภาระของโครงข่ายระบบจ่ายไฟหลักที่ต้องจ่ายพลังงานไฟฟ้าตามค่าความต้องการ (peak demand) และยังลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบของความร้อนในระบบ นอกจากประโยชน์ในด้านการประหยัดพลังงานไฟฟ้าแล้ว การใช้ระบบกักเก็บพลังงานข้างทางยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของการจ่ายไฟโดยการรักษาความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าในระบบ และเพิ่มความสามารถในการรองรับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าโดยไม่จำเป็นต้องขยายขนาดของโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ ด้านไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องอีก แสดงดังรูปที่ 3.48



รูปที่ 3.48 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งข้างทาง

3.8.2 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับโครงข่ายระบบจ่ายไฟ

การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับโครงข่ายระบบจ่ายไฟหลักเป็นแนวทางที่อาศัยคุณสมบัติของสถานีไฟฟ้าสองทิศทาง (bidirectional substations) ที่พัฒนาขึ้นมาโดยเฉพาะในการนำส่งพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการกระบวนการต่าง ๆ กลับคืนสู่โครงข่ายระบบจ่ายไฟหลักผ่านรางที่สามหรือสายส่งเหนือหัว เพื่อนำไปใช้งานในส่วนอื่น ๆ ที่ไม่เพียงในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเท่านั้น ซึ่งทำให้มีการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ขณะที่ขบวนรถไฟฟ้าไม่ได้ถูกใช้งาน (Khodaparastan, Dutta, Saleh, and Mohamed; 2019) แสดงดังรูปที่ 3.49

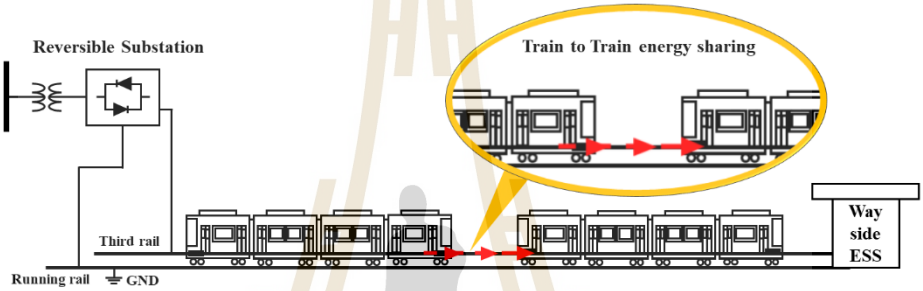


รูปที่ 3.49 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับโครงข่ายระบบจ่ายไฟ

3.8.3 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับรถไฟฟ้า

การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบนี้จะมีการส่งต่อพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าโดยตรง โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการจัดเก็บหรือต้องส่งกลับไปยังสถานีจ่ายไฟที่ตั้งอยู่ระยะไกล การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้านี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการทำงานสอดคล้องกันระหว่างการ

เบรกและการเร่งของขบวนรถไฟฟ้าต่าง ๆ ในระบบ หรือเมื่อมีขบวนรถไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ส่งและรับพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 3.50 อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่การทำงานของขบวนรถไฟฟ้าไม่สอดคล้องกันหรือไม่ลงตัว ระบบยังสามารถบูรณาการการทำงานเข้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งบนขบวนรถหรือติดตั้งข้างทาง เพื่อจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนนี้ไว้ใช้ภายหลัง ซึ่งช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพในการจัดสรรพลังงานไฟฟ้าทั้งระบบได้ดียิ่งขึ้น (Sumpavakup, Suwannakijborihan, Ratniyomchai, and Kulworawanichpong, 2018)



รูปที่ 3.50 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับรถไฟฟ้า

การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยผลักดันให้เกิดความยั่งยืนในการบริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าแต่ละรูปแบบก็จะมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับรถไฟฟ้าที่ถือเป็นรูปแบบที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่การทำงานอาจถูกจำกัดด้วยโครงสร้างของระบบไฟฟ้าและลักษณะการทำงานของขบวนรถไฟฟ้าในขณะนั้น ความสำเร็จของการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้งานขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญหลายประการ ได้แก่ ความสามารถในการตอบสนองของระบบกักเก็บพลังงาน ความแม่นยำของระบบตรวจจับและควบคุมการไหลของพลังงาน และความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ภายใต้สภาวะการใช้งาน นอกจากนี้ การออกแบบระบบจำเป็นต้องคำนึงถึงมาตรฐานความปลอดภัยและความเข้ากันได้กับโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่เดิม ปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ระบุว่าการนำเทคโนโลยีการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในระบบจะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 15–40% แม้การลงทุนในช่วงเริ่มต้นจะสูงและระบบควบคุมที่มีความซับซ้อนก็ตาม แต่การพัฒนาสารกึ่งตัวนำยุคใหม่ เทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงาน พลังงานหมุนเวียน และโครงข่ายระบบไฟฟ้าอัจฉริยะที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น จะช่วยยกระดับความคุ้มค่าและประสิทธิภาพจนเทคโนโลยีนี้กลายเป็นหัวใจ

สำคัญของการให้บริการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในอนาคต อย่างไรก็ตาม สำหรับสถานการณ์ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบจ่ายไฟหลัก ทางเลือกการแบ่งปันจะจำกัดเหลือเพียง 2 กรณี ได้แก่ การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งข้างทาง และการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับรถไฟฟ้าหรือการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งบนขบวนรถ ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีข้อดีและข้อจำกัดในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (Radu, Lewandowski, and Szelag, 2020) แสดงดังตารางที่ 3.11

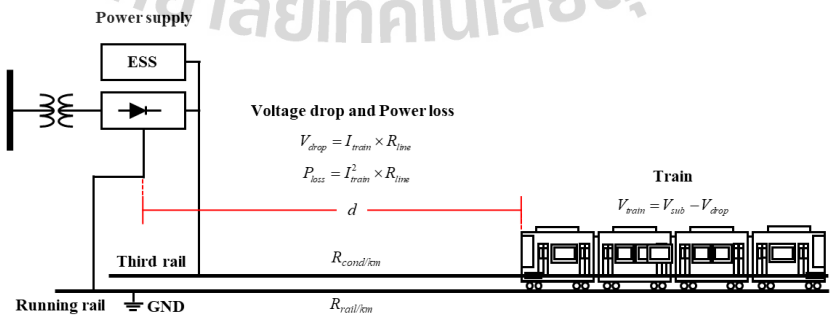
ตารางที่ 3.11 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

ลำดับ	ประเด็นเปรียบเทียบ	การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงาน	
		แบบติดตั้งบนขบวนรถ	แบบติดตั้งข้างทาง
1	บทบาทในภาวะฉุกเฉิน	เป็นแหล่งพลังงานฉุกเฉินส่วนตัวและสามารถแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้	เป็นแหล่งพลังงานฉุกเฉินกลาง
2	ความจุพลังงานไฟฟ้า	จำกัดตามขนาดและน้ำหนักที่ขบวนรถไฟฟ้ารับไหว	ปรับลดได้ตามความต้องการพลังงานไฟฟ้าของทั้งระบบ
3	การตอบสนอง	ตอบสนองได้ทันที	ตอบสนองได้ช้า
4	ลักษณะการทำงาน	มีความอิสระสูง	ไม่มีความอิสระ
5	ภาระโหลดที่ขบวนรถไฟฟ้า	รับภาระโหลดเพิ่ม	ไม่มีการรับภาระโหลดเพิ่ม
6	พื้นที่ติดตั้ง	ใช้พื้นที่บนขบวนรถ	ใช้พื้นที่ข้างทาง
7	การบำรุงรักษา	ต้องนำรถทั้งขบวนออกจากตารางบริการเพื่อเข้าซ่อม	เข้าถึงจุดติดตั้งได้ง่ายและไม่กระทบการเดินรถ
8	การทำงานบริเวณทางยกระดับหรืออุโมงค์	มีความยืดหยุ่นสูง	มีข้อจำกัดไม่เกินระยะที่มาตราฐานกำหนด
9	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้าสูญเสียอาจปรับเปลี่ยนตามระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้าหรือระยะทางที่ต้องระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	ระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยตรง

แนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS ที่นำเสนอมีจุดเด่นคือความสามารถในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับรถไฟฟ้าหรือการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งบนขบวนรถ คุณสมบัตินี้นำมาซึ่งประโยชน์ต่อระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในหลายมิติ โดยเฉพาะการเพิ่มความยืดหยุ่นในการเดินรถเมื่อเกิดเหตุขัดข้องทางไฟฟ้า ซึ่งช่วยเพิ่มโอกาสให้ขบวนรถไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ปลอดภัยและรองรับการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีเสถียรภาพมากขึ้น

3.9 ผลกระทบแรงดันไฟฟ้าตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในโครงข่ายระบบจ่ายไฟ

ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop: V_{drop}) และการสูญเสียกำลังไฟฟ้า (Power loss : P_{loss}) อันเนื่องมาจากความต้านทานของรางตัวนำและรางวิ่งที่เพิ่มขึ้นตามระยะทาง ถือเป็นประเด็นท้าทายที่ส่งผลต่อเสถียรภาพและประสิทธิภาพสำหรับแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อขบวนรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ห่างออกจากแหล่งจ่ายไฟหรือระบบกักเก็บพลังงาน แสดงดังรูปที่ 3.51 แรงดันไฟฟ้าตกที่เกิดขึ้น ณ ขบวนรถจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าพิกัดของแหล่งจ่ายไฟ ขณะเดียวกัน การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในรูปของความร้อนก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสมรรถนะและลดทอนประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบโดยรวม ส่งผลให้เป้าหมายการประหยัดพลังงานของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไม่สามารถบรรลุผลได้อย่างเต็มศักยภาพ สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยทั่วไป จะมีการจ่ายไฟผ่านรางตัวนำ 1 ราง และคืนไฟกลับสถานีจ่ายไฟผ่านรางวิ่ง 2 รางต่อหนึ่งขบวน แสดงดังรูปที่ 3.25 ความต้านทานของรางตัวนำและรางวิ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.21-3.22 ตามลำดับ (Mongkoldee, Leeton, and Kulworawanichpong, 2016)



รูปที่ 3.51 ความต้านทานของรางตัวนำและรางวิ่งที่เพิ่มขึ้นตามระยะทาง

$$R_{cond} = d \times R_{cond/km} \tag{3.21}$$

$$R_{rail} = \frac{1}{2}\left(d \times R_{rail/km}\right) \tag{3.22}$$

เมื่อ $R_{cond/km}$ คือ ความต้านทานต่อความยาวรางตัวนำ หน่วย โอห์มต่อกิโลเมตร $R_{rail/km}$ คือ ความต้านทานต่อความยาวรางวิ่ง หน่วย โอห์มต่อกิโลเมตร และ d คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งจ่ายไฟกับขบวนรถไฟฟ้า หน่วย กิโลเมตร ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่าความต้านทานรวมตลอดเส้นทางการจ่ายไฟจากสถานีจ่ายไฟไปยังรถไฟฟ้า (Overall line resistance: R_{line}) ดังสมการที่ 3.23 นอกจากนี้สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าตกและการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากผมของความต้านทานตลอดเส้นทางการจ่ายไฟจากสถานีจ่ายไฟไปยังรถไฟฟ้า ดังสมการที่ 3.24-3.26

$$R_{line} = d\left(R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2}\right) \tag{3.23}$$

$$V_{drop} = I_{train} \times R_{line} \tag{3.24}$$

$$V_{train} = V_{sub} - V_{drop} \tag{3.25}$$

$$P_{loss} = I_{train}^2 \times R_{line} \tag{3.26}$$

กำหนดให้ I_{train} คือ กระแสไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้า V_{train} คือ แรงดันไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้า และ V_{sub} คือ แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟหรือระบบกักเก็บพลังงาน ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะต้องมีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์พลวัตการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการประเมินการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบด้วยวิธีการฉีดกระแส นอกจากนี้ การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าอย่างไม่เหมาะสมหรือการมีรถไฟฟ้าหลายขบวนดึงกระแสไฟฟ้าพร้อมกันจากแหล่งจ่ายไฟ อาจทำให้แรงดันไฟฟ้าในรางต่ำกว่าเกณฑ์มาตราฐานจนนำไปสู่การที่ขบวนรถไฟฟ้าไม่สามารถดึงกำลังไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการขับเคลื่อนได้ ซึ่งส่งผลให้เกิดการลดทอนสมรรถนะหรือหยุดชะงักของขบวนรถไฟฟ้าเหล่านั้นได้ในที่สุด การทำความเข้าใจปรากฏการณ์เหล่านี้จากมุมมองของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบและวางแผนการติดตั้งระบบ

กักเก็บพลังงาน เพื่อเสริมเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยรวม

3.10 สรุป

บทนี้ได้รวบรวมทฤษฎีและข้อมูลสำคัญที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบจ่ายไฟ พลวัตการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยวิธีการฉีดกระแส ปัญหาไฟดับและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน และผลกระทบแรงดันไฟฟ้าตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในโครงข่ายระบบจ่ายไฟ เพื่อสร้างรากฐานความรู้และกรอบแนวคิดที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาแบบจำลองต้นแบบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในบทถัดไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

4.1 บทนำ

การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจำเป็นต้องอาศัยการออกแบบที่รัดกุมและการทดสอบสมรรถนะอย่างละเอียด เพื่อให้มั่นใจได้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีการทำงานสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยปัจจุบันการออกแบบและทดสอบสมรรถนะของระบบมักดำเนินการผ่านการสร้างแบบจำลองและทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์ เนื่องจากศักยภาพในการประมวลผลที่สูงและความสามารถของซอฟต์แวร์ที่ช่วยให้การจำลองสามารถดำเนินการได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ และมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการสนับสนุนจากฐานข้อมูลออนไลน์ที่จำเป็นต่อการดำเนินการอีกด้วย ซึ่งช่วยลดต้นทุน เวลา ความเสี่ยงจากการทดสอบภาคสนาม และเพิ่มความยืดหยุ่นในการวิเคราะห์ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้ ในบทนี้นำเสนอขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง ESTS สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยมีการกล่าวถึงรายละเอียดข้อมูลจำเพาะของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่เลือกใช้เป็นกรณีศึกษา และขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง ตลอดจนขั้นตอนการทดสอบและการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองโดยละเอียด ดังรายละเอียดที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

4.2 แบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

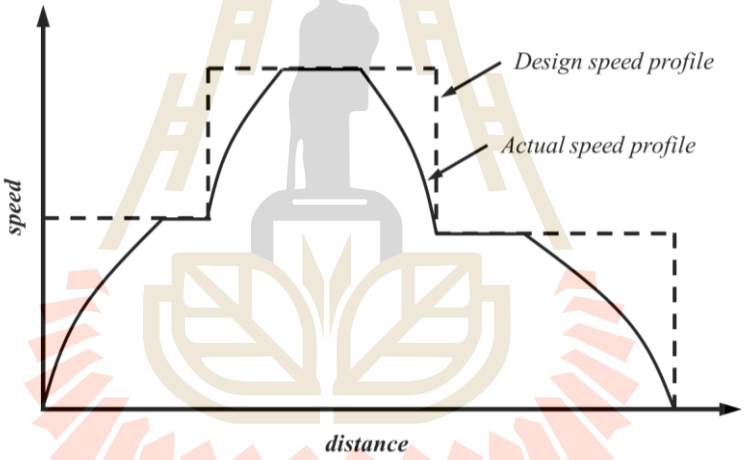
แบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนถือเป็นหัวใจหลักของการศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งต้องอาศัยการออกแบบและสร้างแบบจำลองโดยจะคำนึงถึงการทำงานของขบวนรถไฟฟ้าและระบบส่วนอื่น ๆ ที่มีความสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีและข้อมูลเชิงเทคนิค เพื่อเป็นการวางรากฐานสู่การทดสอบแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS

4.2.1 การพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การพัฒนาแบบจำลองประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า และส่วนโครงข่ายระบบจ่ายไฟ เพื่อให้แบบจำลองมีความสมจริงและมีความแม่นยำสูงสุด โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนแสดงไว้ดังต่อไปนี้

4.2.1.1 ส่วนการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า

จากหลักพลวัตการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสามารถพัฒนาส่วนการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า เพื่อคำนวณพฤติกรรมการทำงานของขบวนรถไฟฟ้าขณะเคลื่อนที่ตามเส้นโครงร่างความเร็ว (speed profile) ที่ออกแบบไว้ โดยนำการควบคุมเชิงสัดส่วน (proportional control) มาใช้ปรับอัตราเร่งจากค่าคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วจริง (actual speed profile) และความเร็วอ้างอิง (design speed profile) ซึ่งถูกกำหนดไว้อย่างชัดเจนในแต่ละช่วงการเดินรถระหว่างสถานีผู้โดยสาร แสดงดังรูปที่ 4.1 การสร้างแบบจำลองในส่วนการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการทำงานออกเป็น 3 โหมด ได้แก่ โหมดวิ่ง (running mode) โหมดเบรก (braking mode) และโหมดหยุดที่สถานี (station stop mode) ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังต่อไปนี้



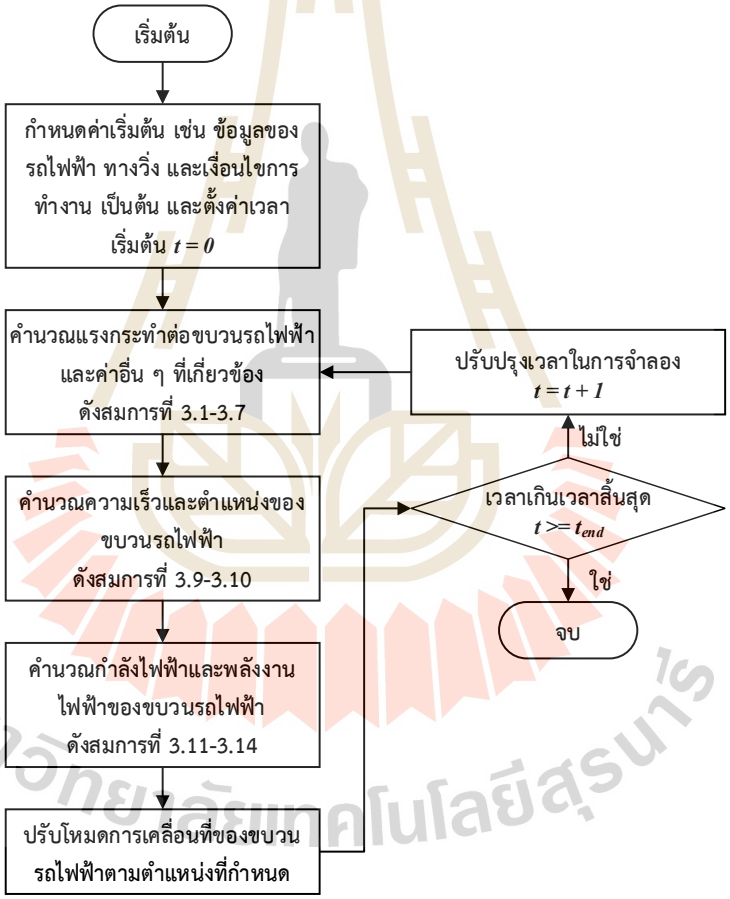
รูปที่ 4.1 ลักษณะเส้นโครงร่างความเร็วของขบวนรถไฟฟ้าที่ควบคุมเชิงสัดส่วน

1) โหมดวิ่ง ทำหน้าที่คำนวณและควบคุมความเร็วตลอดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยการควบคุมความเร็วในโหมดนี้จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 เงื่อนไข ได้แก่ เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจริงต่ำกว่าความเร็วอ้างอิงที่ได้ออกแบบไว้ จะมีการควบคุมให้รถไฟฟ้าเข้าสู่โหมดเร่งความเร็ว แต่เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจริงสูงกว่าความเร็วอ้างอิงที่ได้ออกแบบไว้ จะมีการควบคุมให้รถไฟฟ้าเข้าสู่โหมดความเร็วคงที่

2) โหมดเบรก ทำหน้าที่ลดความเร็วของรถไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนที่ถึงระยะวิกฤตการเบรกเพื่อเตรียมเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร

3) โหมดหยุดที่สถานี ทำหน้าที่จับเวลาที่จอดอยู่ที่สถานีผู้โดยสารตามเวลาที่กำหนด (dwell time) ก่อนรถไฟฟ้าจะกลับไปทำงานในโหมดวิ่งอีกครั้งกรณีมีหลายสถานีผู้โดยสาร

โดยระหว่างการพิจารณาการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าในโหมดต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น แบบจำลองคำนวณแรงที่กระทำต่อขบวนรถ (รวมถึงแรงขับ แรงต้าน และแรงเบรก) อัปเดตสถานะความเร็วและระยะทางที่เคลื่อนที่ และประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานตามสมการที่นำเสนอในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งสามารถรวบรวมและสังเคราะห์ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองเป็นแผนผังการทำงาน (flowchart) แสดงดังรูปที่ 4.2

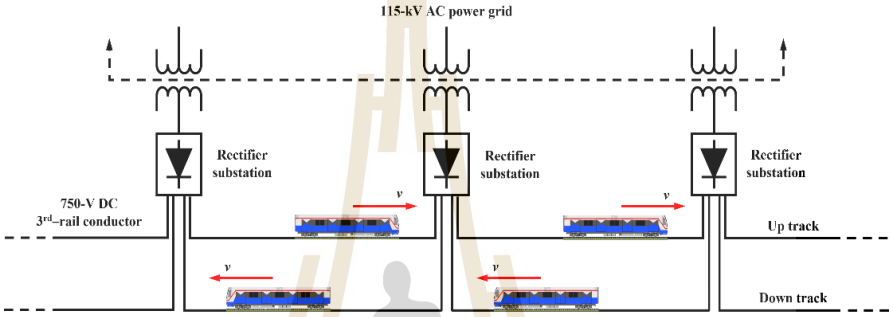


รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองส่วนการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า

4.2.1.2 ส่วนโครงข่ายระบบจ่ายไฟ

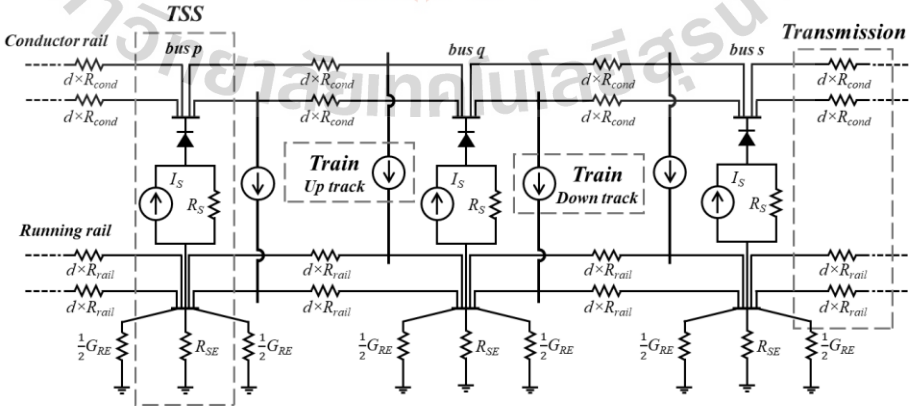
ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ให้บริการในเขตเมืองมักใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 600 หรือ 750 โวลต์ ในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า การสร้างแบบจำลองส่วน

โครงข่ายจ่ายไฟจึงต้องพิจารณาคุณสมบัติและโครงสร้างของระบบจ่ายไฟกระแสตรงที่ประกอบด้วยสถานีไฟฟ้าย่อยแบบวงจรเรียงกระแสที่ป้องกันการย้อนกลับของกระแสด้วยไดโอด รางตัวนำที่จ่ายกระแสให้ขบวนรถไฟฟ้า รางวิ่งซึ่งเป็นทางกลับของกระแส และฉนวนคั่นระหว่างรางวิ่งกับพื้นดิน เพื่อให้การจำลองผลการทำงานของระบบมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.3 (Mongkoldee, Leeton, and Kulworawanichpong, 2016) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



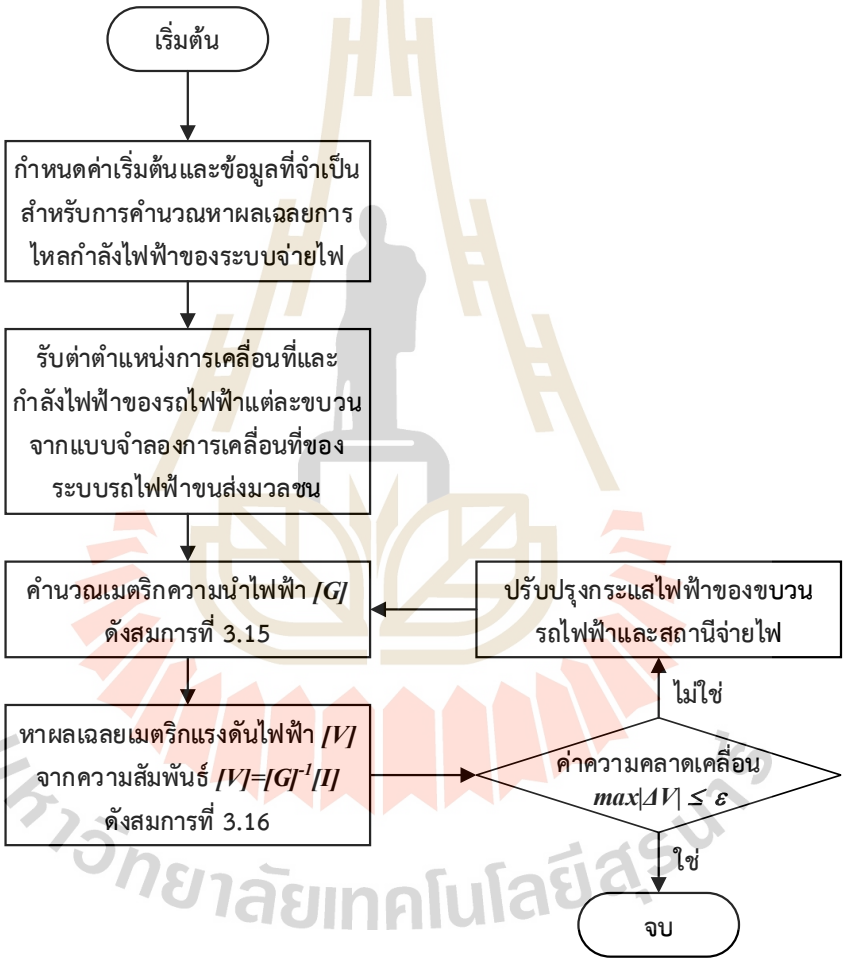
รูปที่ 4.3 ระบบจ่ายไฟกระแสตรงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

จากรูปที่ 4.3 สามารถวิเคราะห์โครงข่ายระบบจ่ายไฟกระแสตรงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนให้อยู่ในรูปแบบจำลองพาย ซึ่งแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ สถานีจ่ายไฟ ขบวนรถไฟฟ้า และชุดสายป้อนที่ประกอบด้วยรางตัวนำ รางวิ่ง และฉนวนระหว่างรางกับพื้นดิน แสดงดังรูปที่ 4.4 การสร้างแบบจำลองในลักษณะนี้ช่วยลดความซับซ้อนของการคำนวณให้สามารถวิเคราะห์ระบบได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.4 แบบจำลองพายของระบบจ่ายไฟกระแสตรง

การคำนวณค่าทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองจะดำเนินการอย่างต่อเนื่องทุก ๆ 0.1 วินาที โดยใช้เทคนิคการฉีดกระแส (Current Injection Method: CIM) เทคนิคนี้จะสมดุลสมการกระแสแต่ละบัสแทนการใช้สมการกำลังไฟฟ้า เพื่อให้สมการสามารถวิเคราะห์แบบระบบเชิงเส้นและรองรับการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานในขบวนรถไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Kulworawanichpong, 2015) การคำนวณนี้จะอัปเดตการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามโหมดการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า



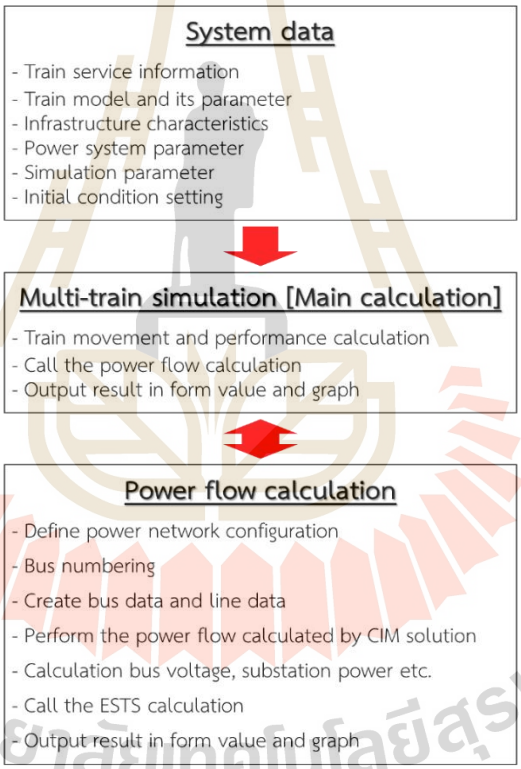
รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองในส่วนโครงข่ายระบบจ่ายไฟ

จากรูปที่ 4.5 กระบวนการหาผลเฉลยค่าทางไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแสของแบบจำลองโครงข่ายระบบจ่ายไฟกระแสตรงจะมีจำนวนโนด เท่ากับ ผลรวมของจำนวนสถานีจ่ายไฟและขบวนรถไฟฟ้าที่กำลังเคลื่อนที่บนรางวิ่ง โดยสถานีผู้โดยสารจะไม่ถูกนำมาพิจารณาเป็น

โนดด้วย ทั้งนี้ ตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าและสถานีจ่ายไฟจะต้องไม่อยู่ในตำแหน่งที่ซ้อนทับกัน การกำหนดจำนวนโนดจึงขึ้นอยู่กับเพียงจำนวนสถานีจ่ายไฟและขบวนรถไฟฟ้าเท่านั้น การทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมีความเป็นพลวัตที่มีค่าแปรผันไปตามเวลาและตำแหน่งที่รถไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่อยู่บนรางตามตารางการให้บริการ (Zhang, Wu, and Liu, 2017)

4.2.2 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

จากการทำงานของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทั้ง 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า และส่วนโครงข่ายระบบจ่ายไฟ สามารถสรุปโครงสร้างการทำงานของแบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเริ่มต้นจากการรับข้อมูลที่เกี่ยวข้องของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ได้แก่ ค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ โครงสร้างพื้นฐานของระบบ ข้อมูลการให้บริการของรถไฟฟ้า คุณลักษณะการทำงานของระบบ เป็นต้น แล้วทำการปล่อยรถไฟฟ้าออกจากสถานีต้นทางตามตารางเวลาหรือค่าเฮดเวย์ (headway) อย่างต่อเนื่องจนกว่า

รถไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปจอด ณ สถานีผู้โดยสารปลายทางหรือหมดเวลาให้บริการที่กำหนดไว้ เพื่อจำลองและหาผลเฉลยการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าร่วมกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีฉีดกระแสในแต่ละช่วงเวลาที่คำนวณ ซึ่งจะทำให้ได้ผลเฉลยในรูปของค่าความเร็ว ตำแหน่งการเคลื่อนที่ แรงฉุดลาก แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า เป็นต้น ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรอบการคำนวณตามโหมดการทำงานและตำแหน่งของรถไฟฟ้าบนรางวิ่ง และสุดท้ายก็จะมีการสรุปผลทั้งหมดที่ได้แสดงผลในรูปแบบกราฟเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์

4.2.3 ข้อมูลจำเพาะของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

จากการศึกษาเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในบทที่ 3 พบว่าระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเขตเมืองนิยมใช้ระบบจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 600–750 โวลต์ ในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยที่มีการใช้ระบบที่เป็นระบบจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 750 โวลต์ เป็นส่วนใหญ่ สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของ ESTS ขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับนั้น ผู้วิจัยได้เลือกนำข้อมูลจำเพาะของระบบรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ สาย 2 หรือที่เรียกว่า รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม (สายสีเขียวเข้ม) มาใช้เป็นกรณีศึกษา แสดงดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากมีความสมบูรณ์ของข้อมูลเส้นทางและจำนวนสถานีผู้โดยสารที่เพียงพอต่อการทดสอบ สภาพการให้บริการจริงที่มีโครงสร้างระบบจ่ายไฟตรงตามเงื่อนไขการศึกษา และข้อมูลจำเพาะของระบบที่สมบูรณ์พร้อมสำหรับการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการดำเนินงานจริง ซึ่งจะช่วยเสริมความแม่นยำและความสมจริงในการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ พร้อมเปิดโอกาสนำแบบจำลองไปต่อยอดในการศึกษาวิจัยอื่น ๆ ได้ต่อไป

จากงานวิจัยของ Sumpavakup, Suwannakijborihan, Ratniyomchai, and Kulworawanichpong (2018) ได้สรุปข้อมูลจำเพาะที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม (สายสีเขียวเข้ม) แสดงดังตารางที่ 4.1 ระบบรถไฟฟ้าสายนี้มีระยะทางให้บริการทั้งสิ้น 13.65 กิโลเมตร ประกอบด้วยสถานีผู้โดยสาร 14 แห่ง (W01–S12) พร้อมสถานีไฟฟ้าย่อยกระแสตรง 750 โวลต์ อีก 7 แห่ง แสดงดังรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.2 การเดินขบวนรถไฟฟ้ามีลักษณะการวิ่งในสองทิศทาง ได้แก่ การวิ่งในทิศขาขึ้น (up-track) จากสถานี W01 ไป S12 และการวิ่งในทิศขาลง (down-track) จาก S12 ไป W01 โดยมีโครงร่างความเร็วของขบวนรถไฟฟ้าแต่ละขบวน แสดงดังรูปที่ 4.9 และความถี่ในการเดินขบวนรถจะมีรอบแตกต่างกันระหว่างวันทำการปกติและวันหยุด แสดงดังตารางที่ 4.3 และเมื่อถึงแต่ละสถานีผู้โดยสารขบวนรถไฟฟ้าจะหยุดรับ–ส่งผู้โดยสารประมาณ 20–

60 วินาที (บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน), n.d.) นอกจากนี้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการในแต่ละรอบจะอยู่ระหว่าง 8–18 ขบวน ขึ้นกับความถี่ที่ถูกกำหนดในแต่ละช่วงเวลา



รูปที่ 4.7 ระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม

(ที่มาภาพ: https://www.prachachat.net/general/news-1710173 [เข้าถึงเมื่อ 24 พฤษภาคม 2568])

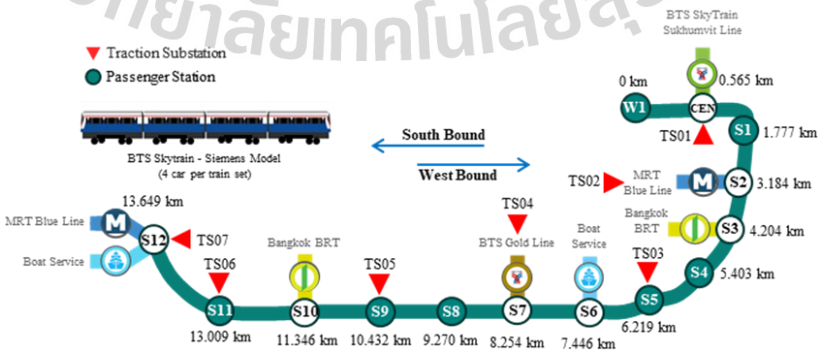
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจำเพาะระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม

พารามิเตอร์	ค่า (หน่วย)
ข้อมูลจำเพาะของระบบ	
รุ่นซีเอ็นอาร์ ฉางชุน	TC-M-M-TC
แรงดันไฟฟ้า	750 โวลต์
ความจุ	1,130 คน
น้ำหนัก	
- น้ำหนักรถเปล่า $AW0$	153 ตัน
- น้ำหนักบรรทุก $AW1$	$AW0$ + 11 ตัน
- น้ำหนักบรรทุก $AW2$	$AW0$ + 52 ตัน
- น้ำหนักบรรทุก $AW3$	$AW0$ + 75 ตัน
- น้ำหนักบรรทุก $AW4$	$AW0$ + 85 ตัน
คุณลักษณะการเคลื่อนที่	
- ความเร็วสูงสุด	80 km/h
- ความเร่งสูงสุด	0.87 m/s^2
- ความหน่วงสูงสุด	1.0 m/s^2
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อ	850/775 มิลลิเมตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจำเพาะระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า (หน่วย)
สัมประสิทธิ์ความต้านทานของเดวิส	A = 4,025, B = 118.67, and C = 0.8710
ประสิทธิภาพ	
- เกียร์	98 %
- มอเตอร์	88 %
- อินเวอเตอร์	98 %
กำลังไฟฟ้าโหลดอื่น ๆ	270 กิโลวัตต์
กราฟแรงฉุดลากและแรงเบรก	รูปที่ 4.10
<u>พารามิเตอร์ระบบจ่ายไฟ</u>	
สถานีจ่ายไฟย่อย	7 สถานี
- แรงดันไฟฟ้าไร้โหลด	790 โวลต์
- กำลังไฟฟ้า	2,550 กิโลโวลท์แอมป์ (CEN, S02, S05, S07)
	3,300 กิโลโวลท์แอมป์ (S09, S11, S12)
- ความต้านทานการลัดวงจรแหล่งจ่ายไฟ	13.3 มิลลิโอห์ม (CEN-S5)
	14.70 มิลลิโอห์ม (S7-S12)
ความต้านทานรางที่สาม	6.70 มิลลิโอห์ม/กิโลเมตร (W1-S6)
	8.23 มิลลิโอห์ม/กิโลเมตร (S6-S12)
<u>อื่น ๆ</u>	
- ความลาดชันสูงสุด	6 %

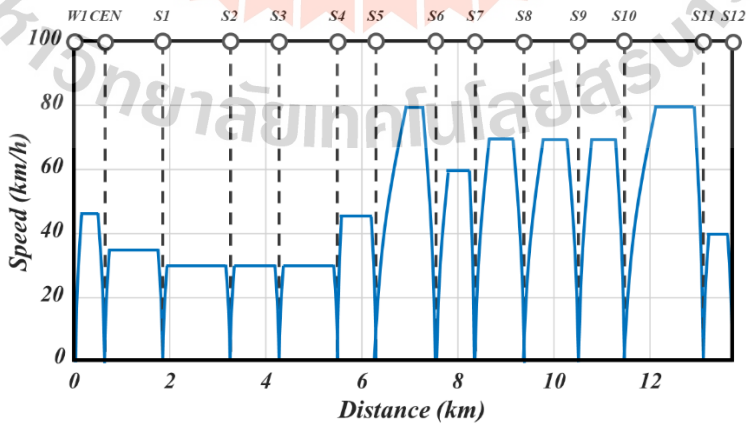


รูปที่ 4.8 รายการสถานีผู้โดยสารบนเส้นทางระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลตำแหน่งสถานีผู้โดยสารและสถานีจ่ายไฟในระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม

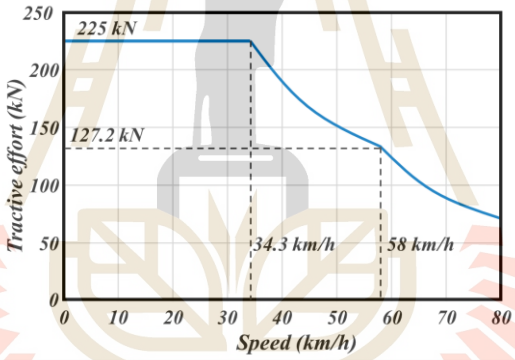
สถานีผู้โดยสาร	รหัสสถานีผู้โดยสาร	ตำแหน่ง (กิโลเมตร)	สถานีจ่ายไฟ
สนามกีฬาแห่งชาติ (National Stadium)	W1	0	-
สยาม (Siam)	CEN	0.565	TS01
ราชดำริ (Ratchadamri)	S1	1.777	-
ศาลาแดง (Sala Daeng)	S2	3.184	TS02
ช่องนนทรี (Chong Nonsi)	S3	4.204	-
เซนต์หลุยส์ (Saint Louis)	S4	5.403	-
สุรศักดิ์ (Surasak)	S5	6.219	TS03
สะพานตากสิน (Saphan Taksin)	S6	7.446	-
กรุงธนบุรี (Krung Thon Buri)	S7	8.254	TS04
วงเวียนใหญ่ (Wongwian Yai)	S8	9.270	-
โพธิ์นิมิต (Pho Nimit)	S9	10.432	TS05
ตลาดพลู (Talat Phlu)	S10	11.346	-
วุฒากาศ (Wutthakat)	S11	13.009	TS06
บางหว้า (Bang Wa)	S12	13.649	TS07
สรุป	**14 สถานี**	**13.649 กิโลเมตร**	**7 สถานี**



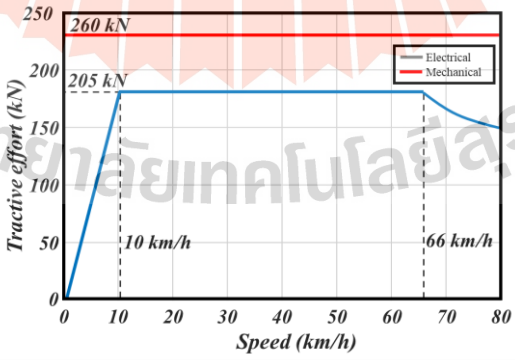
รูปที่ 4.9 โครงร่างความเร็วของขบวนรถไฟฟ้า

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลตารางเดินรถของระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม

ช่วงเวลา (น.)	เวลาระหว่างขบวนรถไฟฟ้า (นาที.วินาที)	
	วันทำการปกติ	วันหยุด
06.00-07.00	6.00	7.00
07.00-09.00	3.45	7.00
09.00-17.00	3.45	7.00
17.00-20.00	3.45	5.40
20.00-21.00	6.00	5.40
21.00-22.00	6.00	7.00
22.00-24.00	8.00	8.00



(ก) แรงฉุดลาก

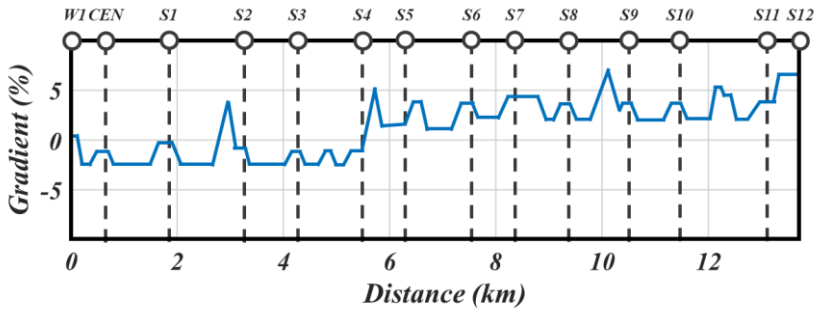


(ข) แรงเบรก

รูปที่ 4.10 คุณลักษณะแรงฉุดลากและแรงเบรกของขบวนรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม

(ที่มาภาพ: ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ (2560))

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.11 โครงร่างความชันของทางวิ่ง

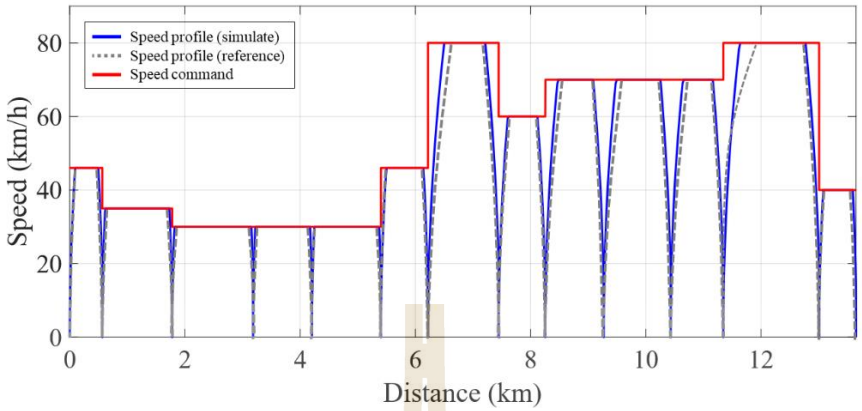
จากข้อมูลคุณลักษณะแรงฉุดลากและแรงเบรกของขบวนรถไฟฟ้าและระดับผลความชันเส้นทางวิ่ง แสดงดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าแรงฉุดลากสูงสุดของขบวนรถไฟฟ้าที่สามารถใช้ในการขับเคลื่อนมีค่า 225 กิโลนิวตัน ในขณะที่แรงเบรกสูงสุดของขบวนรถไฟฟ้ามีค่าอยู่ที่ 205 กิโลนิวตัน โดยตลอดเส้นทางการให้บริการจะมีค่าความชันของทางวิ่งอยู่ในช่วง ร้อยละ -2.5 ถึง 5.2 แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งส่งผลต่อค่าแรงฉุดลากและแรงเบรกของขบวนรถไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้นโดยตรง การจำลองการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจึงต้องนำค่าความชันเหล่านี้มาประกอบการพิจารณาด้วย

4.2.4 การทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

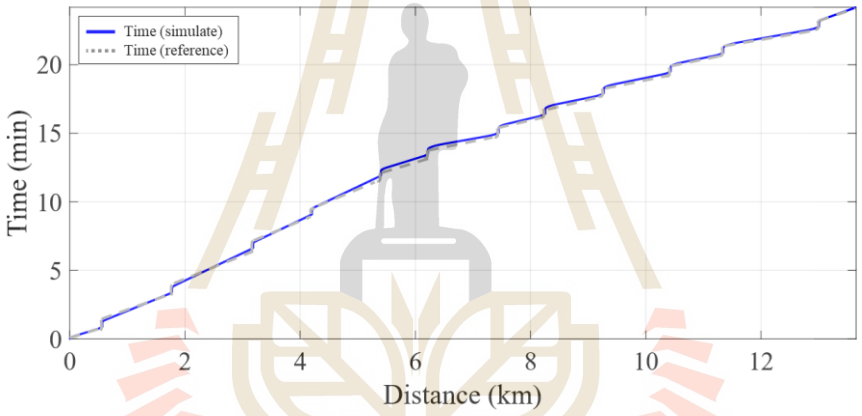
การทดสอบเพื่อตรวจสอบและประเมินประสิทธิผลของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการโดยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ การทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหนึ่งขบวน และการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวน รายละเอียดของการทดสอบในแต่ละส่วนได้นำเสนอไว้ดังต่อไปนี้

4.2.4.1 การทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหนึ่งขบวน

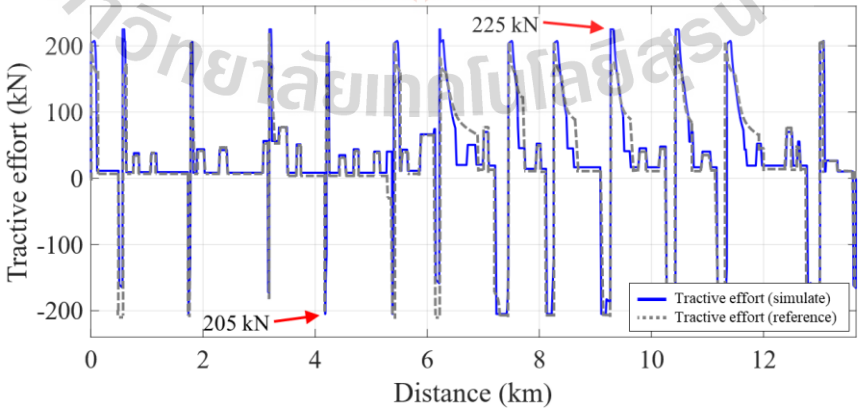
การทดสอบและประเมินผลจะกำหนดให้โครงร่างความเร็วที่ได้จากแบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนมีลักษณะที่สอดคล้องกับโครงร่างความเร็วและข้อมูลจำเพาะอื่น ๆ ของขบวนรถไฟฟ้าที่เลือกใช้ในการจำลองจากงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องและได้รับการยอมรับในวงการวิชาการ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่พัฒนา (นัชพร สตพรหม, 2562; Yooyong, Kulworawanichpong, and Ratniyomchai, 2021) โดยผลการเปรียบเทียบได้ถูกนำเสนอในรูปแบบของกราฟที่มีรายละเอียดของแต่ละพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ แสดงดังรูปที่ 4.12-4.16



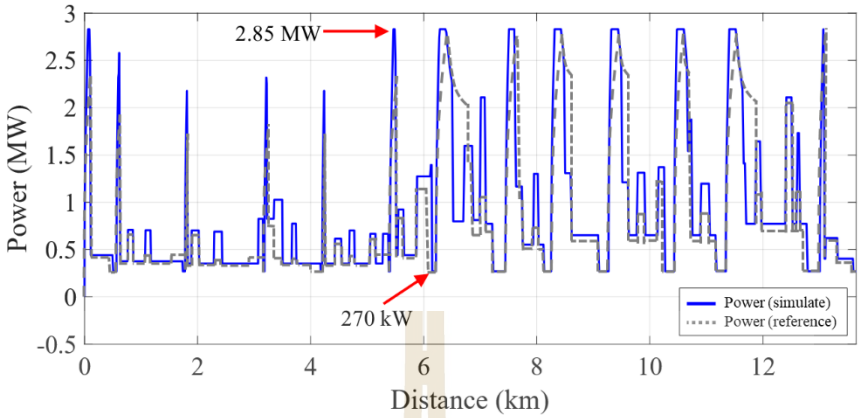
รูปที่ 4.12 ความเร็ว-ระยะทางของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน



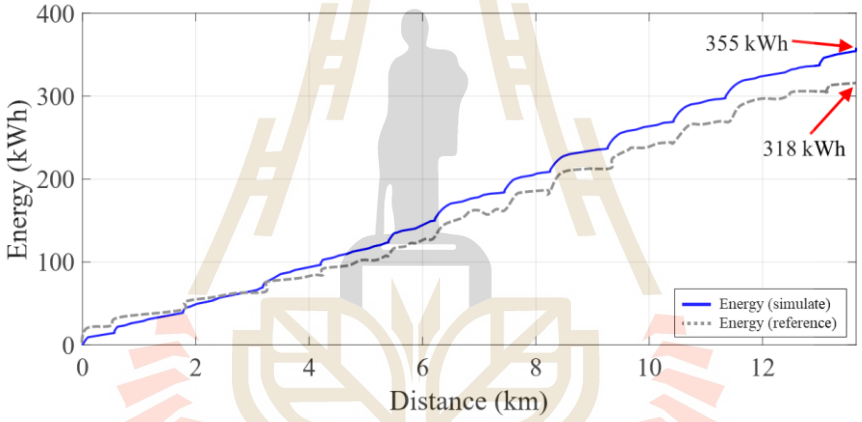
รูปที่ 4.13 เวลา-ระยะทางของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน



รูปที่ 4.14 แรงฉุดลากรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน



รูปที่ 4.15 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน

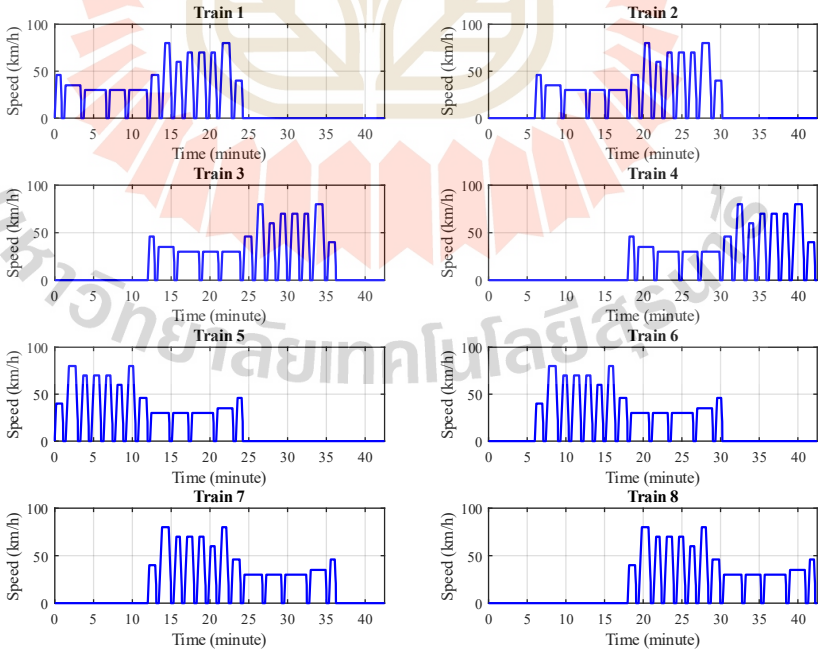


รูปที่ 4.16 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน

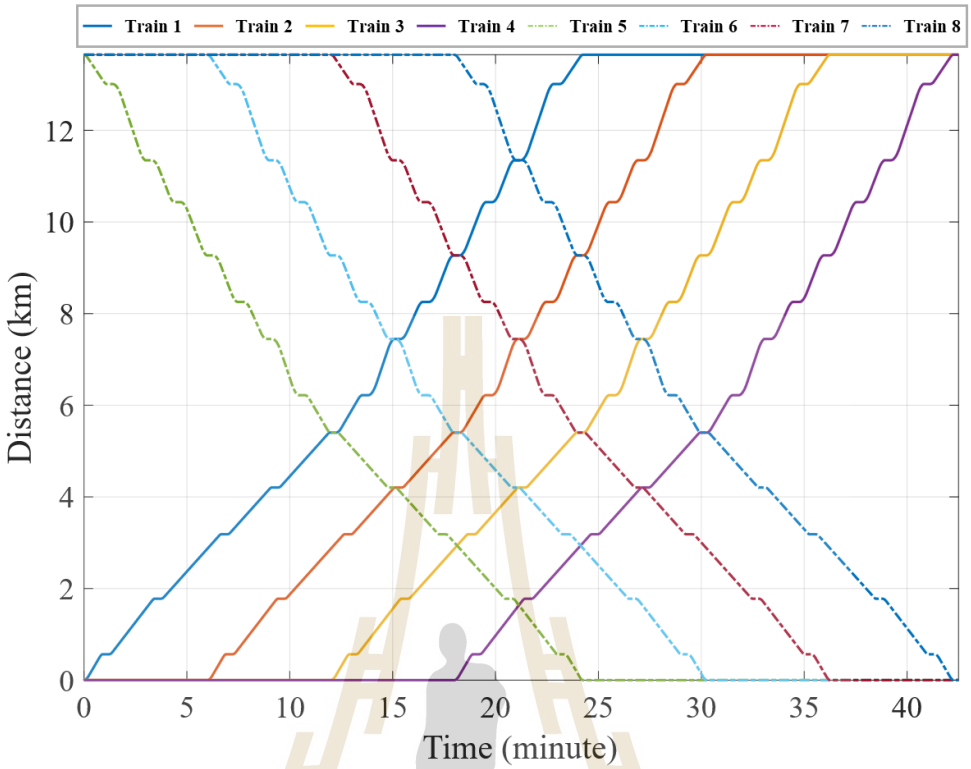
จากผลการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหนึ่งขบวน ดังรูปที่ 4.12-4.16 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถหาผลเฉลยในรูปแบบกราฟของความเร็ว ระยะทาง แรงฉุดลาก กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนหนึ่งใช้ในการเคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและครอบคลุมในทุกมิติของการวิเคราะห์ การตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยแต่ละกราฟพบว่าผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลอ้างอิงจากงานวิจัยในอดีตเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบและวิธีการพัฒนาแบบจำลองที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม แนวโน้มลักษณะของผลที่ได้และความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการประยุกต์ใช้ในเชิงการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ นอกจากนี้ ผลการตรวจสอบนี้ยืนยันความน่าเชื่อถือและความเหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาต่อยอดแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวน

4.2.4.2 การทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวน

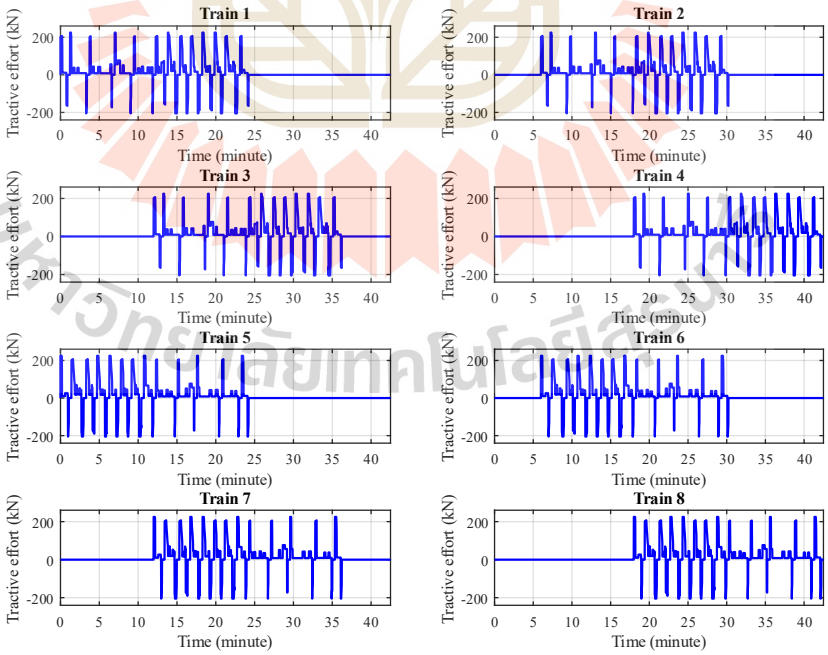
การทดสอบและประเมินผลในส่วนนี้เป็นการต่อยอดจากการจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนหนึ่งขบวนที่ได้ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือเรียบร้อยแล้ว การศึกษาในขั้นตอนนี้จะดำเนินการจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าจำนวน 8 ขบวน ภายใต้เงื่อนไขตารางเดินรถช่วงวันทำการปกติที่ทำการปล่อยขบวนรถไฟฟ้าด้วยความถี่ 6 นาที เพื่อทดสอบความสามารถของแบบจำลองในสภาวะการทำงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะกำหนดให้เส้นทางการวิ่งของรถไฟฟ้าขบวนที่ 1-4 วิ่งในทิศทางขาขึ้นจากสถานีสนามกีฬาแห่งชาติ (W1) ไปยังสถานีบางหว้า (S12) และรถไฟฟ้าขบวนที่ 5-8 เคลื่อนที่ในทิศทางขาลงหรือส่วนทางกลับจากเส้นทางขาขึ้นจนกว่ารถไฟฟ้าทุกขบวนจะทำการวิ่งครบหนึ่งรอบสมบูรณ์ด้วยโครงร่างความเร็วที่มีลักษณะเหมือนกันทุกขบวน วัตถุประสงค์ของการทดสอบคือการประเมินความสามารถของแบบจำลองในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวนพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ การทดสอบจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของแบบจำลองในการจัดการกับความซับซ้อนของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีการปฏิบัติการหลายขบวนในเวลาเดียวกัน รวมถึงการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างขบวนรถและการใช้พลังงานรวมของระบบ ผลการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวน แสดงดังรูปที่ 4.17-4.21



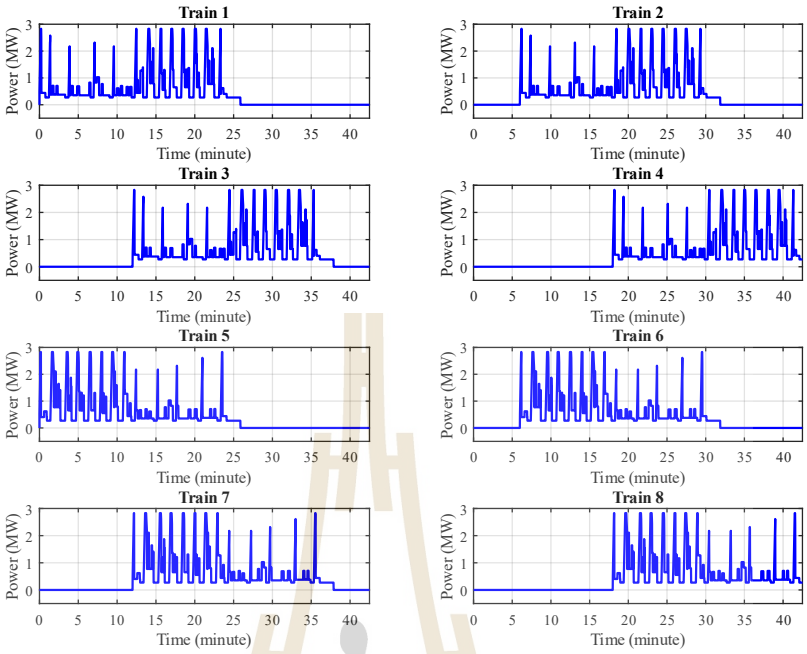
รูปที่ 4.17 ความเร็ว-ระยะทางของรถไฟฟ้าหลายขบวน



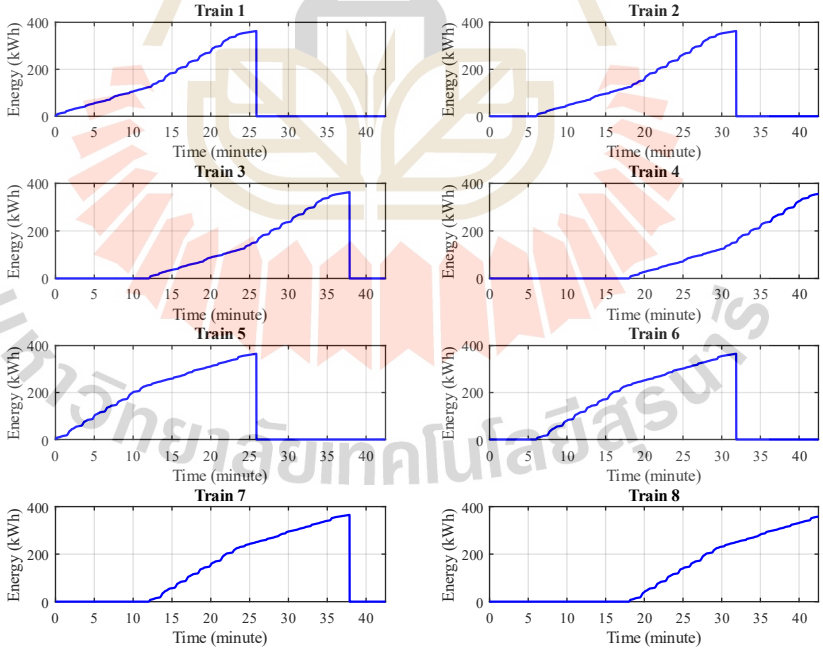
รูปที่ 4.18 ระยะทาง-เวลาของรถไฟฟ้าหลายขบวน



รูปที่ 4.19 แรงฉุดลากรถไฟฟ้าหลายขบวน



รูปที่ 4.20 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวน



รูปที่ 4.21 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวน

รูปที่ 4.17-4.21 แสดงผลการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวนในแง่ต่าง ๆ ได้แก่ โครงร่างความเร็ว ระยะทางการเคลื่อนที่ แรงฉุดลากกำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ระหว่างการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า ผลการจำลองเหล่านี้ถูกเปรียบเทียบกับเวลาดำเนินการของรถไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนที่มีลักษณะเป็นลำดับขั้นอย่างชัดเจนตามเงื่อนไขที่กำหนด การทดสอบดังกล่าวยืนยันให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจัดการและหาผลเฉลยของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำไปต่อยอดงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

จากกระบวนการพัฒนาและทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายใต้เงื่อนไขการทำงานและข้อมูลจำเพาะที่กำหนด ทำให้ทราบถึงลักษณะการทำงานของขบวนรถไฟฟ้าที่ดำเนินการเคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสารต้นทางและปลายทางดังกราฟที่ได้แสดงข้างต้น ผลการจำลองยังได้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้าที่ถือว่าเป็นหัวใจหลักอันนำไปสู่การออกแบบขนาด ESTS ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญอีกส่วนที่จำเป็นสำหรับการศึกษาการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วย ESTS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลและประยุกต์ใช้ผลลัพธ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ผลต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองก่อนหน้านี้จะถูกนำมาสรุปและแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ลำดับ	การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า (ระหว่างสถานีผู้โดยสาร)	ผลการทดสอบ				
		ระยะทาง (km)	ความเร็วสูงสุด (km/h)	เวลาเคลื่อนที่ (min)	กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (MW)	พลังงานไฟฟ้าสะสม (kWh)
1	สนามกีฬาแห่งชาติ-สยาม	0.565	46	0.56	0.79	14.67
2	สยาม-ราชดำริ	1.212	35	2.33	0.52	22.63
3	ราชดำริ -ศาลาแดง	1.407	30	2.56	0.49	28.66
4	ศาลาแดง-ช่องนนทรี	1.020	30	2.10	0.61	25.79
5	ช่องนนทรี-เซนต์หลุยส์	1.199	30	2.31	0.51	25.43

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (ต่อ)

ลำดับ	การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า (ระหว่างสถานีผู้โดยสาร)	ผลการทดสอบ				
		ระยะทาง (km)	ความเร็วสูงสุด (km/h)	เวลาเคลื่อนที่ (min)	กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (MW)	พลังงานไฟฟ้าสะสม (kWh)
6	เซนต์หลุยส์-สุรศักดิ์	0.816	46	1.16	0.98	24.52
7	สุรศักดิ์-สะพานตากสิน	1.227	80	1.16	1.28	32.34
8	สะพานตากสิน-กรุงธนบุรี	0.808	60	1.05	1.08	23.25
9	กรุงธนบุรี-วงเวียนใหญ่	1.016	70	1.11	1.11	26.20
10	วงเวียนใหญ่-โพธิ์นิมิต	1.162	70	1.17	1.20	30.59
11	โพธิ์นิมิต-ตลาดพลู	0.914	70	1.05	1.23	26.68
12	ตลาดพลู-วุฒากาศ	1.663	80	1.36	1.19	38.07
13	วุฒากาศ-บางหว้า	0.640	40	1.08	0.69	15.46
ค่าสูงสุด		1.663	80	2.56	1.28	38.07
ค่าต่ำสุด		0.565	30	0.56	0.49	14.67
ค่าเฉลี่ย		1.114	55	1.46	0.89	25.71
ผลรวม		13.649	-	19.00	-	334.29

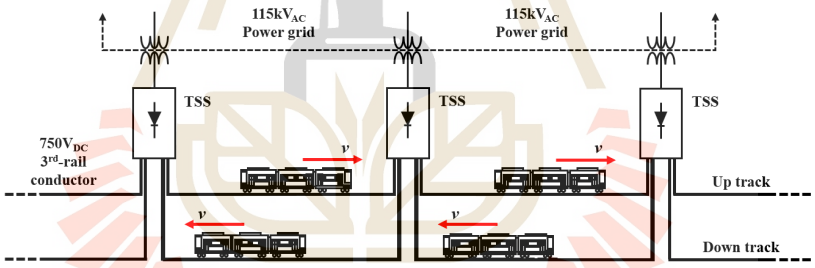
หมายเหตุ ข้อมูลในส่วนนี้ไม่ได้รวมกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับโหลดต่าง ๆ ระหว่างจอดที่สถานีผู้โดยสาร ซึ่งการจอดแต่ละสถานีผู้โดยสารจะใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยและพลังงานไฟฟ้ารวม เท่ากับ 0.27 เมกะวัตต์ และ 1.51 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ

ข้อมูลในตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงการเคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสารของรถไฟฟ้า โดยรถไฟฟ้าจะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 38.07 กิโลวัตต์ชั่วโมง ขณะเคลื่อนที่ระหว่างสถานีตลาดพลู-วุฒากาศ ข้อมูลพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้านี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบขนาดความจุของ ESTS เพื่อให้สามารถรองรับความต้องการพลังงานไฟฟ้าในสถานการณ์ต่าง ๆ ในหัวข้อถัดไป

4.3 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

ด้วยบทบาทของ ESTS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ที่ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบ และแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไปยังขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งระบบ เพื่อให้ขบวนรถไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดเมื่อเกิดความขัดข้องของแหล่งจ่ายไฟหลัก แบบจำลอง ESTS สำหรับใช้ในการทดสอบและประเมินความเป็นไปได้ของแนวคิดดังกล่าวจึงถูกพัฒนาให้สามารถพิจารณาพฤติกรรมทางไฟฟ้าของระบบ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว ESTS กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกจากระบบ กำลังไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟฟ้าต้องการ ความต้านทานภายในของ ESTS ความต้านทานตามระยะทางของรางตัวนำและรางวิ่ง และแรงดันไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟฟ้าได้รับจริง ดังนั้น แบบจำลองที่ใช้จึงต้องสามารถอธิบายพฤติกรรมได้อย่างสอดคล้องกันทั้งในกรณีที่ ESTS จ่ายไฟให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเอง และกรณีที่ ESTS แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าอื่น ดังรายละเอียดที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

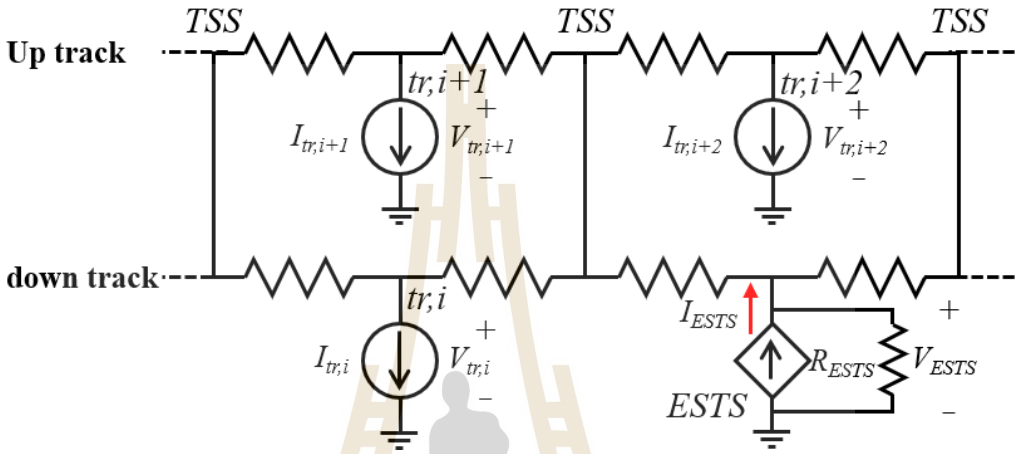
4.3.1 การพัฒนาแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน



รูปที่ 4.22 โครงสร้างสำหรับพัฒนาแบบจำลองการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

แบบจำลอง ESTS ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟสำรองที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าในช่วงเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง โดยแบบจำลองถูกพัฒนาในรูปของวงจรสมมูลนอร์ตันของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Jobsoongnern, Ratniyomchai, and Kulworawanichpong, 2020) และใช้เทคนิคการฉีดกระแส (Current Injection Method: CIM) ในการหาผลเฉลยค่าทางไฟฟ้า เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับแบบจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าและแบบจำลองระบบจ่ายไฟกระแสตรงได้อย่างเป็นระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ทั้งนี้ แบบจำลองต้องสามารถพิจารณาได้ทั้งกรณีที่ ESTS จ่ายไฟให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเอง และกรณีที่ ESTS แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไปยังขบวนรถไฟฟ้าอื่นที่ไม่ได้ติดตั้งระบบ ดังแสดง

ในรูปที่ 4.23 หัวข้อนี้อธิบายความหมายของแต่ละสมการควบคู่กับบทบาทในลำดับการคำนวณ ตั้งแต่การสร้างวงจรสมมูล ESTS การกำหนดโหลดรถไฟฟ้า การคำนวณเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า การสร้างสมการโนด การคำนวณกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า ไปจนถึงการตรวจสอบข้อจำกัดของระบบ



รูปที่ 4.23 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

จากรูปข้างต้น ESTS ถูกแทนด้วยวงจรสมมูลนอร์ตัน ประกอบด้วย กระแสไฟฟ้าสมมูลของแหล่งจ่าย ESTS (ESTS equivalent source current: I_{eq}) ขนานกับความต้านทานสมมูลของแหล่งจ่าย ESTS (ESTS equivalent source resistance: R_{ESTS}) โดย I_{ESTS} ใช้แทนความสามารถของแหล่งจ่ายภายใน ESTS ขณะที่ R_{ESTS} ใช้แทนผลของความต้านทานภายในของแบตเตอรี่และวงจรประกอบที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกขณะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดของ ESTS และ I_d คือ กระแสไฟฟ้ารวมที่ ESTS จ่ายไปยังขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบและขบวนรถไฟฟ้าอื่น ทั้งนี้ ค่าเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับแรงดันเปิดวงจรที่ขั้วของ ESTS (ESTS open-circuit voltage: V_{OC}) ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ ESTS (ESTS voltage: V_{ESTS}) ในสภาวะที่ไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด ($I_d = 0$) แสดงดังสมการที่ 4.1

$$I_{eq} = \frac{V_{OC}}{R_{ESTS}} \tag{4.1}$$

เมื่อ ESTS จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด จะเกิดกระแสโหลดรวมที่ไหลออกจากโนด V_{ESTS} เท่ากับ I_{ESTS} ดังนั้น จากกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่โนดดังกล่าว แสดงดังสมการที่ 4.2

$$I_{ESTS} = I_{eq} - \frac{V_{ESTS}}{R_{ESTS}} \tag{4.2}$$

เมื่อแทนสมการที่ 4.1 ลงในสมการที่ 4.2 จะได้ความสัมพันธ์ในรูปวงจรสมมูลเทเวนิน แสดงดังสมการที่ 4.3

$$V_{ESTS} = V_{OC} - I_{ESTS} R_{ESTS} \tag{4.3}$$

สมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า V_{ESTS} ไม่ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ 750 โวลต์ตลอดเวลา แต่เป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามภาระโหลดจริงของระบบ หาก I_{ESTS} เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานภายใน R_{ESTS} เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ V_{ESTS} ลดลงตามลักษณะของแหล่งจ่ายไฟที่มีความต้านทานภายในวงจรสมมูล แบบจำลองนี้จึงสะท้อนพฤติกรรมแรงดันไฟฟ้าของ ESTS ได้ดีกว่าการกำหนดให้เป็นค่าคงที่ นอกจากนี้ กำลังไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟฟ้าต้องการในแต่ละช่วงเวลาจะถูกแปลงเป็นความต้านทานโหลดสมมูลที่แรงดันอ้างอิงของระบบ (V_{ref}) โดยกำหนดให้ $P_{ESTS \rightarrow tr,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ ESTS ชุดหนึ่งต้องจัดสรรให้กับรถไฟฟ้าขบวนที่ i จะทำให้ได้ความต้านทานโหลดสมมูลของรถไฟฟ้าขบวนที่ i ที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ 4.4

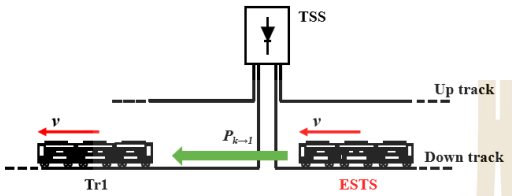
$$R_{tr,i} = \frac{V_{ref}^2}{P_{ESTS \rightarrow tr,i}} \tag{4.4}$$

การแปลงในลักษณะนี้ทำให้โหลดรถไฟฟ้าสามารถถูกนำเข้าสู่สมการวงจรเชิงเส้นได้โดยตรง ในกรณีที่ ESTS จ่ายไฟให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเอง โหลดของขบวนดังกล่าวต่ออยู่ที่โนดเดียวกับ V_{ESTS} ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ได้รับ ดังสมการที่ 4.5

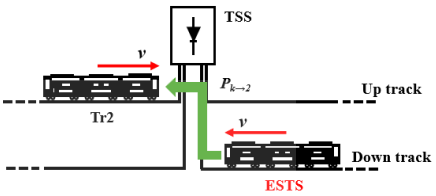
$$V_{tr,self} = V_{ESTS} \tag{4.5}$$

สำหรับกรณีที่ ESTS แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไปยังขบวนรถไฟฟ้าอื่น จำเป็นต้องพิจารณาระยะทางไฟฟ้าระหว่าง ESTS และขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า โดยการคำนวณระยะทางให้สอดคล้องกับโครงสร้างจริงของระบบทางวิ่งรางคู่ ซึ่งหาก ESTS กับขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าอยู่บนรางเดียวกัน ระยะทางจะถูกคำนวณจากระยะห่างโดยตรงระหว่าง

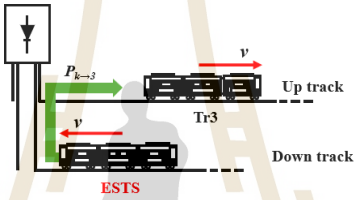
ตำแหน่งของขบวนทั้งสอง แต่หาก ESTS กับขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าอยู่คนละราง กระแสไฟฟ้าต้องไหลผ่านจุดเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าที่ให้ผลรวมระยะทางน้อยที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.24 ซึ่งสามารถสรุปเป็นสมการคำนวณระยะทาง แสดงดังสมการที่ 4.6



(ก) ขบวนรถไฟฟ้าอยู่บนรางเดียวกัน



(ข) ขบวนรถไฟฟ้าอยู่คนละราง กรณีที่ 1



(ค) ขบวนรถไฟฟ้าอยู่คนละราง กรณีที่ 2

รูปที่ 4.24 ระยะทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจากระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินไปยังขบวนรถไฟฟ้า

$$d_{sh,i} = \begin{cases} \left|x_{ESTS} - x_{tr,i}\right| & ;On\ same\ track \\ \left|x_{ESTS} - x_{TSS}\right| + \left|x_{TSS} - x_{tr,i}\right| & ;On\ other\ track \end{cases} \quad (4.6)$$

โดยที่ x_{ESTS} คือตำแหน่งของ ESTS $x_{tr,i}$ คือตำแหน่งของรถไฟฟ้าขบวนที่ i และ x_{TSS} คือตำแหน่งของสถานีไฟฟ้า ระยะทางดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นความต้านทานของเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าขบวนที่ i แสดงดังสมการที่ 4.7 การใช้ครึ่งหนึ่งของความต้านทานรางวิ่งเป็นการลดรูปผลของเส้นทางกลับกระแสไฟฟ้าให้เหมาะกับแบบจำลองในระดับระบบ ทั้งนี้ ระยะทางสูงสุดสำหรับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ากำหนดจากข้อจำกัดแรงดันไฟฟ้าตกและกระแสไฟฟ้าสูงสุด แสดงดังสมการที่ 4.8 โดยขบวนรถไฟฟ้าที่จะถูกนำเข้ามาเป็นโหลดในวงจรย่อยของ ESTS ต้องมีระยะทางจาก ESTS ไปยังขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเป็นไปตามเงื่อนไข แสดงดังสมการที่ 4.9 โดยเงื่อนไขดังกล่าวใช้เป็นเกณฑ์คัดกรองเบื้องต้นเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าภายใต้ข้อจำกัดด้านแรงดันไฟฟ้าตก ทั้งนี้ เงื่อนไขดังกล่าวเป็นการแทนกลไกการทำงานจริงของขบวนรถไฟฟ้า กล่าวคือ แม้ขบวนรถไฟฟ้าจะได้รับแรงดันไฟฟ้าจาก ESTS แต่หาก

แรงดันไฟฟ้าที่ได้รับมีค่าต่ำกว่าระดับมาตรฐาน ขบวนรถไฟฟ้าจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ อย่างไรก็ตาม หลังจากผ่านเงื่อนไขด้านระยะทางแล้ว แบบจำลองจะยังคงตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าจริงของขบวนรถไฟฟ้าจากผลการแก้สมการโนดอีกครั้ง เพื่อยืนยันว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับไม่ต่ำกว่าค่าขั้นต่ำที่กำหนด

$$R_{line/km} = R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2} \tag{4.7}$$

$$R_{m,n} = d_{m,n} \times R_{line/km} \tag{4.8}$$

$$d_{sh,max} = \frac{V_{sh,nor} - V_{sh,min}}{I_{tr,max}(R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2})} \quad ; d_{sh,i} \le d_{sh,max} \tag{4.9}$$

เมื่อทราบเซตของขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS และสถานีไฟฟ้าบริเวณนั้น กำหนดให้มีจำนวนรถไฟฟ้าเป็น N_{tr} และจำนวนสถานีไฟฟ้าเป็น N_{TSS} แบบจำลองจะสร้างระบบสมการโนดของวงจรย่อย เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของวงจรย่อย แสดงดังสมการที่ 4.10

$$V = \begin{bmatrix} V_{ESTS} & V_{TSS,1} & \cdots & V_{TSS,N_{TSS}} & V_{tr,1} & \cdots & V_{tr,N_{tr}} \end{bmatrix}^T \tag{4.10}$$

เมทริกซ์ความนำไฟฟ้าของวงจรย่อยมีรูปทั่วไปดังสมการที่ 4.11 โดยสมาชิกในแนวทแยงหลักเป็นผลรวมของความนำไฟฟ้าทุกแบบที่ต่อกับโนดนั้น และสมาชิกนอกแนวทแยงมีค่าเป็นลบของความนำไฟฟ้าระหว่างโนดที่เชื่อมกัน

$$G = \begin{bmatrix}
g_{ESTS} + g_{self} + \sum_{j=1}^{N_{TSS}} g_{TSS,j} + \sum_{i=1}^{N_{tr}} g_{tr,i} & -g_{ESTS,TSS,1} & \cdots & -g_{ESTS,TSS,N_{TSS}} & -g_{ESTS,tr,1} & \cdots & -g_{ESTS,tr,N_{tr}} \\
-g_{ESTS,TSS,1} & g_{ESTS,TSS,1} + \sum_{i=1}^{N_{tr}} g_{TSS,j,tr,i} & \cdots & 0 & -g_{TSS,1,tr,1} & \cdots & -g_{TSS,1,tr,N_{tr}} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
-g_{ESTS,TSS,N_{TSS}} & 0 & \cdots & g_{ESTS,TSS,N_{TSS}} + \sum_{i=1}^{N_{tr}} g_{TSS,j,tr,i} & -g_{TSS,N_{TSS},tr,1} & \cdots & -g_{TSS,N_{TSS},tr,N_{tr}} \\
-g_{ESTS,tr,1} & -g_{TSS,1,tr,1} & \cdots & -g_{TSS,N_{TSS},tr,1} & g_{tr,1} + g_{ESTS,tr,1} + \sum_{j=1}^{N_{TSS}} g_{TSS,j,tr,1} & \cdots & 0 \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
-g_{ESTS,tr,N_{tr}} & -g_{TSS,1,tr,N_{tr}} & \cdots & -g_{TSS,N_{TSS},tr,N_{tr}} & 0 & \cdots & g_{tr,N_{tr}} + g_{ESTS,tr,N_{tr}} + \sum_{j=1}^{N_{TSS}} g_{TSS,j,tr,N_{tr}}
\end{bmatrix} \tag{4.11}$$

เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าฉีดมีเพียงโนด ESTS ที่รับกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายวงจรสมมูลนอร์ตัน แสดงดังสมการที่ 4.12

$$I=\begin{bmatrix} I_{eq} & 0 & \cdots & 0 & I_{tr,1} & \cdots & I_{tr,N_{tr}} \end{bmatrix}^T \tag{4.12}$$

จากกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่ทุกโนดของวงจร สามารถจัดรูปเป็นระบบสมการเชิงเส้นในรูปเมทริกซ์ แสดงดังสมการที่ 4.13

$$\boldsymbol{G}\,\boldsymbol{V}=\boldsymbol{I} \tag{4.13}$$

สำหรับการหาผลเฉลยของแบบจำลองจะทำการหาค่าแรงดันไฟฟ้าของทุกโนดในวงจรย่อยโดยการแก้ระบบสมการเชิงเส้นโดยตรง แสดงดังสมการที่ 4.14

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{G}^{-1}\boldsymbol{I} \tag{4.14}$$

จากสมการนี้ต้องหาผลเฉลยร่วมกันหลายค่า โดยคำนวณแบบวนซ้ำจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของ V_i ที่มีผลต่างมากที่สุดระหว่างรอบที่ k และ k +1 จะต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

$$\varepsilon_V^{(k)}=\max\left|V_i^{(k+1)}-V_i^{(k)}\right|<\ 0.001V \tag{4.15}$$

การแก้สมการดังกล่าวเป็นการแก้ระบบสมการเชิงเส้นภายใต้ค่าพารามิเตอร์ของเมทริกซ์ความนำไฟฟ้าและเวกเตอร์กระแสฉีดที่กำหนดไว้ในแต่ละช่วงเวลาการจำลอง โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวพิจารณาจากความต้านทานของเส้นทางไฟฟ้าและค่าภาระโหลดของรถไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง หลังจากได้ค่าแรงดันไฟฟ้าของทุกโนดแล้ว กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากโนด (m) ไปยังโนด (n) สามารถคำนวณได้จากผลต่างแรงดันไฟฟ้าระหว่างโนดทั้งสองหารด้วยความต้านทานของสาขานั้น ดังแสดงในสมการที่ 4.16

$$I_{m,n}=\frac{V_m-V_n}{R_{m,n}} \tag{4.16}$$

กระแสไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าได้รับจริง แรงดันไฟฟ้าตกในเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในเส้นทางคำนวณได้ดังสมการที่ 4.17 – 4.18

$$I_{tr,i} = \frac{P_{tr,i}}{V_{tr,i}} \tag{4.17}$$

$$P_{loss,mn} = I_{m,n}^2 R_{m,n} \tag{4.18}$$

เมื่อ ESTS จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้โหลดต่าง ๆ จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าของ ESTS (ESTS power: P_{ESTS}) มีค่าเท่ากับผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ขั้ว ESTS ที่จ่ายออกสู่โหลดภายนอกกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียภายใน ESTS ค่าพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ใน ESTS (ESTS energy: E_{ESTS}) และค่าสถานะการชาร์จของระบบ (State of Charge: $\%SOC$) ที่คำนวณได้ในแต่ละรอบ ซึ่งมีการรวมผลของกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเข้าไปด้วย เมื่อ Δt คือ ช่วงเวลาของการคำนวณ

$$P_{ESTS} = V_{ESTS} I_{ESTS} + I_{ESTS}^2 R_{ESTS} \tag{4.19}$$

$$E_{ESTS}(t+\Delta t) = E_{ESTS}(t) - \frac{P_{ESTS}(t)\Delta t}{3,600} \tag{4.20}$$

$$\%SOC(t) = \frac{E_{ESTS}(t)}{E_{ESTS,rated}} \times 100 \tag{4.21}$$

นอกจากนี้ พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS ใช้ในหนึ่งช่วงเวลาและการลดลงของสถานะการชาร์จสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 4.22–4.23

$$\Delta E_{ESTS}(t) = \frac{P_{ESTS}(t)\Delta t}{3,600} \tag{4.22}$$

$$\Delta SOC(t) = \frac{\Delta E_{ESTS}(t)}{E_{ESTS,rated}} \times 100 \tag{4.23}$$

โดยแบบจำลองตรวจสอบข้อจำกัดหลักของ ESTS ในแต่ละรอบการคำนวณ ได้แก่ ข้อจำกัดด้านกำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า แรงดันที่รถไฟฟ้า สถานะการชาร์จ และการจัดสรรกำลังไฟฟ้า ในกรณีที่มี ESTS หลายชุด ดังสมการที่ 4.24–4.28

$$P_{ESTS} \leq P_{ESTS,max} \tag{4.24}$$

$$I_{ESTS} \leq I_{ESTS,max} \tag{4.25}$$

$$V_{tr,i} \geq V_{min} \tag{4.26}$$

$$\%SOC \geq \%SOC_{min} \tag{4.27}$$

$$\sum_{i \in \mathbb{S}k} P_{k \to i} \leq P_{tr,i} \tag{4.28}$$

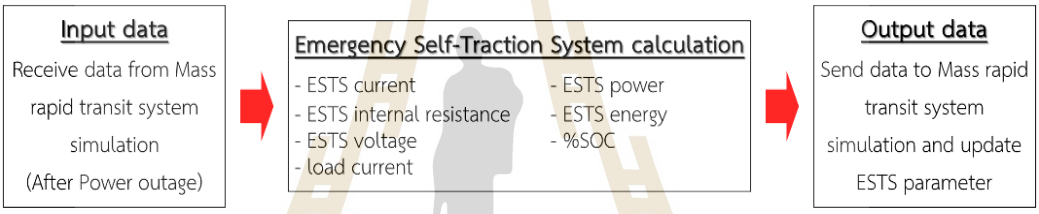
โดยที่ $\mathbb{S}_k$ คือ เซตของ ESTS ที่สามารถจ่ายไฟให้กับรถไฟฟ้าขบวนที่ k และ $P_{k \to i}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ ESTS ขบวนที่ k จ่ายให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ i

จากสมการที่ 4.1–4.28 ข้างต้น ทำให้แบบจำลอง ESTS สามารถพิจารณาเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้ตามตำแหน่งจริงของขบวนรถไฟฟ้า รางที่ขบวนรถไฟฟ้าอยู่ และจุดเชื่อมต่อผ่านสถานีไฟฟ้า วิธีการดังกล่าวทำให้สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสีย พลังงานไฟฟ้าคงเหลือ และสถานะการชาร์จของ ESTS ได้ในแต่ละช่วงเวลา พร้อมทั้งสะท้อนข้อจำกัดด้านระยะทาง แรงดันไฟฟ้าตก และพิกัดของ ESTS ได้อย่างเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบ หากเงื่อนไขใดไม่เป็นไปตามข้อจำกัดข้างต้น แบบจำลองจะปรับจุดทำงานของ ESTS โดยลดระดับแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายสมมูลและแก้สมการโนดใหม่ เพื่อให้ค่ากำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอยู่ภายในข้อจำกัดที่กำหนด

4.3.2 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

โครงสร้างการทำงานของแบบจำลอง ESTS ที่พัฒนาขึ้นมีกระบวนการคำนวณแบบต่อเนื่องตามช่วงเวลาที่กำหนด โดยแบบจำลองจะรับข้อมูลจากแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เช่น ตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้า รางที่ขบวนรถไฟฟ้าอยู่ ความเร็ว โหมดการเคลื่อนที่

กำลังไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับการขับเคลื่อน สถานะของขบวนรถไฟฟ้า สถานะของระบบจ่ายไฟหลัก รวมถึงพลังงานไฟฟ้าคงเหลือ สถานะการชาร์จของ ESTS ในแต่ละขบวน เป็นต้น จากนั้นแบบจำลองจะตรวจสอบสถานะของระบบจ่ายไฟหลักเป็นลำดับแรก หากระบบจ่ายไฟยังทำงานปกติ แบบจำลองจะใช้ผลการคำนวณจากส่วนโครงข่ายระบบจ่ายไฟกระแสตรงตามปกติ แต่เมื่อเกิดสถานการณ์ไฟดับและผ่านช่วงเวลารอคอยตามเงื่อนไขที่กำหนด แบบจำลองจะตรวจสอบว่าขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองหรือไม่ หากขบวนรถไฟฟ้าดังกล่าวยังหยุดอยู่ระหว่างสถานีผู้โดยสารและต้องการกำลังไฟฟ้าสำหรับการเคลื่อนที่ ESTS ของขบวนนั้นจะเข้าสู่โหมดจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเองก่อน โดยโหลดของขบวนรถไฟฟ้าดังกล่าวจะถูกพิจารณาเป็นโหลดที่ต่ออยู่ที่โนดเดียวกับขั้ว ESTS สามารถสรุปการทำงานของแบบจำลองได้ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

หลังจากพิจารณาการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS แล้ว แบบจำลองจะตรวจสอบขบวนรถไฟฟ้าอื่นที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS และยังหยุดค้างอยู่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการรับพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS แต่ละชุดภายในระบบ การพิจารณาดังกล่าวอาศัยระยะทางไฟฟ้าตามโครงสร้างจริงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน กล่าวคือ หาก ESTS และขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้าอยู่บนรางเดียวกัน จะใช้ระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้าโดยตรง แต่หากอยู่คนละราง จะพิจารณาเส้นทางการส่งพลังงานผ่านจุดเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าที่ให้ระยะทางรวมต่ำที่สุด เมื่อได้ระยะทางไฟฟ้าแล้ว แบบจำลองจะเปรียบเทียบกับระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดตามสมการที่ 4.9 หากระยะทางดังกล่าวไม่เกินค่าที่กำหนด ขบวนรถไฟฟ้านั้นจึงจะถูกนำเข้าสู่วงจรย่อยของ ESTS เพื่อใช้ในการสร้างสมการโนดด้วยวิธี CIM โดยสถานีไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องจะทำหน้าที่เป็นโนดเชื่อมต่อทางไฟฟ้าในวงจรย่อย แต่ไม่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในกรณีไฟฟ้าขัดข้อง ในกรณีที่ขบวนรถไฟฟ้าอยู่ในระยะที่สามารถรับพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ได้มากกว่าหนึ่งชุด แบบจำลองจะจัดสรรกำลังไฟฟ้าระหว่าง ESTS แต่ละชุดตามสมการที่ 4.28

โดยคำนึงถึงกำลังไฟฟ้าสูงสุด กระแสไฟฟ้าสูงสุด พลังงานไฟฟ้าคงเหลือ และสถานะการชาร์จของแต่ละชุด เพื่อให้กำลังไฟฟ้ารวมที่จัดสรรให้รถไฟฟ้าผู้รับไม่เกินความต้องการกำลังไฟฟ้าของขบวนนั้น และไม่ทำให้ ESTS ชุดใดทำงานเกินข้อจำกัดที่กำหนดไว้

เมื่อได้ผลการจัดสรรกำลังไฟฟ้าแล้ว แบบจำลองจะสร้างวงจรย่อยสำหรับ ESTS แต่ละชุด โดยประกอบด้วยวงจรสมมูลของ ESTS ความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟ ความต้านทานของเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และโหลดสมมูลของรถไฟฟ้า จากนั้นจึงสร้างสมการโนดในรูป $\boldsymbol{G}\,\boldsymbol{V}=\boldsymbol{I}$ ตามสมการที่ 4.13 และแก้ระบบสมการเชิงเส้นโดยตรง เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว ESTS และแรงดันไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนได้รับจริง หลังจากนั้น แบบจำลองจะคำนวณค่าทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องตามสมการที่ 4.14–4.23 ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าตก กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าได้รับ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในเส้นทาง กำลังไฟฟ้าที่ขั้ว ESTS พลังงานไฟฟ้าคงเหลือ และสถานะการชาร์จ แล้วตรวจสอบข้อจำกัดการทำงานตามสมการที่ 4.24–4.27 หากพบว่ากำลังไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเกินพิกัด แบบจำลองจะปรับจุดทำงานและแก้สมการใหม่ แต่หากข้อจำกัดเกิดจากพลังงานไฟฟ้าคงเหลือต่ำเกินไปหรือระยะทางเกินขอบเขต แบบจำลองจะบันทึกสถานะดังกล่าวเป็นข้อจำกัดของการทำงานในกรณีทดสอบนั้น ผลลัพธ์ทั้งหมดจะถูกส่งกลับไปยังแบบจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า และแบบจำลองหลักจะเลื่อนไปยังช่วงเวลาถัดไปจนกว่าจะสิ้นสุดเงื่อนไขการจำลอง โดยลำดับการทำงานของแบบจำลองในแต่ละช่วงเวลาสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ลำดับการทำงานของแบบจำลอง ESTS ในแต่ละช่วงเวลาการจำลอง

ลำดับ	ขั้นตอน	รายละเอียด
1	เริ่มต้นแต่ละช่วงเวลา	กำหนดเวลาและอ่านค่าตัวแปรสถานะล่าสุด
2	รับข้อมูลจากแบบจำลองรถไฟฟ้า	รับตำแหน่ง รางที่รถไฟฟ้าอยู่ ความเร็ว โหมดการเคลื่อนที่ กำลังไฟฟ้าที่ต้องการ สถานะไฟดับ และสถานะ ESTS
3	ตรวจสอบสถานะระบบจ่ายไฟหลัก	หากปกติคำนวณแบบสถานีไฟฟ้า แต่หากไฟดับใช้การคำนวณแบบ ESTS
4	ระบุ ESTS และรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า	เลือกขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS และขบวนรถไฟฟ้าที่หยุดค้าง
5	คำนวณระยะแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	คำนวณระยะทางของแต่ละโนดตามเงื่อนไขมาตรฐานที่กำหนด

ตารางที่ 4.5 ลำดับการทำงานของแบบจำลอง ESTS ในแต่ละช่วงเวลาการจำลอง (ต่อ)

ลำดับ	ขั้นตอน	รายละเอียด
6	ตรวจสอบเงื่อนไขระยะแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	ตัดขบวนรถไฟฟ้าที่อยู่นอกขอบเขตการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า สมการที่ 4.9
7	จัดสรรกำลังไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้าตามความต้องการของโหลด สมการที่ 4.28
8	สร้างวงจรย่อย ESTS	อาศัยข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนลำดับที่ 5–6 มาสร้าง
9	แก้สมการ $\boldsymbol{G}\,\boldsymbol{V}=\boldsymbol{I}$	หาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว ESTS และขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า สมการที่ 4.16–4.18
10	คำนวณผลลัพธ์ทางไฟฟ้า	หากระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และ SOC สมการที่ 4.19–4.23
11	ตรวจสอบข้อจำกัด	ข้อจำกัดของ ESTS สมการที่ 4.24–4.28
12	ส่งผลกลับและปรับรอบการคำนวณ	อัปเดตการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าและปรับรอบการคำนวณไป $t+\Delta t$

4.3.3 ตัวอย่างการคำนวณการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS

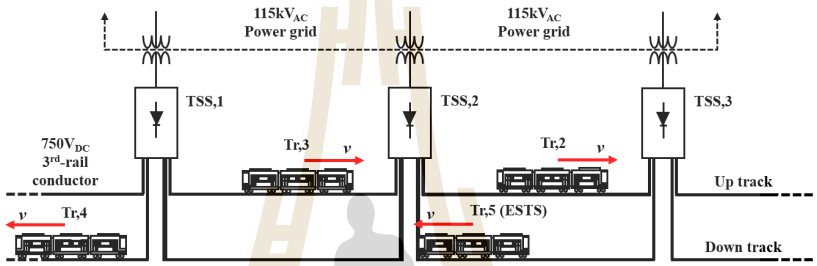
หัวข้อนี้นำเสนอตัวอย่างการคำนวณการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS ด้วยวิธีการฉีดกระแส เพื่อแสดงขั้นตอนการสร้างสมการโนด การกำหนดเมทริกซ์ความนำไฟฟ้า การแก้สมการแรงดันไฟฟ้า และการตรวจสอบข้อจำกัดของ ESTS อย่างเป็นระบบ ตัวอย่างนี้ใช้ข้อมูลจากผลการจำลอง กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25% ในช่วงรอบการทดสอบที่ 18 ณ เวลา 2,776 วินาที โดยในช่วงเวลาดังกล่าว ESTS ของรถไฟฟ้าขบวนที่ 5 ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่รถไฟฟ้าขบวนที่ 2 3 และ 4 โดยสำหรับกรณีตัวอย่างนี้ แบบจำลองพิจารณาวงจรย่อยเฉพาะบริเวณที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.26–4.27 โดยสถานีจ่ายไฟที่อยู่ในวงจรย่อยประกอบด้วยโนดสถานีไฟฟ้า TSS,1 TSS,2 และ TSS,3 ทั้งนี้ TSS,2 อยู่ในตำแหน่งเดียวกับ ESTS ของรถไฟฟ้าขบวนที่ 8 จึงสามารถรวมเป็นโนดเดียวกันได้ และกำหนดให้เป็นโนด TSS,2/ESTS นอกจากนี้ กรณีไฟฟ้าขัดข้องจะทำให้สถานีจ่ายไฟ TSS,1–TSS,3 ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟหลัก จึงไม่มีกระแสไฟฟ้าฉีดจากสถานีจ่ายไฟเข้าสู่วงจรย่อย จะได้

$$V_{TSS,2/ESTS} = V_{TSS,2} = V_{ESTS}$$

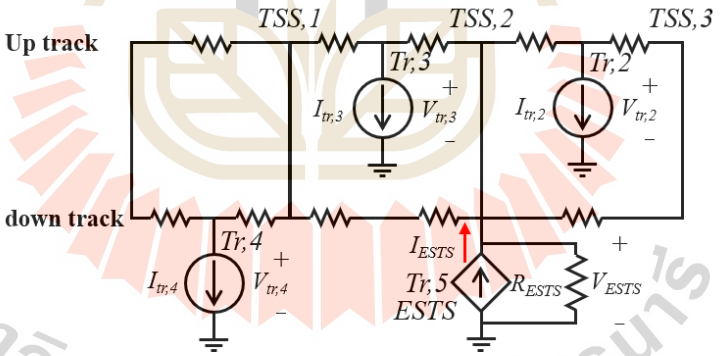
และ

$$I_{TSS,1} = I_{TSS,2} = I_{TSS,3} = 0$$

อย่างไรก็ตาม แรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟเหล่านี้ไม่ได้ถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ แต่เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าที่ได้จากการแก้สมการโนดด้วยวิธี CIM เช่นเดียวกับโนดอื่น ๆ ในวงจร เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการคำนวณ แสดงดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.26 ตัวอย่างเส้นทางการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS



รูปที่ 4.27 วงจรย่อยการคำนวณตัวอย่างการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลเริ่มต้นของกรณีตัวอย่าง

รายการ	ค่า (หน่วย)
V_{ref}	750V
V_{min}	500V
V_{OC}	750V

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลเริ่มต้นของกรณีตัวอย่าง (ต่อ)

รายการ	ค่า (หน่วย)
R_{ESTS}	0.0125Ω
$P_{ESTS,max}$	2,700kW
$I_{ESTS,max}$	3,590A
$R_{cond/km}$	0.05Ω/km
$R_{rail/km}$	0.02Ω/km
E_{rated}	195kWh

จากวงจรสมมูลนอร์ตันของ ESTS จะสามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าสมมูลของแหล่งจ่ายไฟจาก

$$I_{eq} = V_{OC} \div R_{ESTS}$$
$$= 750 \div 0.0125 = 60{,}000\text{A}$$

ทั้งนี้ I_{eq} ในสมการเป็นกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟในแบบจำลองสมมูลนอร์ตันไม่ใช่กระแสไฟฟ้าโหลดที่ ESTS จ่ายออกไปยังขบวนรถไฟฟ้าโดยตรง กระแสไฟฟ้าโหลด I_{ESTS} ที่ ESTS จ่ายจริงจะหาได้จากการแก้สมการโนดของวงจรย่อยในขั้นตอนถัดไป โดยในสถานการณ์ที่พิจารณากำหนดให้ขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ได้อพยพถึงสถานีผู้โดยสารแล้ว จึงไม่ต้องรับพลังงานไฟฟ้าสำหรับการขับเคลื่อนตนเองในช่วงเวลาที่พิจารณา นอกจากนี้ รถไฟฟ้าขบวนใดที่จะรับพลังงานไฟฟ้า จะต้องมีระยะห่างสูงสุดไม่เกิน 3.47 กิโลเมตร จาก ESTS บนรถไฟฟ้าขบวนที่ 5 ดังที่แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข. หากมีระยะทางไฟฟ้ามากกว่าค่านี้ แบบจำลองจะไม่นำรถไฟฟ้าขบวนนั้นเข้าสู่วงจรย่อยของ ESTS เนื่องจากมีความเสี่ยงที่แรงดันไฟฟ้าปลายทางจะต่ำกว่าค่าที่กำหนด

$$I_{tr,self} = 0$$

สำหรับกรณีตัวอย่างนี้ รถไฟฟ้าขบวนที่ 4 อยู่บนรางเดียวกับ ESTS ของรถไฟฟ้าขบวนที่ 5 จึงใช้ระยะทางตรงระหว่างตำแหน่งรถไฟฟ้าในการคำนวณ ส่วนรถไฟฟ้าขบวนที่ 2 และขบวนที่ 3 อยู่คนละราง จึงพิจารณาเส้นทางผ่านสถานีไฟฟ้าจุดที่ 2 โดยในกรณีนี้ตำแหน่งของ ESTS

ของรถไฟฟ้าขบวนที่ 5 ตรงกับตำแหน่งของสถานีไฟฟ้าดังกล่าว ทำให้ระยะทางของรถไฟฟ้าขบวนที่ 2 และ 3 มีค่าเท่ากับระยะจากสถานีไฟฟ้าไปยังตำแหน่งของรถไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตำแหน่งและระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

ขบวนรถไฟฟ้า	ตำแหน่งขบวนรถไฟฟ้า (km)	บทบาทในวงจรย่อย/รูปแบบเส้นทาง
TSS,1	0.565	โนดเชื่อมต่อ
TSS,2/ESTS	3.184	จ่ายพลังงานไฟฟ้า/โนดเชื่อมต่อ
TSS,3	6.219	โนดเชื่อมต่อ
Tr,4	0.130	รับพลังงานไฟฟ้า/รางเดียวกับ ESTS
Tr,3	1.480	รับพลังงานไฟฟ้า/คนละราง ผ่าน TSS
Tr,2	4.470	รับพลังงานไฟฟ้า/คนละราง ผ่าน TSS

ความต้านทานสมมูลต่อระยะทางของเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานต่อหน่วยระยะทางของรางตัวนำและรางวิ่ง เท่ากับ 0.05 และ 0.02 โอห์มต่อกิโลเมตร ตามลำดับ โดยความต้านทานและความนำไฟฟ้าของแต่ละเส้นทางในวงจรย่อยคำนวณได้จากระยะทางระหว่างโนดที่เชื่อมต่อกัน แสดงดังตารางที่ 4.8

$$R_{line/km} = R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2}$$

$$= 0.05 + (0.02 \div 2) = 0.06\Omega/\text{km}$$

จาก

$$R_{m,n} = d_{m,n} \times R_{line/km} \quad \text{และ} \quad g_{m,n} = 1 \div R_{m,n}$$

จะได้ ความต้านทานและความนำไฟฟ้าของเส้นทาง TSS,1 - TSS,2/ESTS

$$d_{TSS,1,TSS,2/ESTS} = 3.184 - 0.565 = 2.619\text{km}$$

$$R_{TSS,1,TSS,2/ESTS} = 2.619 \times 0.06 = 0.157\Omega$$

$$g_{TSS,1,TSS,2/ESTS} = 1 \div 0.157 = 6.364S$$

ความต้านทานและความนำไฟฟ้าของเส้นทาง TSS,2/ESTS - TSS,3

$$d_{TSS,2/ESTS,TSS,3} = 6.219 - 3.184 = 3.035\text{km}$$
$$R_{TSS,2/ESTS,TSS,3} = 3.035 \times 0.06 = 0.182\Omega$$
$$g_{TSS,2/ESTS,TSS,3} = 1 \div 0.182 = 5.492S$$

ความต้านทานและความนำไฟฟ้าของเส้นทาง TSS,1 – Tr,4

$$d_{TSS,1,Tr,4} = 0.565 - 0.130 = 0.435\text{km}$$
$$R_{TSS,1,Tr,4} = 0.435 \times 0.06 = 0.026\Omega$$
$$g_{TSS,1,Tr,4} = 1 \div 0.026 = 38.314S$$

ความต้านทานและความนำไฟฟ้าของเส้นทาง TSS,1 – Tr,3

$$d_{TSS,1,Tr,3} = 1.480 - 0.565 = 0.915\text{km}$$
$$R_{TSS,1,Tr,3} = 0.915 \times 0.06 = 0.055\Omega$$
$$g_{TSS,1,Tr,3} = 1 \div 0.055 = 18.215S$$

ความต้านทานและความนำไฟฟ้าของเส้นทาง Tr,3 - TSS,2/ESTS

$$d_{Tr,3,TSS,2/ESTS} = 3.184 - 1.480 = 1.704\text{km}$$
$$R_{Tr,3,TSS,2/ESTS} = 1.704 \times 0.06 = 0.1022\Omega$$
$$g_{Tr,3,TSS,2/ESTS} = 1 \div 0.102 = 9.781S$$

ความต้านทานและความนำไฟฟ้าของเส้นทาง TSS,2/ESTS - Tr,2

$$d_{TSS,2/ESTS,Tr,2} = 4.470 - 3.184 = 1.286\text{km}$$
$$R_{TSS,2/ESTS,Tr,2} = 1.286 \times 0.06 = 0.077\Omega$$
$$g_{TSS,2/ESTS,Tr,2} = 1 \div 0.077 = 12.960S$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ความต้านทานและความนำไฟฟ้าของเส้นทาง Tr,2 - TSS,3

$$d_{Tr,\,2,TSS,3} = 6.219 - 4.470 = 1.749\text{km}$$

$$R_{Tr,\,2,TSS,3} = 1.749 \times 0.06 = 0.105\Omega$$

$$g_{Tr,\,2,TSS,3} = 1 \div 0.105 = 9.529S$$

ตารางที่ 4.8 ความต้านทานของแต่ละเส้นทางในวงจรย่อย

เส้นทาง	ระยะทาง (km)	$R_{m,n}$ (Ω)	$g_{m,n} = 1/R_{m,n}$ (S)
TSS,1 - TSS,2/ESTS	2.619	0.157	6.364
TSS,2/ESTS – TSS,3	3.035	0.182	5.492
TSS,1 – Tr,4	0.435	0.026	38.314
TSS,1 – Tr,3	0.915	0.055	18.215
Tr,3 - TSS,2/ESTS	1.704	0.102	9.781
TSS,2/ESTS – Tr,2	1.286	0.077	12.960
Tr,2 - TSS,3	1.749	0.105	9.529

จากค่าความต้านทานที่ได้ข้างต้น ค่าความนำไฟฟ้าของแต่ละองค์ประกอบในวงจรย่อยสามารถคำนวณได้ เริ่มจากความนำไฟฟ้าภายในของ ESTS

$$g_{ESTS} = \frac{1}{R_{ESTS}}$$

$$= 1 \div 0.0125 = 80S$$

จากข้อมูลความต้องการกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนที่รับมาจากแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระยะทางระหว่าง ESTS กับขบวนรถไฟฟ้า จะสามารถกำหนดจัดสรรกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้าแต่ละขบวน ได้แก่ รถไฟฟ้าขบวนที่ 2 เท่ากับ 344.53 กิโลวัตต์ รถไฟฟ้าขบวนที่ 3 เท่ากับ 461.69 กิโลวัตต์ และรถไฟฟ้าขบวนที่ 4 เท่ากับ 93.77 กิโลวัตต์ สามารถแปลงเป็นความต้านทานโหลดสมมูลที่แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 750 โวลต์ ตามสมการ โดยความต้านทานของแต่ละเส้นทางในวงจรย่อยคำนวณได้จากระยะทางระหว่างโนดที่เชื่อมต่อกัน ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$g_{tr,i} = \frac{P_{tr,i}}{V_{ref}^2}$$

จะได้

$$R_{tr,2} = (344.531 \times 10^3) \div 750^2 = 0.612\Omega$$

$$R_{tr,3} = (461.690 \times 10^3) \div 750^2 = 0.821\Omega$$

$$R_{tr,4} = (93.779 \times 10^3) \div 750^2 = 0.167\Omega$$

จากค่าความนำไฟฟ้าที่ได้ทั้งหมดนำไปคำนวณพจน์ย่อยต่าง ๆ สำหรับสร้าง G ที่มีขนาด 6×6 ตามจำนวนบัส ดังต่อไปนี้

$$G_{1,1} = g_{TSS,1,TSS,2/ESTS} + g_{TSS,1,Tr,4} + g_{TSS,1,Tr,3}$$
$$= 6.364 + 38.314 + 18.215$$
$$= 62.893$$

$$G_{2,2} = g_{TSS,1,TSS,2/ESTS} + g_{TSS,2/ESTS,TSS,3} + g_{TSS,2,Tr,2} + g_{TSS,2,Tr,3} + g_{ESTS}$$
$$= 6.364 + 5.492 + 12.960 + 9.781 + 80$$
$$= 114.596$$

$$G_{3,3} = g_{TSS,2/ESTS,TSS,3} + g_{TSS,3,Tr,2}$$
$$= 5.492 + 9.529$$
$$= 15.021$$

$$G_{4,4} = g_{TSS,1,Tr,4} + g_{Tr,4}$$
$$= 38.314 + 0.167$$
$$= 38.481$$

$$G_{5,5} = g_{TSS,1,Tr,3} + g_{TSS,2,Tr,3} + g_{Tr,3}$$
$$= 18.215 + 9.781 + 0.821$$
$$= 28.817$$

$$G_{6,6} = g_{TSS,2,Tr,2} + g_{TSS,3,Tr,2} + g_{Tr,2}$$
$$= 12.960 + 9.529 + 0.612$$
$$= 23.101$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดังนั้น เมทริกซ์ ***G*** คือ

$$G = \begin{bmatrix} 62.893 & -6.364 & 0 & -38.314 & -18.215 & 0 \\ -6.364 & 114.596 & -5.492 & 0 & -9.781 & -12.960 \\ 0 & -5.492 & 15.021 & 0 & 0 & -9.529 \\ -38.314 & 0 & 0 & 38.481 & 0 & 0 \\ -18.215 & -9.781 & 0 & 0 & 28.817 & 0 \\ 0 & -12.960 & -9.529 & 0 & 0 & 23.101 \end{bmatrix} S$$

<u>รอบที่ 0</u>: กำหนดค่าเริ่มต้นไปแทนในสมการ ***V*** และ ***I*** ที่โหลดรถไฟฟ้ายังไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า จะได้

$$V^{(0)} = \begin{bmatrix} V_{TSS,1} \\ V_{TSS,2/ESTS} \\ V_{TSS,3} \\ V_{Tr,4} \\ V_{Tr,3} \\ V_{Tr,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 750 \\ 750 \\ 750 \\ 750 \\ 750 \\ 750 \end{bmatrix}$$

หาค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน

$$I_{tr,4}^{(0)} = P_{tr,4} \div V_{tr,4}^{(0)} = (93.779 \times 10^3) \div 750 = 125.039\text{A}$$
$$I_{tr,3}^{(0)} = P_{tr,3} \div V_{tr,3}^{(0)} = (461.690 \times 10^3) \div 750 = 615.587\text{A}$$
$$I_{tr,2}^{(0)} = P_{tr,2} \div V_{tr,2}^{(0)} = (344.531 \times 10^3) \div 750 = 459.375\text{A}$$

ดังนั้น

$$I^{(0)} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{eq} \\ 0 \\ -I_{tr,4}^{(0)} \\ -I_{tr,3}^{(0)} \\ -I_{tr,2}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 60,000 \\ 0 \\ -125.039 \\ -615.587 \\ -459.375 \end{bmatrix}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<u>รอบที่1</u>: เมื่อแก้ระบบสมการเชิงเส้นดังกล่าว จะได้

$$\boldsymbol{GV^{(1)} = I^{(0)}}$$

จะได้

$$V^{(1)} = \begin{bmatrix} 693.707 \\ 735.00 \\ 717.277 \\ 690.433 \\ 686.145 \\ 707.064 \end{bmatrix}$$

ค่าความคลาดเคลื่อนแรงดันไฟฟ้ากำหนดเป็น

$$\begin{aligned} \varepsilon_V^{(1)} &= \max\left|V_i^{(k)} - V_i^{(k-1)}\right| \\ &= \max|686.145 - 750| \\ &= 63.855 > 0.001 \end{aligned}$$

$$I_{tr,4}^{(1)} = P_{tr,4} \div V_{tr,4}^{(1)} = (93.779 \times 10^3) \div 690.443 = 135.824\text{A}$$

$$I_{tr,3}^{(1)} = P_{tr,3} \div V_{tr,3}^{(1)} = (461.690 \times 10^3) \div 686.145 = 672.875\text{A}$$

$$I_{tr,2}^{(1)} = P_{tr,2} \div V_{tr,2}^{(1)} = (344.531 \times 10^3) \div 707.064 = 487.270\text{A}$$

ดังนั้น

$$I^{(0)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 60,000 \\ 0 \\ -135.824 \\ -672.875 \\ -487.270 \end{bmatrix}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เนื่องจาก ค่าความคลาดเคลื่อนแรงดันไฟฟ้าเกินค่าที่กำหนด จึงต้องหาค่า $\boldsymbol{I}^{(1)}$ สำหรับรอบการคำนวณถัดไปด้วยการนำค่า $\boldsymbol{V}$ เข้ามาช่วยปรับ $\boldsymbol{I}$ จนกว่าคำตอบจะลู่เข้า

ตารางที่ 4.9 สรุปการหาผลเฉลยในแต่ละรอบ

รอบ	$I_{tr,4}^{(k)}$ (A)	$I_{tr,3}^{(k)}$ (A)	$I_{tr,2}^{(k)}$ (A)	$V_{TSS,1}^{(k+1)}$ (V)	$V_{TSS,2/ESTS}^{(k+1)}$ (V)	$V_{TSS,3}^{(k+1)}$ (V)	$V_{tr,4}^{(k+1)}$ (V)	$V_{tr,3}^{(k+1)}$ (V)	$V_{tr,2}^{(k+1)}$ (V)	ε_V
0	125.039	615.587	459.375	693.707	735.000	717.277	690.443	686.145	707.064	63.855
1	135.824	672.875	487.270	688.731	733.800	715.002	685.186	680.442	704.168	5.703
2	136.866	678.515	489.274	688.253	733.692	714.816	684.680	679.891	703.938	0.551
3	136.968	679.064	489.434	688.206	733.682	714.799	684.632	679.838	703.918	0.053
4	136.977	679.117	489.448	688.202	733.681	714.798	684.627	679.833	703.916	0.005
5	136.978	679.123	489.449	688.201	733.681	714.798	684.626	679.833	703.916	0.0005

การคำนวณลู่เข้าใน รอบที่ 8 โดยผลสุดท้ายของค่าแรงดันไฟฟ้า คือ

$$V = \begin{bmatrix} 688.201 \\ 736.359 \\ 714.798 \\ 684.626 \\ 679.833 \\ 703.916 \end{bmatrix}$$

ผลเฉลยดังกล่าวแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าของโนดต่าง ๆ ในวงจรย่อย โดยค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเกิดขึ้นที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 3 ซึ่งเป็นขบวนที่อยู่คนละรางและมีระยะทางไฟฟ้ามากที่สุด หลังจากทราบค่าแรงดันไฟฟ้าแล้วหากระแสไฟฟ้าที่ไหลไปยังรถไฟฟ้าต่าง ๆ คำนวณจาก

$$I_{tr,i} = \frac{P_{tr,i}}{V_{tr,i}}$$

จะได้

$$I_{tr,2} = (344.531 \times 10^3 \div 703.916) = 489.449\text{A}$$

$$I_{tr,3} = (461.690 \times 10^3 \div 679.833) = 679.123\text{A}$$

$$I_{tr,4} = (93.799 \times 10^3 \div 684.626) = 136.978\text{A}$$

กระแสไฟฟ้าของ ESTS คำนวณจากความสัมพันธ์ของวงจรสมมูลนอร์ตัน

$$I_{ESTS} = I_{eq} - \frac{V_{ESTS}}{R_{ESTS}}$$

$$= 60{,}000 - (736.029 \div 0.0125) = 1{,}117.680\text{A}$$

กำลังไฟฟ้าที่ขั้ว ESTS คำนวณจาก

$$P_{ESTS} = V_{ESTS} I_{ESTS} + I_{ESTS}^2 R_{ESTS}$$

$$= (736.029 \times 1{,}117.680) - (1{,}117.680^2 \times 0.0125)$$

$$= 807.030\text{kW}$$

หากกำหนดให้ช่วงเวลาการคำนวณของแบบจำลองในกรณีนี้เท่ากับ Δt = 1 วินาที พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS จ่ายออกในช่วงเวลานี้คำนวณได้จาก

$$\Delta E_{ESTS} = \frac{P_{ESTS} \Delta t}{3{,}600}$$

$$= (807.030 \times 1) \div 3{,}600 = 0.224\text{kWh}$$

เมื่อกำหนดความจุพลังงานไฟฟ้าพิกัดของ ESTS เท่ากับ E_{rated} = 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง การลดลงของสถานะการชาร์จในช่วงเวลานี้คำนวณได้จาก

$$\Delta SOC = \frac{\Delta E_{ESTS}}{E_{rated}} \times 100$$

$$= (0.224 \div 195) \times 100 = 0.12\%$$

ดังนั้น ในช่วงเวลาการคำนวณนี้ ESTS ขบวนที่ 5 ใช้พลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ประมาณ 0.224 กิโลวัตต์ชั่วโมง และทำให้ SOC ลดลงประมาณ 0.12% ของความจุพิกัด ทั้งนี้ ค่านี้เป็นการเปลี่ยนแปลงเฉพาะหนึ่งช่วงเวลาการคำนวณ ไม่ใช่ค่า SOC สะสมตั้งแต่เริ่มสถานการณ์ไฟดับ นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบข้อจำกัดการทำงานของ ESTS ตามสมการที่ 4.24 – 4.27 ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS

$$P_{ESTS} \leq P_{ESTS,max}$$
$$807.03 \leq 2{,}700\text{kW}$$

กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ ESTS จ่ายออกได้

$$I_{ESTS} \leq I_{ESTS,max}$$
$$1{,}117.68 \leq 3{,}590\text{A}$$

แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ยอมรับได้ของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน

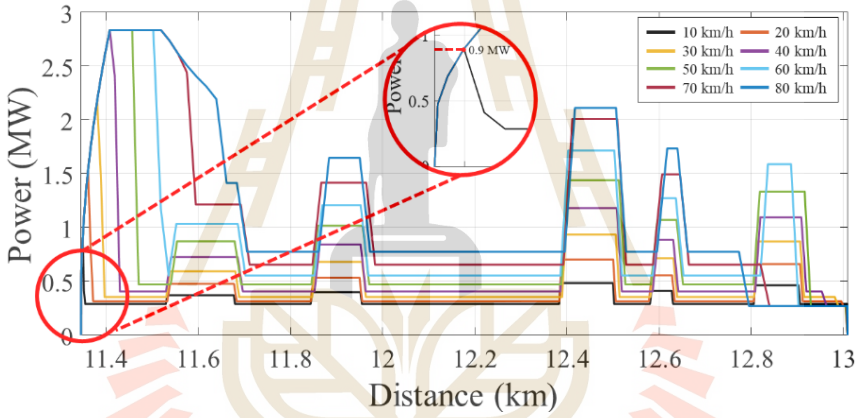
$$V_{tr,i} \geq V_{min}$$
$$V_{tr,2} = 703.916 \geq 500\text{V}$$
$$V_{tr,3} = 679.833 \geq 500\text{V}$$
$$V_{tr,4} = 684.626 \geq 500\text{V}$$

จากผลการคำนวณสามารถสรุปได้ว่า ESTS ที่ติดตั้งอยู่บนรถไฟฟ้าขบวนที่ 5 สามารถแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่รถไฟฟ้าขบวนที่ 2 3 และ 4 ได้ภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดทางไฟฟ้าที่กำหนด โดยแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าผู้รับพลังงานไฟฟ้าทุกขบวนยังคงสูงกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำของระบบ ขณะที่กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ ESTS จ่ายออกไม่เกินพิกัดสูงสุดที่กำหนดไว้ ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ESTS สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองเพื่อสนับสนุนการเคลื่อนที่ฉุกเฉินของรถไฟฟ้าหลายขบวนได้ อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไม่ได้ขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังของ ESTS เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับตำแหน่งของรถไฟฟ้า ระยะทางไฟฟ้าระหว่าง ESTS กับรถไฟฟ้าผู้รับพลังงาน ความต้านทานของเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และโครงสร้างของวงจรย่อยที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละสาขา แรงดันไฟฟ้าตก และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ดังนั้น การประเมินความสามารถในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS จึงจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกันทั้งแรงดันไฟฟ้าของโนด ESTS แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าผู้รับพลังงาน กระแสโหลดรวม ความต้านทานของเส้นทาง ข้อจำกัดด้านกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุด ตลอดจนสถานะการชาร์จของ ESTS ในแต่ละช่วงเวลาการจำลอง

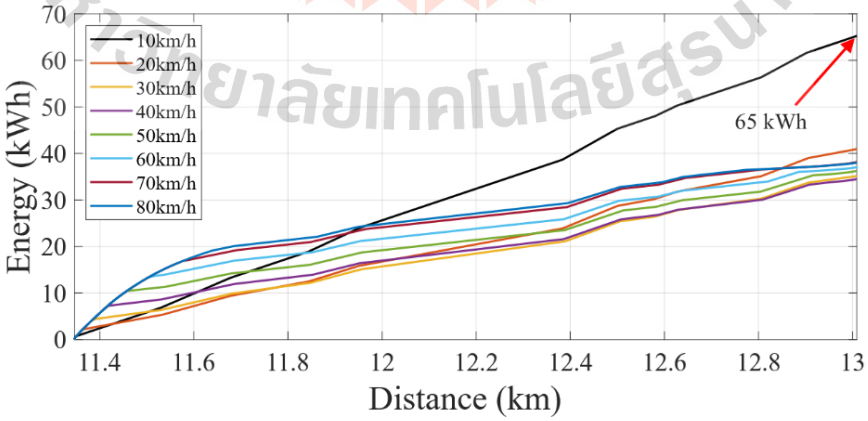
ซึ่งการใช้วิธี CIM ช่วยให้สามารถวิเคราะห์และตรวจสอบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของระบบแบ่งปันพลังงานได้อย่างเป็นระบบ

4.3.4 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

การกำหนดขนาดความจุของ ESTS อ้างอิงผลการจำลองจากหัวข้อที่ 4.2 โดยพิจารณากรณีที่ระบบต้องจ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อขบวนรถไฟฟ้าหยุดอยู่บริเวณกึ่งกลางระหว่างสถานีตลาดพลู–วุฒากาศที่มีระยะห่างมากที่สุด เท่ากับ 1.663 กิโลเมตร ทั้งนี้ การคำนวณอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้าแปรผันตามระยะทางแบบเชิงเส้น เพื่อให้สามารถประมาณพลังงานสำรองที่จำเป็นต่อการเคลื่อนที่ฉุกเฉินได้อย่างเป็นระบบ และสะท้อนกรณีวิกฤตที่ ESTS ต้องรองรับภายใต้เงื่อนไขการหยุดค้างระหว่างสถานีที่มีระยะทางมากที่สุด



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องขับเคลื่อนรถไฟฟ้า



รูปที่ 4.29 การใช้พลังงานไฟฟ้าขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่าง ๆ

สำหรับการออกแบบ ESTS ต้องนำค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าครึ่งช่วงระยะทางของคู่สถานีผู้โดยสารดังกล่าวมาพิจารณา โดยคำนึงถึงขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบต้องรองรับด้วย เนื่องจากกำลังไฟฟ้าส่งผลโดยตรงต่อขนาดของ ESTS ที่ทำการออกแบบ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าต้องการ พบว่าการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าด้วยความเร็ว 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดของขบวนรถไฟฟ้าหนึ่งขบวนไม่เกิน 0.9 เมกะวัตต์ เป็นเวลาไม่เกิน 10 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.28 ขณะที่พลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้สำหรับการเคลื่อนที่ตลอดช่วงระหว่างสถานีผู้โดยสาร เท่ากับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.29 ดังนั้น หากพิจารณาการอพยพไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดจากตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างสถานี พลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำสำหรับรถไฟฟ้าหนึ่งขบวนมีค่าประมาณ 32.5 กิโลวัตต์ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ESTS ไม่ได้พิจารณาเฉพาะกรณีจ่ายไฟให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเองเท่านั้น แต่รวมถึงการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไปยังขบวนรถไฟฟ้าอื่นด้วย ดังนั้น การกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS จึงพิจารณาตามโอกาสของการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่าง ESTS และขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า โดยกำหนดแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าแบบ 1:1 1:2 และ 1:3 กล่าวคือ ESTS หนึ่งชุดต้องรองรับภาระกำลังไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้าจำนวน 1 2 หรือ 3 ขบวน ตามสัดส่วนจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ต่อขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งระบบ เมื่อกำหนดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่รถไฟฟ้าหนึ่งขบวนต้องการสำหรับขับเคลื่อนขณะไฟดับจะมีค่าเท่ากับ 0.9 เมกะวัตต์ ดังนั้น กำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกำหนดพิกัดของ ESTS เท่ากับ 0.9 1.8 และ 2.7 เมกะวัตต์ ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS ตามสัดส่วนการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

สัดส่วนการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	**จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ ESTS ต้องรองรับ (ขบวน)**	**กำลังไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS (MW)**
1:1	1	0.9
1:2	2	1.8
1:3	3	2.7

จากการจำลองระบบ ESTS กำหนดให้พิจารณาระบบในรูปของแบตเตอรี่แพ็คที่เกิดจากการจัดเรียงของเซลล์เพียงอย่างเดียว โดยไม่พิจารณาโครงสร้างอื่น ๆ เพื่อความเรียบง่ายของ

แบบจำลอง การออกแบบขนาดของ ESTS นำค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการสำรองในระบบมาพิจารณาร่วมกับข้อมูลเซลล์แบตเตอรี่ชนิด LTO ตามที่แสดงในตารางที่ 3.9 เป็นกรณีศึกษา โดยแบตเตอรี่ LTO ที่เลือกใช้คือ Toshiba SCiB™ 23Ah ซึ่งเป็นที่นิยมในการใช้งานบนขบวนรถไฟฟ้าด้วยจุดเด่นด้านความปลอดภัย ความทนทานต่อวัฏจักรการใช้งาน และความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูง เมื่อพิจารณาข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่มาประกอบการคำนวณตามหลักการออกแบบแบตเตอรี่พื้นฐาน ดังแสดงในภาคผนวก ก จะได้โครงสร้างของ ESTS ที่สอดคล้องกับพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและความต้องการพลังงานของกรณีศึกษาที่กำหนดไว้ แสดงดังรูปที่ 4.30



Battery pack parameter	Value (Continuous/Peak)			Unit
	ESTS: 1 ขบวน	ESTS: 2 ขบวน	ESTS: 3 ขบวน	
Voltage	750/880	750/880	750/880	V
Capacity	92	184	276	Ah
Current	668/1,200	1,276/2,400	1,914/3,590	A
Power	480/900	960/1,800	1,440/2,700	kW
Energy	69	130	195	kWh
Total cells	1,308 (327S/4P)	2,616 (327S/8P)	3,924 (327S/12P)	cells
Weigh	720	1,438	2,158	kg

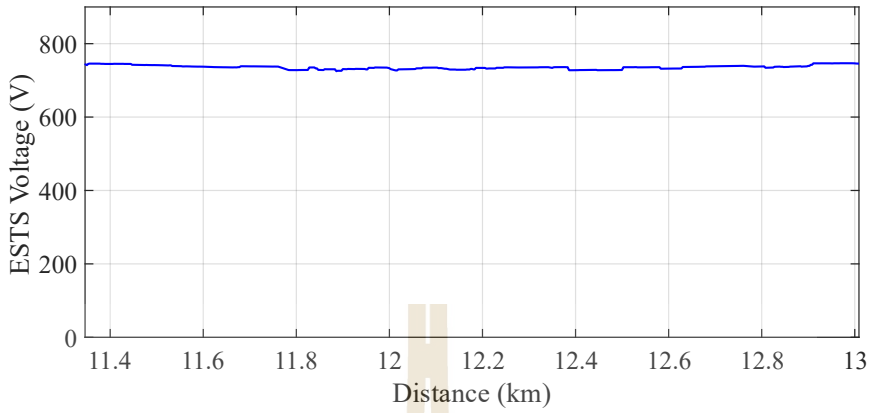
รูปที่ 4.30 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่แพ็ค Toshiba SCiB™ 23Ah

4.3.5 การทดสอบแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

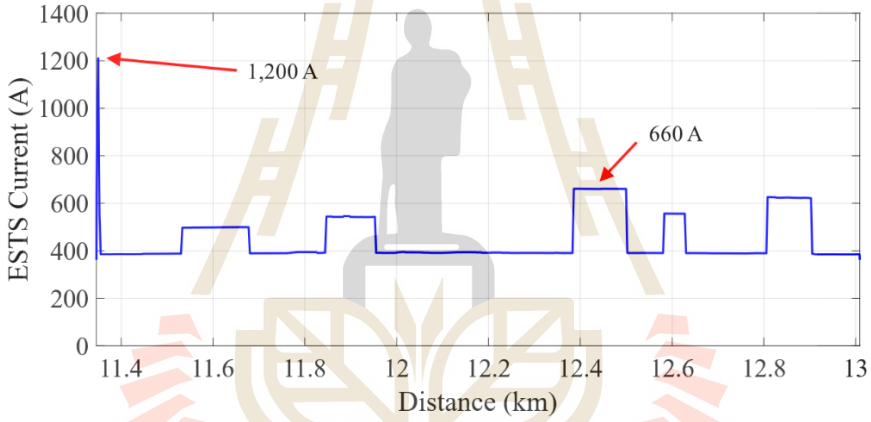
การทดสอบและประเมินสมรรถนะการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการโดยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ การทดสอบการทำงานทั่วไปของแบบจำลอง และการทดสอบผลกระทบหลังจากนำระบบมาติดตั้ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.3.5.1 การทดสอบการทำงานทั่วไปของแบบจำลอง

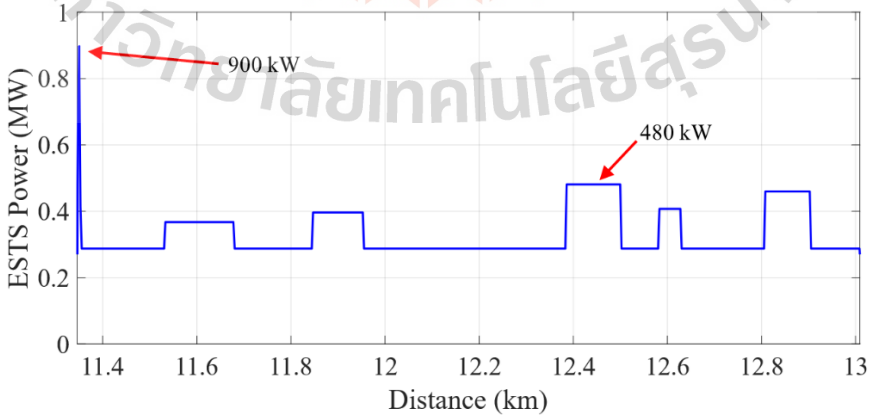
การทดสอบและประเมินผลในส่วนนี้ตรวจสอบพฤติกรรมการทำงานของระบบในแง่ผลตอบสนองของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และสถานะการชาร์จ การจำลองได้พิจารณาผลการทำงานของ ESTS ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าสำหรับการเคลื่อนที่ในบริเวณสถานีตลาดพลู–วุฒากาศ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีระยะทางยาวที่สุดของเส้นทางที่ระบบให้บริการ โดยการจำลองนี้ช่วยยืนยันสมรรถนะและความเหมาะสมของ ESTS ที่เพียงพอต่อการจ่ายไฟให้กับระบบแม้ขบวนรถไฟฟ้าจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณอื่น ๆ ของเส้นทางการให้บริการก็ตาม แสดงดังรูปที่ 4.31-4.35



รูปที่ 4.31 แรงดันไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

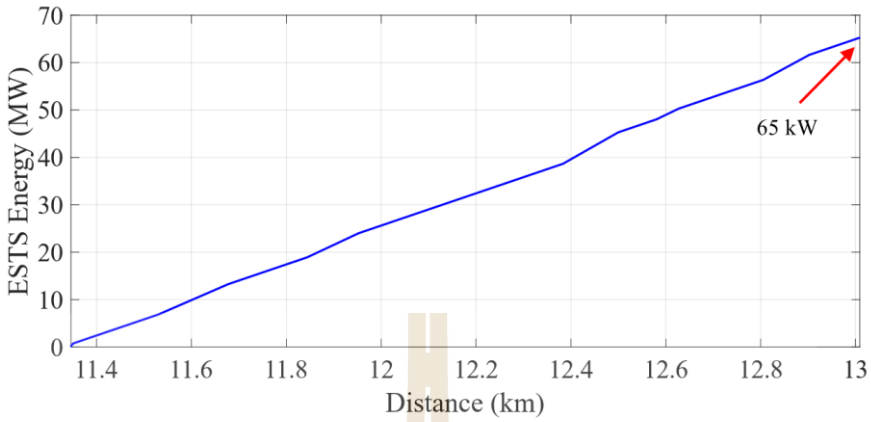


รูปที่ 4.32 กระแสไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

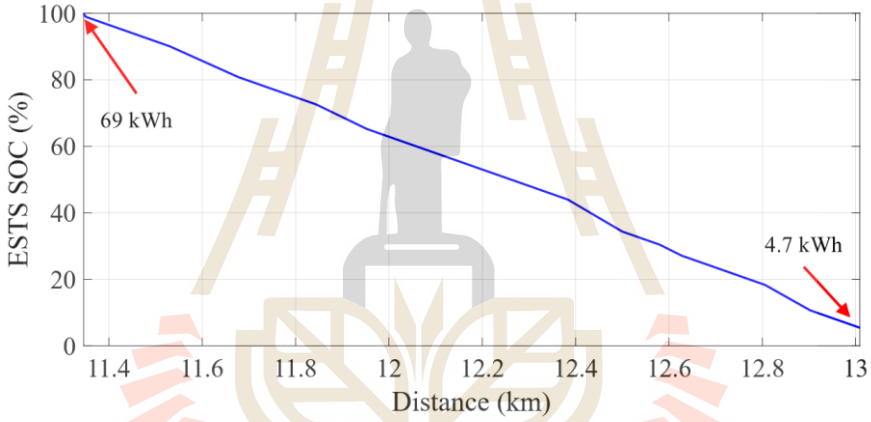


รูปที่ 4.33 กำลังไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.34 พลังงานไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

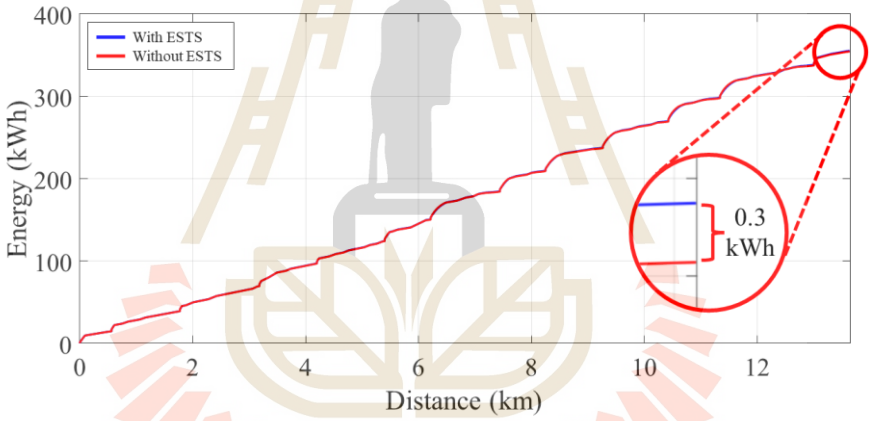


รูปที่ 4.35 สถานะการชาร์จ-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.31–4.35 สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ESTS ที่ออกแบบโดยใช้แบตเตอรี่ LTO ที่เลือกใช้คือ Toshiba SCiB™ 23Ah มีสมรรถนะและขนาดเหมาะสมสำหรับสำรองพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยระบบสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ถึง 1,200 แอมป์ และ 0.9 เมกะวัตต์ ตามลำดับ ซึ่งเพียงพอต่อการรองรับแรงบิดขณะเริ่มต้นเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าโดยไม่เกินค่าพิกัดของแบตเตอรี่ และยังสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ประมาณ 750 โวลต์ ตลอดระยะทางการขับเคลื่อนแม้ในสภาวะโหลดสูงสุดก็ตาม ทั้งนี้ ระบบใช้พลังงานไฟฟ้าไปประมาณ 64.3 จากทั้งหมด 69 กิโลวัตต์ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการจำลอง จึงยืนยันได้ว่าความจุแบตเตอรี่ที่เลือกใช้เพียงพอต่อวัตถุประสงค์การออกแบบ

4.3.5.2 การทดสอบผลกระทบหลังจากนำระบบมาติดตั้ง

เมื่อพิจารณาผลกระทบของน้ำหนัก ESTS ที่ถูกนำไปติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า โดยเฉพาะกรณีสูงสุดที่ออกแบบให้รองรับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าแบบ 1:3 พบว่าน้ำหนักของ ESTS ส่งผลให้ระบบมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจากสถานีผู้โดยสารต้นทางไปสู่สถานีผู้โดยสารปลายทางเพิ่มขึ้นจากระดับที่ใช้ปกติเพียง 0.3 กิโลวัตต์ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.36 เมื่อคิดเป็นสัดส่วนการเพิ่มขึ้นนี้มีค่าน้อยกว่า 1% ซึ่งถือว่าไม่ได้ส่งผลกระทบต่อระบบอย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใด หากเทียบกับประโยชน์ด้านความปลอดภัยและศักยภาพในการอพยพผู้โดยสารในภาวะฉุกเฉินที่ได้รับจากการติดตั้ง ESTS ทั้งนี้ การประเมินดำเนินภายใต้เส้นโครงร่างความเร็วและเวลาเดียวกัน โดยไม่ทำให้รูปแบบการเดินรถเปลี่ยนแปลงจากกรณีอ้างอิงเดิม จึงสรุปได้ว่าผลกระทบด้านพลังงานไฟฟ้าจากน้ำหนักของ ESTS อยู่ในระดับที่ยอมรับได้



รูปที่ 4.36 การใช้พลังงานไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้ากรณีก่อนและหลังการติดตั้ง ESTS

จากการพัฒนาและทดสอบสมรรถนะการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินที่สร้างขึ้นโดยอิงแบบจำลองอย่างง่ายในรูปของวงจรสมมูลนอร์ตัน พบว่าแบบจำลองสามารถแสดงผลการทำงานของ ESTS ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ครอบคลุมถึงพฤติกรรมของพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า อันเป็นตัวแปรหลักที่สนับสนุนการออกแบบและการวิเคราะห์ผลของ ESTS ให้สอดคล้องกับลักษณะของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่เลือกเป็นกรณี ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับนำไปต่อยอดในการศึกษาแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

4.4 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ส่วนนี้นำเสนอแบบจำลองฉบับสมบูรณ์ที่ผนวกแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเข้ากับแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินที่พัฒนาขึ้นในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ โดยสิ่งที่เพิ่มเติมจากหัวข้อก่อนหน้าคือการกำหนดเงื่อนไขสถานการณ์ไฟดับและลำดับการตอบสนองของระบบอย่างเป็นขั้นตอน เพื่อให้แบบจำลองทั้งสองส่วนทำงานประสานกันภายใต้กรอบการจำลองเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อทดสอบสมรรถนะในกรณีที่ ESTS จ่ายไฟให้ขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบและการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ติดตั้ง พร้อมประเมินปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ ESTS ต้องจ่ายและข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบยอมรับได้ กรอบการประเมินยึดข้อมูลการเดินรถจริงของระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม ระหว่างสถานีสนามกีฬาแห่งชาติ–บางหว้า เป็นกรณีศึกษา เพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมการเดินรถและภาระบรรทุกให้สอดคล้องกับสถานการณ์จริงมากที่สุด รายละเอียดเชิงวิธีการ ขั้นตอนการจำลอง พารามิเตอร์ที่ใช้ และผลการทดสอบนำเสนอไว้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

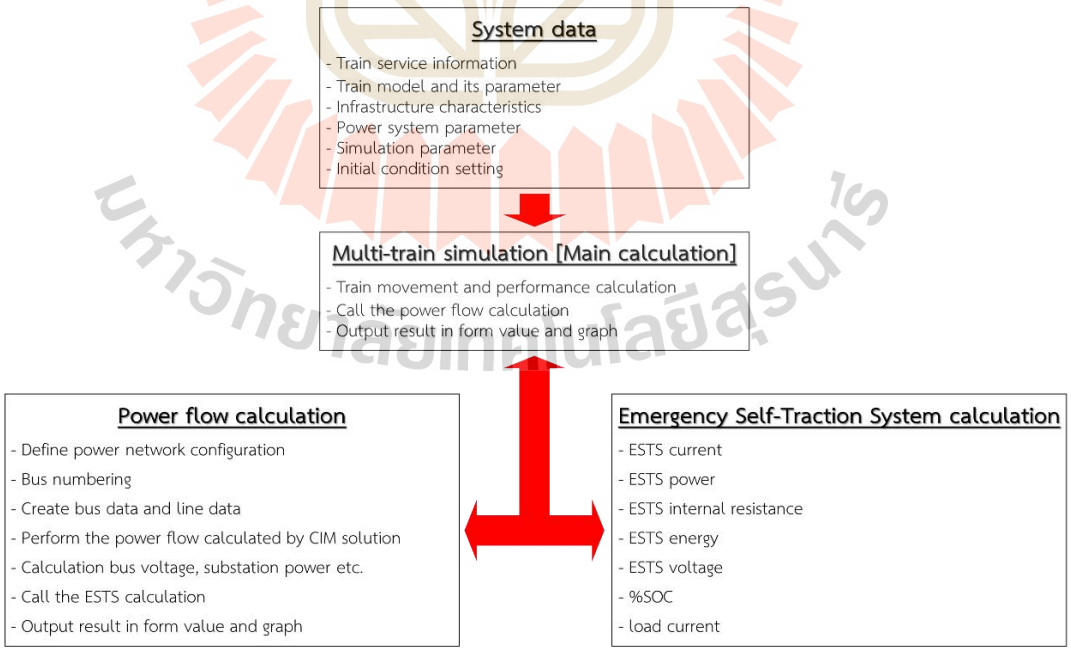
4.4.1 การทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

จากองค์ความรู้ในหัวข้อ 3.6 สามารถกำหนดลำดับการทำงานของ ESTS ภายหลังเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้องได้ดังนี้ เมื่อเกิดไฟดับขณะขบวนรถไฟฟ้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร ESTS จะคงการทำงานของระบบสำคัญไว้ (ยกเว้นชุดขับเคลื่อน) เพื่อรองรับการอพยพผู้โดยสารออกจากขบวนรถไฟฟ้า แต่หากไฟดับระหว่างที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่บนเส้นทางระหว่างสถานีผู้โดยสาร รถไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ปล่อยไหลด้วยแรงเฉื่อยในช่วงระยะทางสั้น ๆ ก่อนสั่งเบรกเพื่อความปลอดภัย จากนั้นเมื่อผ่านไป 5 นาที หากแหล่งจ่ายไฟหลักยังไม่กลับสู่ภาวะปกติและขบวนรถไฟฟ้ายังอยู่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร ESTS จะเริ่มจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองเพื่อขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าไปหยุดที่สถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุด ต่อมา หาก ESTS ยังมีพลังงานไฟฟ้าเพียงพอสำหรับการแบ่งปันและตรวจสอบว่ามีขบวนรถไฟฟ้าอื่นตกค้างอยู่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร ESTS จะมีการจัดสรรและแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขบวนนั้นไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุด และสุดท้าย เมื่อไม่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มเติมหรือพลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บใน ESTS ต่ำกว่าระดับที่สามารถแบ่งปันได้ ระบบจะเข้าสู่สถานะรอการคืนสู่สภาพเดิมของระบบจ่ายไฟหลัก โดยลำดับการทำงานดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของ ESTS ในการเสริมความปลอดภัยของการเดินรถในสภาวะฉุกเฉินได้อย่างเป็นระบบและมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถแสดงแนวคิดการทำงานของแบบจำลองได้ดังรูปที่ 4.37

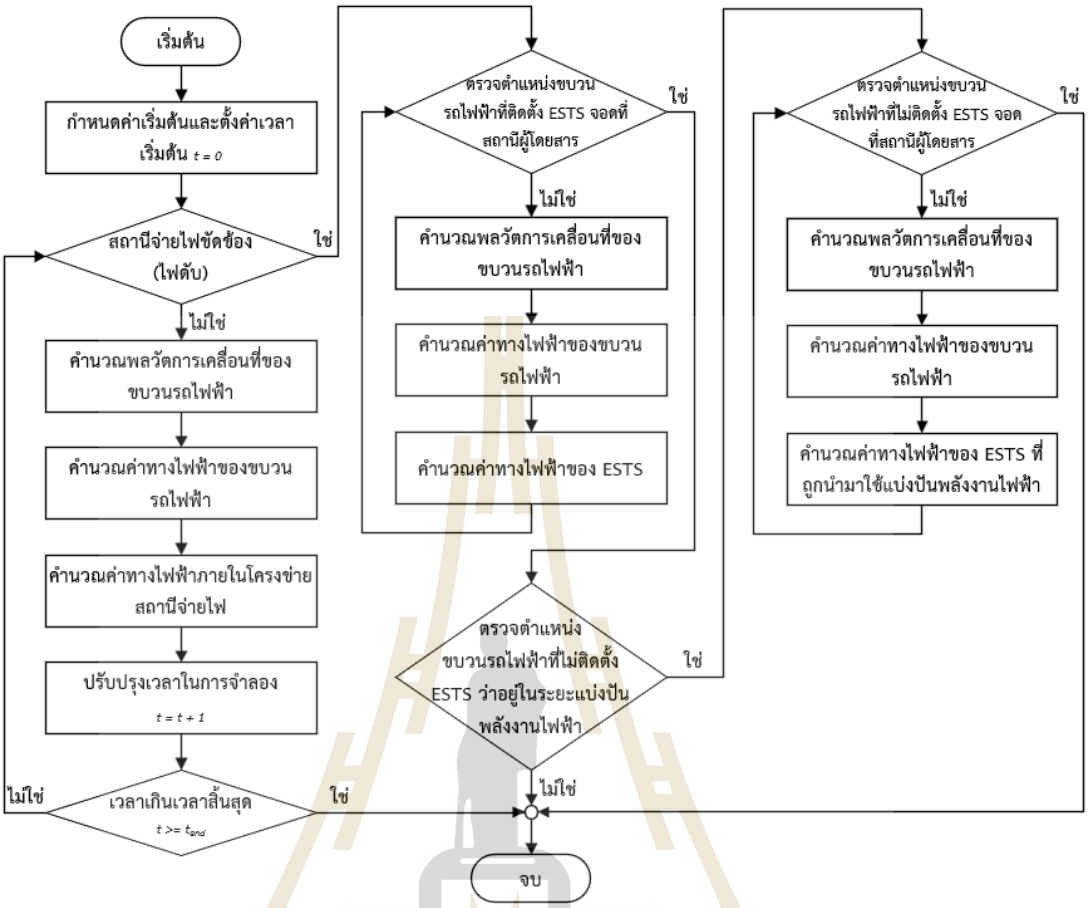


รูปที่ 4.37 แนวคิดของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่พัฒนาขึ้น สามารถสรุปโครงสร้างการทำงานของแบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 โครงสร้างแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน



รูปที่ 4.39 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

แบบจำลองประกอบด้วย 4 ส่วนที่ทำงานร่วมกันในแต่ละรอบการจำลอง ได้แก่ (1) System data เป็นส่วนที่กำหนดข้อมูลเริ่มต้นและข้อมูลอื่น ๆ ที่ต้องการคงค่าไว้ขณะทำการจำลอง เช่น ตารางการเดินรถ ลักษณะโครงสร้างของระบบ เป็นต้น (2) Multi-train simulation เป็นส่วนหลักที่คำนวณพลวัตการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนโดยอ้างอิงข้อกำหนดจาก System data โดยจะมีการอัปเดตค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญ เช่น ความเร็ว ระยะทาง แรงที่มากระทำกับขบวนรถไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น (3) Power-flow calculation เป็นส่วนที่รับข้อมูลมาจาก Multi-train simulation เพื่อคำนวณค่าทางไฟฟ้าต่าง ๆ ภายในโครงข่ายตามลักษณะการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าในกรณีที่จำลองระบบในสถานการณ์ที่สถานีจ่ายไฟทำงานปกติ โดยที่มี System data ข้อกำหนดขอบเขตการหาค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในแต่ละส่วน แล้วส่งค่าที่ได้กลับไปจำกัดลักษณะการทำงานของรถไฟฟ้าอีกที และ (4) ESTS calculation เป็นส่วนคำนวณค่า

ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของ ESTS ซึ่งมีหน้าที่คล้ายคลึงกับ Power-flow calculation แต่โครงสร้างส่วนนี้จะถูกนำมาใช้งานกรณีที่มีการจำลองสถานการณ์ไฟดับภายในโครงข่ายระบบจ่ายไฟ องค์ประกอบของแบบจำลองเหล่านี้ทำงานประสานกันโดยแลกเปลี่ยนข้อมูลต่าง ๆ แบบเรียลไทม์ในทุกรอบการคำนวณ ทำให้การจำลองระบบมีความสอดคล้องกันภายใต้กรอบการดำเนินการเดียวกัน ทั้งนี้ ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองสามารถสรุปเป็นแผนผังได้ดัง รูปที่ 4.39

4.4.2 การทดสอบแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

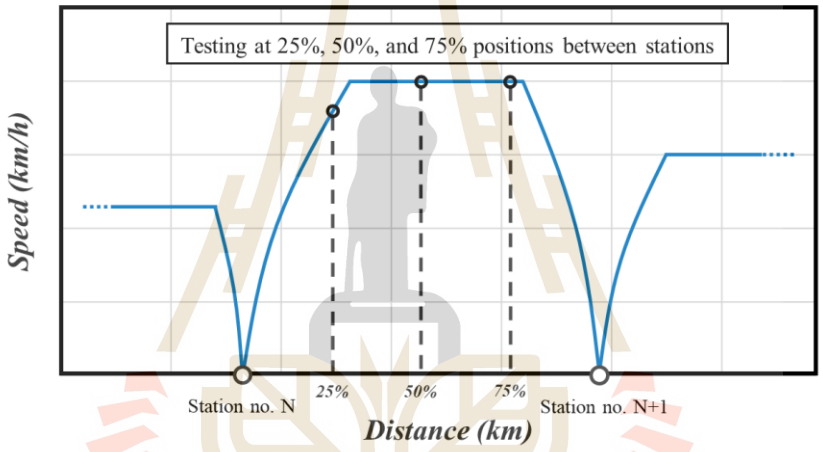
การทดสอบและประเมินสมรรถนะการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการโดยแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การทดสอบการทำงานของ ESTS ขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับ เพื่อตรวจสอบการตอบสนองของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในแง่ของความสอดคล้องกับพลวัตการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า และการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS เพื่อตรวจสอบลักษณะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.4.2.1 การทดสอบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับ

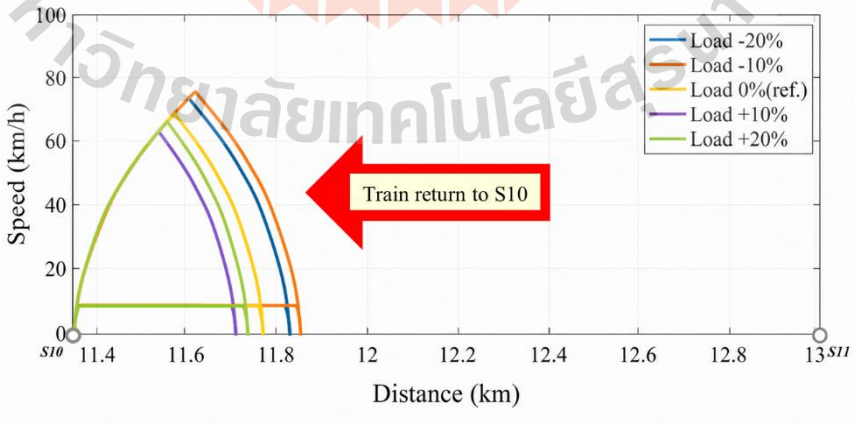
ภายหลังการกำหนดขนาดความจุของ ESTS ให้ครอบคลุมกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำที่จำเป็นต่อการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าที่หยุดชะงัก ณ ตำแหน่งใด ๆ ตลอดเส้นทางวิ่งเมื่อเกิดสถานการณ์ไฟดับ การประเมินสมรรถนะของระบบได้ดำเนินการโดยการจำลองสถานการณ์ไฟดับขณะขบวนรถไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 25%, 50% และ 75% ของช่วงระหว่างสถานีตลาดพลู–วุฒากาศ แสดงดังรูปที่ 4.40 ซึ่งเป็นบริเวณเส้นทางที่ยาวที่สุดที่นำมากำหนดขนาดความจุของ ESTS ตามที่มีการกล่าวถึงข้างต้น พร้อมทั้งทดสอบผลกระทบจากการเพิ่มและลดโหลดของรถไฟฟ้าระหว่างที่ทำการจำลองสถานการณ์ไฟดับดังที่กล่าวข้างต้น ทั้งหมด 5 กรณี ได้แก่ -20% -10% 0%(ขนาดโหลดดั้งเดิม) 10% และ 20% เพื่อประเมินว่า ESTS สามารถจ่ายไฟได้เพียงพอภายใต้เงื่อนไขการเดินรถที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ การขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าหลังไฟดับทุกกรณีถูกจำกัดความเร็วไว้ที่ 10 km/h เพื่อจำกัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงออกตัวของขบวนรถไฟฟ้าไม่ให้เกิน 0.9 MW สอดคล้องกับข้อจำกัดในประเด็นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แบตเตอรี่ใน ESTS สามารถทำได้

สำหรับการจำลองสถานการณ์ไฟดับขณะขบวนรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 25%, 50% และ 75% ของช่วงระหว่างสถานีผู้โดยสาร ผลลัพธ์ถูกนำเสนอในรูปกราฟเชิงเปรียบเทียบการทำงานของระบบขณะที่มีการปรับภาระโหลดขบวนรถไฟฟ้าตั้งแต่ –20% ถึง +20%

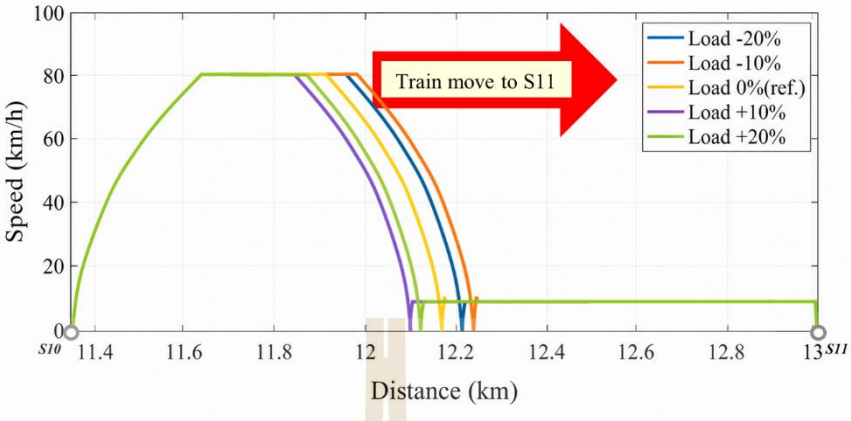
เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบในแง่ของพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.41-4.43 และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ดึงจาก ESTS ระหว่างการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.44-4.46 โดยผลดังกล่าวทำให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับภาระกับการเรียกใช้พลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ที่แปรตามตำแหน่งของการเกิดไฟดับ ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปสรุปแนวโน้มเชิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าและระบุพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริงตลอดช่วงเหตุฉุกเฉินได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลการจำลองยังสะท้อนความสามารถของระบบในการรองรับความผันแปรของภาระโหลดภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้าสำรอง และการกำหนดแนวทางออกแบบหรือปรับตั้งค่าระบบ ESTS ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น



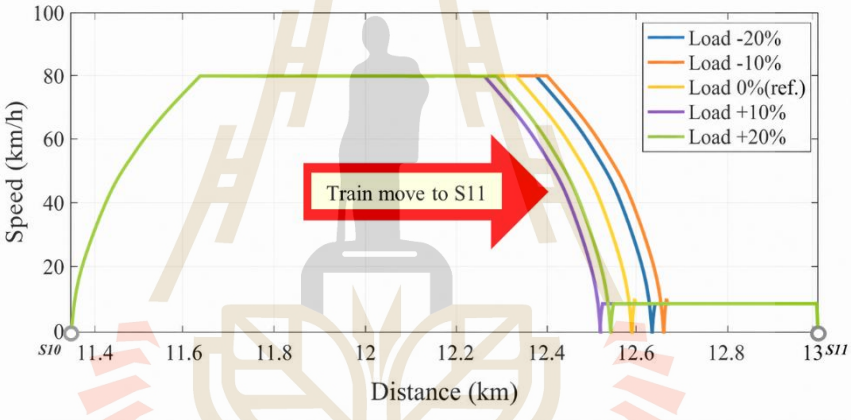
รูปที่ 4.40 ตำแหน่งจำลองสถานการณ์ไฟดับขณะขบวนรถไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่



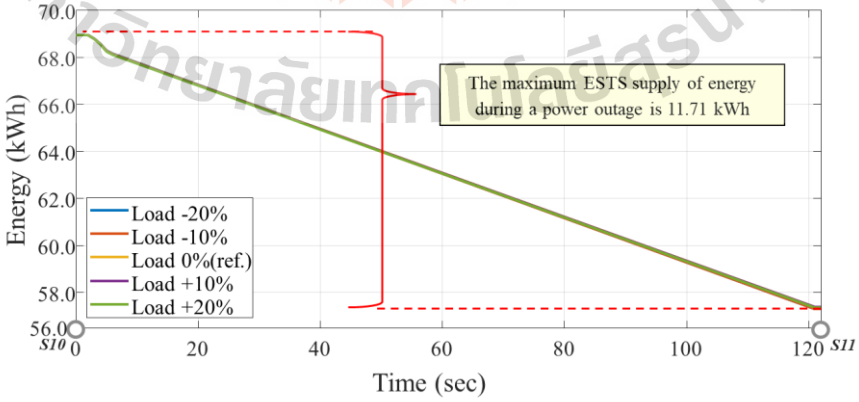
รูปที่ 4.41 การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 25% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร



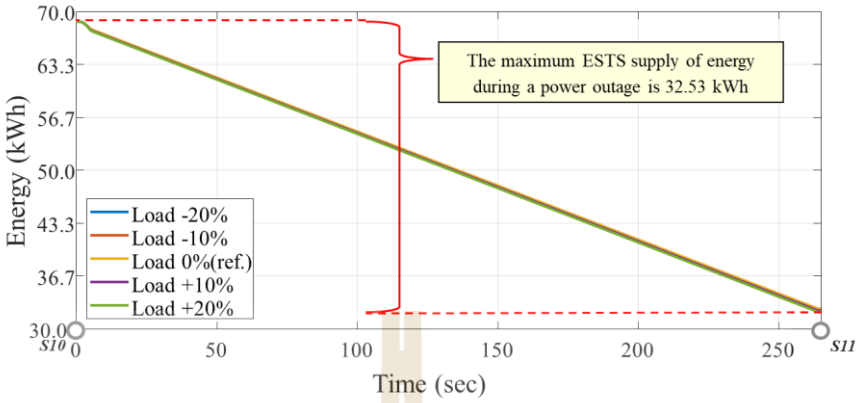
รูปที่ 4.42 การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 50% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร



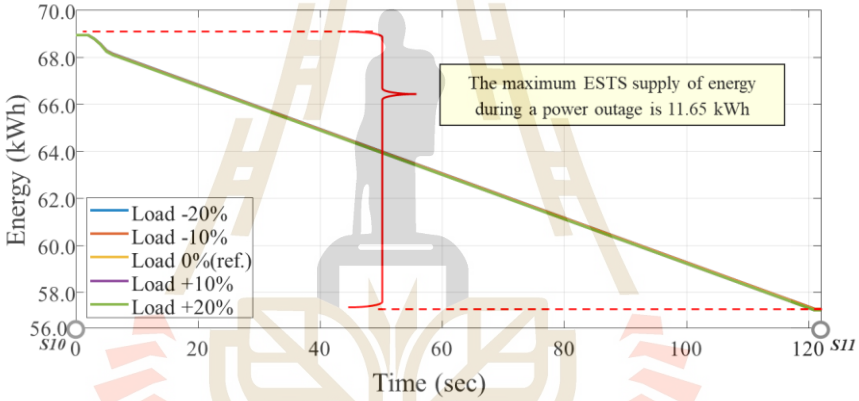
รูปที่ 4.43 การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 75% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร



รูปที่ 4.44 พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS จ่ายเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 25% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร



รูปที่ 4.45 พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS จ่ายเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 50% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร



รูปที่ 4.46 พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS จ่ายเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 75% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.41–4.46 พบว่าการเกิดสถานการณ์ไฟดับขณะขบวนรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 25%, 50% และ 75% ของช่วงระหว่างสถานีผู้โดยสาร ส่งผลต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องดึงจาก ESTS โดยตรง โดยกรณีที่เกิดไฟดับขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 50% มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 32.53 kWh เนื่องจากระยะจากจุดหยุดไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดมีความยาวที่สุด ขณะที่เกิดไฟดับขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 25% จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 11.68 kWh เนื่องจากรถไฟฟ้าหยุดใกล้สถานีผู้โดยสารต้นทางที่เพิ่งเคลื่อนที่ออกมา จึงมีการดึงพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS สำหรับวกกลับไปสถานีผู้โดยสารเดิมที่อยู่ใกล้ และตำแหน่ง 75% มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดประมาณ 11.65 kWh เนื่องจากจุดหยุดอยู่ใกล้สถานีผู้โดยสารปลายทางอยู่แล้ว

ต่อมาเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่ม-ลดภาระโหลดของรถไฟฟ้าตั้งแต่ −20% ถึง +20% พบว่าตำแหน่งและเวลาหยุดจอดของรถไฟฟ้าขณะเกิดไฟดับเปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักโหลด กล่าวคือเมื่อโหลดมีค่ามาก เวลาหยุดจอดจะเกิดเร็วขึ้น ส่งผลให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ต่อด้วยแรงเฉื่อยในระยะสั้นจากจุดที่ควรหยุดจอด ทั้งนี้ ผลของการปรับภาระโหลดเกิดขึ้นเด่นชัดแตกต่างกันตามทิศทางการเคลื่อนที่หลังไฟดับ คือ กรณีที่เกิดไฟดับขณะรถไฟฟ้าบรรทุกโหลดน้ำหนักเบาเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 25% รถไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ต่อด้วยแรงเฉื่อยจนมีระยะห่างจากจุดจอดไปยังสถานีผู้โดยสารต้นทางที่ต้องวกกลับมากกว่าการบรรทุกโหลดน้ำหนักมาก ส่งผลให้รถไฟฟ้าโหลดเบาดึงพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS มากกว่า เนื่องจากต้องเคลื่อนที่เพิ่มเติมไกลกว่า ในขณะที่กรณีที่เกิดไฟดับขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 50% และ 75% จะให้ผลลัพธ์ตรงกันข้าม เนื่องจากการเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉื่อยเป็นไปในทิศทางเดียวกับทิศที่รถไฟฟ้าต้องเคลื่อนที่ต่อด้วยพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS การมีโหลดเบาจึงทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าการบรรทุกโหลดน้ำหนักมาก อย่างไรก็ตามน้ำหนักโหลดจะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อรถไฟฟ้าต้องเคลื่อนที่ในระยะทางไกล เช่น กรณีที่เกิดไฟดับขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 50% โดยสามารถสรุปผลการจำลองได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การดึงพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ภายใต้เงื่อนไขบรรทุกน้ำหนักโหลดของรถไฟฟ้า

ตำแหน่งขณะเกิดไฟดับ	พลังงานที่ใช้ขณะรถไฟฟ้าบรรทุกน้ำหนักโหลด (kWh)					ทิศทางการเคลื่อนที่
	−20%	−10%	0%	+10%	+20%	
25%	11.66	11.67	11.68	11.69	11.71	วกกลับ S10
50%	32.39	32.40	32.41	32.45	32.53	ไป S11 ต่อ
75%	11.63	11.64	11.66	11.67	11.69	ไป S11 ต่อ

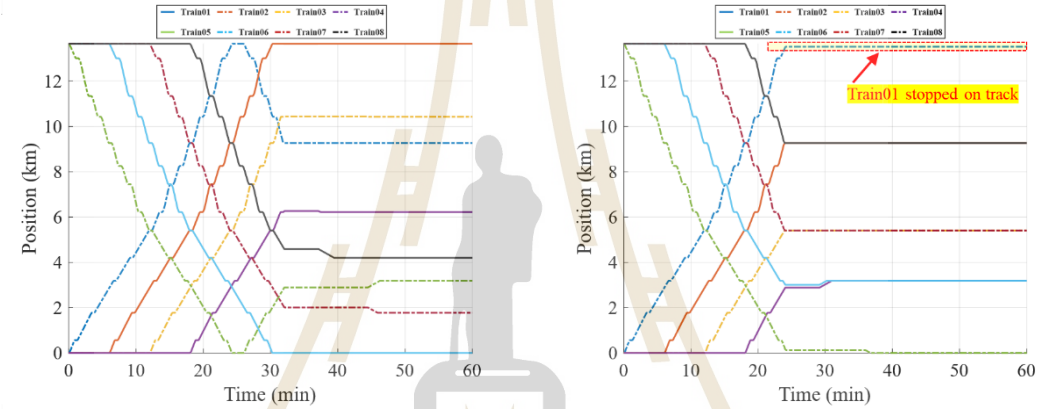
จากผลการจำลองในแต่ละเงื่อนไขแสดงให้เห็นว่า ESTS สามารถจ่ายไฟให้กับขบวนรถไฟฟ้า เพื่อขับเคลื่อนต่อไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพลังงานไฟฟ้าที่ถูกดึงไปใช้มีเพียงประมาณ 11.63–32.53 กิโลวัตต์ชั่วโมง ของพลังงานที่กักเก็บไว้ในระบบ ซึ่งถือว่าเป็นสัดส่วนที่ต่ำเมื่อเทียบกับความจุรวมที่ติดตั้งจริง ผลที่ได้ยังยืนยันว่า ESTS สามารถรองรับเหตุการณ์ซ้ำซ้อนและสามารถนำพลังงานไฟฟ้าที่เหลือไปแบ่งปันให้กับขบวนรถไฟฟ้าอื่น ๆ ได้เพิ่มเติม ทั้งนี้ เพื่อให้การทำงานของ ESTS ดำเนินการได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องออกแบบโหมดควบคุมการเดินรถให้สอดคล้องกับการทำงานของ ESTS

4.4.2.2 การทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

การจำลองส่วนนี้ทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS โดยกำหนดให้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนให้บริการผู้โดยสารในวันทำการปกติ มีการปล่อยขบวนรถไฟฟ้าทุก ๆ 6 นาที และมีขบวนรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ในระบบเฉลี่ย 8 ขบวน รูปแบบการปล่อยขบวนรถไฟฟ้าถูกดำเนินการโดยให้ขบวนที่ 1–4 เคลื่อนที่ในทิศทางขาขึ้นจากสถานีสนามกีฬาแห่งชาติ (W1) ไปยังสถานีบางหว้า (S12) ส่วนขบวนที่ 5–8 เคลื่อนที่ในทิศทางขาลงหรือเส้นทางสวนย้อนกลับ สำหรับการติดตั้ง ESTS มีเพียงรถไฟฟ้าขบวนเลขคู่เท่านั้นที่ติดตั้งระบบ การจำลองจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนกว่ารถไฟฟ้าทุกขบวนจะวิ่งไป–กลับระหว่างสถานีผู้โดยสารต้นทางกับสถานีผู้โดยสารปลายทางครบ 1 รอบด้วยโครงร่างความเร็วเหมือนกันทุกขบวน ซึ่งทำให้สัดส่วนระหว่างรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS และไม่ติดตั้งในระบบมีจำนวนครึ่งต่อครึ่ง การทำงานของ ESTS จะเริ่มขึ้นโดยจ่ายไฟสำรองให้กับรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS หลังจากที่ขบวนนั้นหยุดจอดด้วยแรงเฉื่อย ต่อมาเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาทีและแน่ใจว่ารถไฟฟ้าเหล่านั้นเคลื่อนที่ไปยังเขตปลอดภัยแล้ว ระบบจะเข้าสู่โหมดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่เหลือให้กับรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ที่หยุดจอดอยู่กลางทาง ทั้งนี้ ระยะระหว่าง ESTS กับขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าต้องอยู่ห่างกันไม่เกิน 2.5–5 กิโลเมตร อันเนื่องมาจากข้อจำกัดด้านระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟกระแสตรงตามมาตรฐาน EN 50163:2004 (British Standards Institution, 2004) โดยในที่นี้กำหนดระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไว้ที่ 3.5 กิโลเมตร (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข.) เพื่อแสดงผลการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS ในกรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถเคลื่อนที่ไปจอดที่สถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุด และกรณีที่ยังมีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างอยู่บนทางวิ่ง นอกจากนี้ หากพลังงานไฟฟ้าสำรองใน ESTS หนึ่งไม่เพียงพอสำหรับการแบ่งปัน หรือรถไฟฟ้าที่ต้องการรับพลังงานไฟฟ้าจอดห่างเกินระยะที่กำหนด บทบาทการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจะถูกถ่ายโอนไปยัง ESTS อื่นภายในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเดียวกัน

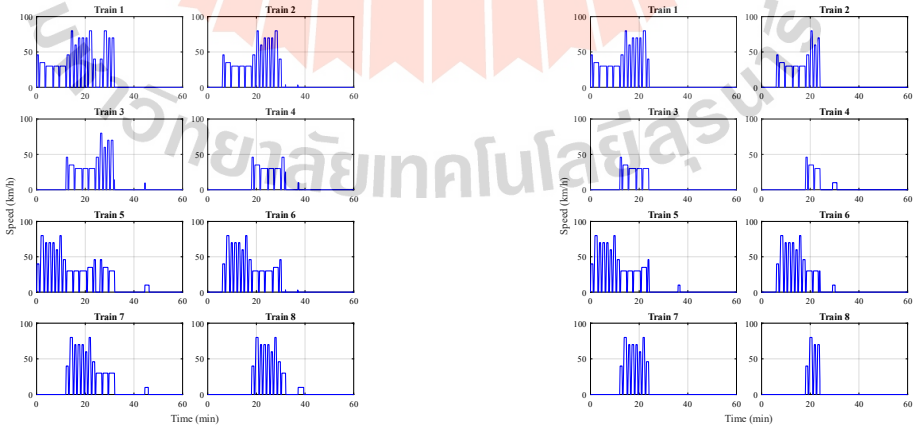
รูปที่ 4.47–4.48 แสดงตัวอย่างผลการตอบสนองของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายใต้สถานการณ์ไฟดับ โดยเปรียบเทียบ 2 กรณี ได้แก่ (ก) กรณีที่ขบวนรถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถเคลื่อนที่ไปจอด ณ สถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ครบถ้วน และ (ข) กรณีที่ยังมีขบวนรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างอยู่บนเส้นทางวิ่ง ทั้งนี้ รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์เชิงระยะทาง–เวลา ช่วยให้เห็นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าหลังเกิดเหตุไฟดับ ขณะที่รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์เชิงความเร็ว–เวลา ช่วยยืนยันพฤติกรรมการหยุดนิ่ง การเริ่มตอบสนองของ ESTS และการกลับมาเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าในแต่ละกรณี ภายใต้กรณี (ก) เมื่อเกิดเหตุไฟดับในนาทีที่ 32 ขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS จะเข้าสู่ช่วงตอบสนองและเริ่มใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองเพื่อขับเคลื่อนตนเอง ทำ

ให้ขบวนที่ 4 และ 8 เริ่มเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ในนาทีที่ 37 จากนั้นในนาทีที่ 45 ขบวนที่ 3 5 และ 7 จึงเริ่มเคลื่อนที่ด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS บนขบวนอื่น ส่งผลให้รถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถอพยพได้ครบถ้วน ในทางตรงกันข้าม กรณี (ข) เมื่อเกิดเหตุไฟดับในนาทีที่ 24 พบว่ามีเพียงขบวนที่ 4 และ 6 ที่เริ่มใช้ ESTS ขับเคลื่อนตนเองไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ในนาทีที่ 29 และต่อมาในนาทีที่ 36 ขบวนที่ 5 จึงเคลื่อนที่ด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับการแบ่งปัน ขณะที่ขบวนที่ 1 ยังคงหยุดนิ่งอยู่บนเส้นทางวิ่งจนสิ้นสุดการจำลอง เนื่องจากอยู่นอกระยะที่สามารถรับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้



(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์เชิงระยะทาง-เวลาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขณะไฟดับ

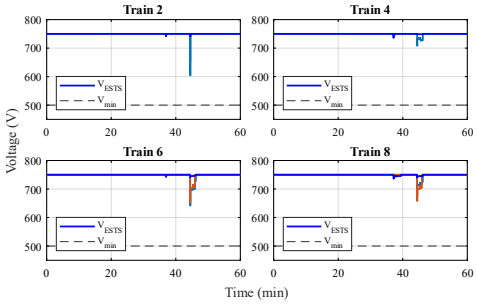


(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

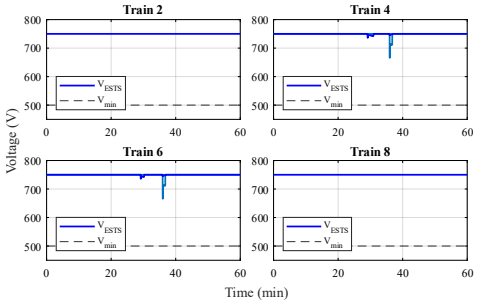
รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์เชิงความเร็ว-เวลาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขณะไฟดับ

เพื่อให้การพิจารณาผลการจำลองในรูปที่ 4.49 – 4.52 ชัดเจนยิ่งขึ้น การแสดงผลในแต่ละกราฟย่อยจะอ้างอิงตามขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS เป็นหลัก เช่น Train 2 หมายถึง ขบวนรถไฟฟ้าลำดับที่ 2 ที่ติดตั้ง ESTS เป็นต้น ดังนั้น ค่าหลักที่แสดงในแต่ละกราฟย่อยได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าคงเหลือ และสถานะการชาร์จ จึงเป็นค่าของ ESTS บนขบวนรถไฟฟ้าดังกล่าว ไม่ใช่ค่าของรถไฟฟ้าทุกขบวนในระบบ ส่วนค่าของขบวนรถไฟฟ้าอื่นที่ปรากฏร่วมในกราฟเป็นค่าของขบวนที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ชุดนั้น ๆ การอธิบายผลในรูปชุดนี้จึงพิจารณาจากมุมของ ESTS แต่ละชุด เพื่อวิเคราะห์ภาระทางไฟฟ้าและระดับการใช้พลังงานของระบบได้อย่างชัดเจน

รูปที่ 4.49 แสดงกราฟแรงดันไฟฟ้าของ ESTS และแรงดันไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า โดยเส้นสีน้ำเงินเข้มแสดงแรงดันไฟฟ้าของ ESTS ส่วนเส้นสีอื่น ๆ แสดงแรงดันไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ESTS พิจารณาได้เป็นสองช่วงหลัก ได้แก่ ช่วงที่ ESTS จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเอง ซึ่งแรงดันไฟฟ้าอาจลดลงตามภาระโหลดของขบวนนั้น แต่หากไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้ แสดงว่า ESTS ไม่ได้จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนของตนเอง และช่วงที่ ESTS แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าอื่นที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS โดยแรงดันไฟฟ้าของขบวนที่รับพลังงานจะแสดงผลของแรงดันตกตามระยะทางของเส้นทางการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้ กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถอพยพไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ครบถ้วน ดังแสดงในรูปที่ 4.49(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้าของ ESTS และแรงดันไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับช่วงเวลาที่ระบบเริ่มจ่ายไฟ โดยแรงดันไฟฟ้าของระบบยังคงอยู่เหนือขีดจำกัดขั้นต่ำที่กำหนดสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง 750 โวลต์ ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อ้างอิงเกณฑ์ขั้นต่ำไว้ที่ 500 โวลต์ ตามมาตรฐานที่กล่าวไว้ข้างต้น สำหรับใช้พิจารณาความเป็นไปได้ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ เส้นกราฟของขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานยังแสดงแรงดันไฟฟ้าตกที่ขบวนรถไฟฟ้าปลายทาง โดยปรากฏค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดประมาณ 600 โวลต์ จึงยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ในทางตรงกันข้าม รูปที่ 4.49(ข) แสดงกรณีที่มีขบวนรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนเส้นทาง แม้ระบบยังมีพลังงานไฟฟ้าสำรองเหลืออยู่ แต่ข้อจำกัดด้านระยะห่างระหว่าง ESTS กับขบวนรถไฟฟ้าที่ต้องการรับพลังงานไฟฟ้า ทำให้ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดรับพลังงานให้เป็นไปตามเกณฑ์ได้ กราฟจึงปรากฏเฉพาะแรงดันไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้าที่สามารถรับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้จริงเท่านั้น



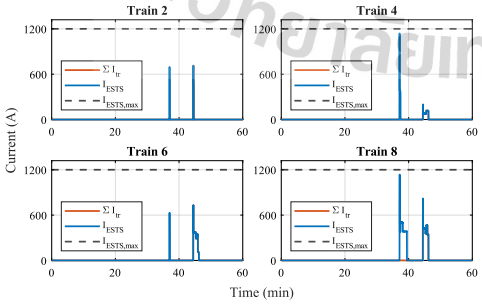
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



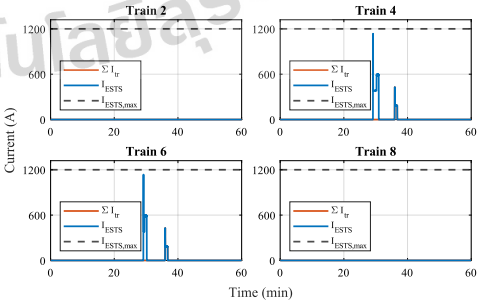
(ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 4.49 แรงดันไฟฟ้าของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าและขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า

รูปที่ 4.50 แสดงกระแสไฟฟ้าและ รูปที่ 4.51 แสดงกำลังไฟฟ้าจาก ESTS รวมถึงค่าของขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า โดยในรูปที่ 4.50 เส้นสีน้ำเงินเข้มแสดงกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจาก ESTS ส่วนเส้นสีแดงแสดงผลรวมกระแสไฟฟ้า ($\sum I_{tr}$) และกำลังไฟฟ้า ($\sum P_{tr}$) ของขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ดังนั้น ในช่วงที่ I_{ESTS} มีค่า แต่ $\sum I_{tr}$ และ $\sum P_{tr}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงว่า ESTS อยู่ในช่วงจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเอง และยังไม่ได้เข้าสู่โหมดแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้ขบวนอื่น การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของ ESTS จึงพิจารณาได้เป็นสองช่วงหลักเช่นเดียวกับกรณีแรงดันไฟฟ้า ได้แก่ ช่วงที่ ESTS จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเอง ทำให้กระแสไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าของ ESTS สูงขึ้นตามภาระโหลดการขับเคลื่อนของขบวนนั้น และช่วงที่ ESTS แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าอื่นที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ซึ่งทำให้ค่า $\sum I_{tr}$ หรือ $\sum P_{tr}$ ปรากฏขึ้นและมีแนวโน้มสอดคล้องกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกจาก ESTS โดยค่ากระแสไฟฟ้าต้องไม่เกินขีดจำกัดสูงสุดที่กำหนดไว้

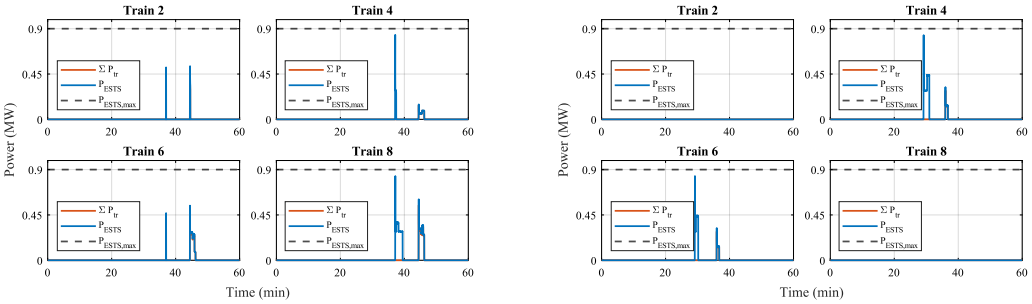


(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



(ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 4.50 กระแสไฟฟ้าของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าและขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า



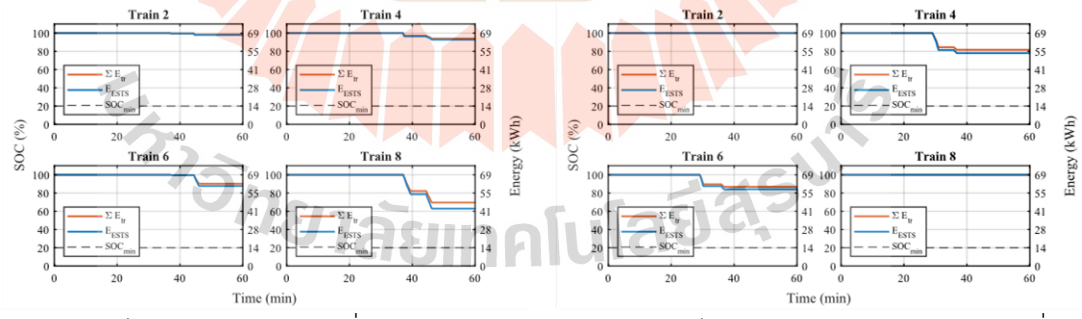
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 4.51 กำลังไฟฟ้าของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าและขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า

จากรูปข้างต้น พบว่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของ ESTS จะปรากฏค่ายอดอย่างชัดเจนในช่วงที่ ESTS จ่ายพลังงานไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนตนเองหรือแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนรถไฟฟ้าอื่น โดยในรูปที่ 4.50(ก) และรูปที่ 4.51(ก) เป็นกรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถอพยพได้ครบถ้วน ESTS หลายชุดมีบทบาททั้งในการขับเคลื่อนตนเองและการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าทำให้กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ารวมของระบบกระจายตัวอยู่ในหลายช่วงเวลา ขณะที่รูปที่ 4.50(ข) และรูปที่ 4.51(ข) เป็นกรณีที่มีขบวนรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนเส้นทาง บทบาทการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะกระจุกตัวอยู่เพียงบาง ESTS เท่านั้น โดยทั้งสองกรณี ESTS ถูกดึงกระแสไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 1,200 แอมป์ และมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 0.9 เมกะวัตต์ เมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเอง ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจะอยู่ภายใต้ขอบเขตค่าออกแบบที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเข้าสู่ช่วงการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของ ESTS จะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้าและลักษณะการกระจายภาระในแต่ละช่วงเวลา กล่าวคือ เมื่อขบวนรถไฟฟ้าหนึ่งขบวนได้รับพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS หลายชุดพร้อมกัน ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบก็จะกระจายตัวระหว่าง ESTS หลายชุด ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของแต่ละชุดต่ำกว่าค่าสูงสุดที่กำหนด ขณะที่เมื่อ ESTS ชุดหนึ่งต้องจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนรถไฟฟ้าหลายขบวนหรือรับภาระต่อเนื่องในช่วงเวลาเดียวกัน ค่าดังกล่าวอาจเข้าใกล้ข้อจำกัดของระบบได้

รูปที่ 4.52 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองจาก ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าแต่ละขบวน โดยเส้นสีน้ำเงินเข้มแสดงพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายออกจาก ESTS ส่วนเส้นสีแดงแสดงผลรวมพลังงานไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟฟ้าได้รับจาก ESTS ทั้งในกรณีจ่ายให้ขบวนที่ติดตั้งระบบเอง

และกรณีแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนรถไฟฟ้าอื่น ทั้งนี้ ค่าของทั้งสองเส้นอาจแตกต่างกัน เนื่องจากระบบมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าระหว่างการส่งผ่านราง สายจ่ายไฟ และองค์ประกอบของระบบ โดยรูปที่ 4.52(ก) เป็นกรณีที่ขบวนรถไฟฟ้าสามารถอพยพไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ครบทุกขบวน หลังจาก ESTS บนขบวนที่ติดตั้งระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนตนเองเสร็จสิ้นแล้ว ESTS บนขบวนที่ 2 จะทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนที่ 3 ESTS บนขบวนที่ 4 จะทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนที่ 5 ESTS บนขบวนที่ 6 จะทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนที่ 5 และ 7 และ ESTS บนขบวนที่ 8 จะทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนที่ 5 และ 7 โดยมีค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ต่ำสุด และเฉลี่ยเท่ากับ 25.57 1.41 และ 10.10 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนว่า ESTS สามารถแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนรถไฟฟ้าอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนรูปที่ 4.52(ข) เป็นกรณีที่มีขบวนรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนเส้นทาง พบว่า ESTS บนขบวนที่ 4 และ 6 ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนที่ 5 เท่านั้น โดยมีค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ต่ำสุด และเฉลี่ยเท่ากับ 15.17 0 และ 6.53 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ ขณะที่ ESTS บนขบวนอื่นยังไม่มีบทบาทในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพิ่มเติม แม้จะยังมีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนทางวิ่งก็ตาม ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ความสำเร็จของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไม่ได้ขึ้นอยู่กับพลังงานคงเหลือของ ESTS เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งสัมพัทธ์ของขบวนรถไฟฟ้า ระยะห่างระหว่าง ESTS กับขบวนรถไฟฟ้าที่ต้องการรับพลังงานไฟฟ้า และข้อจำกัดด้านแรงดันไฟฟ้าของเส้นทางการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา



(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 4.52 พลังงานไฟฟ้าคงเหลือและสถานะการชาร์จของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า

ผลการทดสอบแบบจำลองระบบขับเคลื่อนฉุกเฉินด้วยตนเองสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน แสดงให้เห็นว่า ESTS ของขบวนรถไฟฟ้าแต่ละขบวนสามารถจำลองการทำงาน

ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ทั้งการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนที่ติดตั้ง ESTS และการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนที่ไม่ได้ติดตั้งระบบ ผลการจำลองจากรูปที่ 4.47 – 4.52 ยืนยันว่าแบบจำลอง ESTS สามารถสะท้อนการตอบสนองได้ครบทั้งมิติการเคลื่อนที่และค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ ตำแหน่งของรถไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามสถานะการทำงาน นอกจากนี้ ผลลัพธ์ยังแสดงบทบาทของข้อจำกัดด้านระยะห่างและแรงดันไฟฟ้าตกปลายทาง ซึ่งมีผลต่อการส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังขบวนรถไฟฟ้าที่ตกค้างบนเส้นทาง พร้อมทั้งชี้ให้เห็นว่าความสำเร็จของการอพยพไม่ได้ขึ้นอยู่กับพลังงานไฟฟ้าสำรองเพียงด้านเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับความครอบคลุมเชิงพื้นที่ การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า และการกระจายภาระทางไฟฟ้าระหว่าง ESTS ภายในระบบร่วมกันด้วย

4.5 สรุป

การพัฒนาแบบจำลองระบบขับเคลื่อนฉุกเฉินด้วยตนเองสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการดำเนินงานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ โดยปัจจุบันการจำลองมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น MATLAB Python C/C++ เป็นต้น เข้ามาช่วยคำนวณ เพื่อลดความซับซ้อนของการวิเคราะห์การทำงานของระบบและเอื้อต่อการปรับปรุงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องให้ทำได้ง่ายยิ่งขึ้น สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ MATLAB/m-file มาวิเคราะห์การทำงานของ ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ปรากฏว่าแบบจำลองสามารถหาผลเฉลยของการทำงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในบทนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองดังกล่าว เพื่อให้ทราบแนวโน้มการทำงานของระบบในเบื้องต้นและทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ ตลอดจนการจำลองแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าอันเป็นวัตถุประสงค์หลักของการศึกษา ซึ่งจะนำไปต่อยอดสู่การจำลองการทำงานอื่น ๆ ในบทถัดไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

5.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอการจำลองการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าด้วยระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน ESTS ในระดับโครงข่ายระบบจ่ายไฟเดียวกัน โดยมุ่งประเมินความเป็นไปได้ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจากขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ไปยังขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS เพื่อสนับสนุนการอพยพผู้โดยสารไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดของรถไฟฟ้าทุกขบวนแม้เกิดสถานการณ์ไฟดับทั้งโครงข่าย โดยแนวคิดนี้มีความสำคัญต่อการลดความจำเป็นในการติดตั้ง ESTS จำนวนมากภายในระบบ ช่วยแก้ปัญหาในประเด็นข้อจำกัดด้านความไม่คุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และภาระงบประมาณที่อาจเพิ่มขึ้นจากการติดตั้ง ESTS สำหรับรถไฟฟ้าทุกขบวนอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้บทนี้ยังพิจารณาบทบาทพื้นฐานของ ESTS ในฐานะแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าสำรองที่ช่วยขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าด้วยความเร็วจำกัด พร้อมกับรองรับการจ่ายไฟฟ้าให้แก่โหลดบริการอื่น ๆ ที่จำเป็นตลอดกระบวนการอพยพ เพื่อหลีกเลี่ยงการหยุดชะงักของขบวนรถไฟฟ้า ซึ่งอาจนำไปสู่เหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ที่อาจส่งผลต่อความปลอดภัยของผู้โดยสาร สำหรับการออกแบบการทดสอบกำหนดให้ตัวแปรเป็นความถี่การเดินขบวนรถไฟฟ้าและสัดส่วนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ต่อจำนวนขบวนรถไฟฟ้าทั้งหมด เพื่อสะท้อนความหนาแน่นของขบวนในระบบและโอกาสในการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในโครงข่ายเดียวกัน ขอบเขตการวิเคราะห์ผลกำหนดด้วยอัตราความสำเร็จที่รถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถเคลื่อนที่ต่อไปยังสถานีผู้โดยสารในช่วงไฟดับ รวมถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองจาก ESTS เพื่อชี้ให้เห็นเงื่อนไขที่เอื้อต่อการลดจำนวนการติดตั้งและการลดขนาดของ ESTS โดยไม่กระทบต่อเป้าหมายการให้บริการขั้นต่ำของระบบ รายละเอียดเงื่อนไขและกรณีทดสอบนำเสนอดังต่อไปนี้

5.2 เงื่อนไขการทดสอบและการออกแบบการจำลองผล

การกำหนดเงื่อนไขการทดสอบและรูปแบบการจำลองผลถูกออกแบบภายใต้กรอบแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับในระดับโครงข่าย โดยมีเป้าหมายเพื่อ

ประเมินความเป็นไปได้ของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ไปสนับสนุนขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ผ่านโครงข่ายระบบจ่ายไฟ เพื่อให้รถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถอพยพผู้โดยสารไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ ภายใต้ข้อจำกัดของพลังงานไฟฟ้าสำรองของ ESTS ข้อจำกัดเชิงปฏิบัติการของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และเงื่อนไขการเดินรถที่สะท้อนความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าตามตารางเวลาเดินรถ นอกจากนี้ การทดสอบยังมุ่งชี้ให้เห็นศักยภาพของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวในการลดความจำเป็นของการติดตั้ง ESTS บนขบวนรถไฟฟ้าให้ครบทุกขบวน โดยพิจารณาว่าสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ที่เปลี่ยนแปลงไปยังสามารถบรรลุเป้าหมายการอพยพผู้โดยสารได้อย่างปลอดภัยและครบถ้วนเพียงใด ด้วยเหตุนี้ การเลือกตัวแปรสำหรับการทดสอบจึงมุ่งเน้นเฉพาะตัวแปรสำคัญที่เป็นกลไกหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อความสำเร็จของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้การวิเคราะห์ผลมีความชัดเจน เชื่อมโยงเชิงเหตุผล และสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ โดยรายละเอียดของตัวแปรทดสอบและกรณีทดสอบจะอธิบายตามลำดับในหัวข้อถัดไป

5.2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ

จากเป้าหมายการทดสอบที่ต้องการสะท้อนกลไกที่กำหนดความสำเร็จของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้อย่างตรงประเด็น การทดสอบนี้จึงกำหนดและจัดลำดับตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบเป็นตัวแปรทดสอบที่ปรับเปลี่ยนค่าเพื่อศึกษาผลต่อการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและตัวแปรควบคุมที่กำหนดให้คงที่และอยู่นอกข่ายศึกษา เพื่อให้การเทียบผลการทดสอบตีความได้ชัดเจนดังนี้

5.2.1.1 ตัวแปรทดสอบ

การจำลองผลนี้ได้กำหนดตัวแปรทดสอบที่มีการปรับเปลี่ยนค่าเป็นชุด ๆ ภายใต้กรอบการทดสอบเดียวกัน เพื่อสร้างสถานการณ์การเดินรถและสภาวะการทำงานที่หลากหลาย ซึ่งมีผลต่อความเป็นไปได้ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้า กล่าวคือ ตัวแปรทดสอบถูกใช้สำหรับสะท้อนความแตกต่างของสภาพการปฏิบัติการของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนให้สอดคล้องกับระบบจริงมากที่สุด เช่น ความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าในระบบ ตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างขบวนรถไฟฟ้า ณ ขณะเกิดเหตุไฟดับ ระดับความพร้อมของ ESTS ภายในโครงข่าย เป็นต้น เมื่อกำหนดให้ตัวแปรทดสอบเปลี่ยนค่าได้อย่างเป็นระบบ ผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถนำมาเปรียบเทียบแนวโน้มการดำเนินการและอธิบายขีดจำกัดของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในมิติของโอกาสการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการช่วยเหลือ ซึ่งเป็นแกนสำคัญต่อการประเมินศักยภาพในการลดจำนวนการติดตั้ง ESTS ใน

ระบบ ทั้งนี้ ในหัวข้อนี้จะนำเสนอรายละเอียดของตัวแปรทดสอบแต่ละตัวที่ใช้ในการศึกษา พร้อมอธิบายบทบาทและความสำคัญต่อผลการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS แต่ละชุด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ความถี่การเดินขบวนรถหรือระยะห่างการปล่อยขบวนรถ (Headway: H) เป็นตัวแปรทดสอบหลักที่กำหนดความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าในระบบ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง และเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดโอกาสการเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS กับขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อ H มีค่าสั้น จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่อยู่บนเส้นทางพร้อมกันจะเพิ่มขึ้น ระยะห่างตามแนวเส้นทางระหว่างขบวนลดลง และความน่าจะเป็นที่ขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS จะอยู่ในระยะที่สามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไปยังขบวนที่ไม่ได้ติดตั้งระบบย่อมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ดี ความหนาแน่นที่สูงอาจก่อให้เกิดสภาวะความต้องการความช่วยเหลือสะสม เนื่องจากมีขบวนรถไฟฟ้าหลายขบวนต้องพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าสำรองจากขบวนที่ติดตั้ง ESTS ในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ภาระการจ่ายพลังงานของ ESTS เพิ่มขึ้น และมีความเสี่ยงต่อข้อจำกัดด้านกำลังไฟฟ้าที่ ESTS สามารถจ่ายได้ รวมถึงทำให้พลังงานไฟฟ้าสำรองลดลงอย่างรวดเร็วจนอาจไม่เพียงพอต่อการสนับสนุนการอพยพของรถไฟฟ้าทุกขบวน ในทางกลับกัน เมื่อ H มีค่ายาวขึ้น จำนวนขบวนรถไฟฟ้าในระบบจะลดลงและระยะห่างระหว่างขบวนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โอกาสในการจับคู่แบ่งปันพลังงานลดลง และบางขบวนอาจอยู่นอกขอบเขตการแบ่งปันพลังงานตามข้อจำกัดเชิงปฏิบัติการ แม้ในภาพรวมพลังงานไฟฟ้าสำรองใน ESTS จะยังคงเหลือเพียงพอก็ตาม

การกำหนด H ในการทดสอบอ้างอิงช่วงค่าที่พบได้จากตารางเดินรถจริง ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ช่วงเร่งด่วนถึงนอกชั่วโมงเร่งด่วน โดยพิจารณาค่าที่เป็นไปได้หลายระดับ ได้แก่ 3.45 5.4 6 7 และ 8 นาที เพื่อให้ได้สภาวะความหนาแน่นของขบวนที่หลากหลายและสอดคล้องกับการปฏิบัติการจริง อย่างไรก็ดี เพื่อให้การเปรียบเทียบผลมีนัยสำคัญในเชิงวิศวกรรม จึงเลือกใช้ค่า H ที่ทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการในระบบแตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่งผลให้การทดสอบนี้กำหนดค่า H เป็น 3 ระดับ ได้แก่ 3.45 6 และ 8 นาทีเป็นกรณีศึกษา เนื่องจากค่า 5.4 และ 7 นาทีให้จำนวนขบวนใกล้เคียงกับกรณี H เท่ากับ 6 นาที และอาจทำให้ความแตกต่างของผลไม่เด่นชัดเท่าที่ควร ทั้งนี้ จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการในระบบ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง (Total number of trains in service: N_{total}) สามารถประเมินได้ ดังสมการที่ 5.1

$$N_{total} = \frac{T}{H} \tag{5.1}$$

โดย T คือ เวลารอบที่รถไฟฟ้าหนึ่งขบวนเคลื่อนที่ไป–กลับครบหนึ่งรอบ (round-trip time) และ H คือระยะเว้นระหว่างการปล่อยขบวนรถไฟฟ้าที่ติดกัน สำหรับกรณีศึกษานี้กำหนดให้ T เท่ากับ 48 นาที ส่งผลให้เมื่อพิจารณา H ที่ 3.45 6 และ 8 นาที จะได้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าเฉลี่ยที่ให้บริการพร้อมกันในระบบประมาณ 14 8 และ 6 ขบวนตามลำดับ การกำหนดค่า H ดังกล่าวจึงทำให้สามารถพิจารณาสภาวะการให้บริการได้ครอบคลุมทั้งกรณีความหนาแน่นสูงและกรณีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งเป็นฐานสำคัญสำหรับการเปรียบเทียบผลการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

2) สัดส่วนการติดตั้ง ESTS ต่อจำนวนขบวนรถไฟฟ้าทั้งหมด (ESTS Penetration Ratio: *%ESTS*) เป็นตัวแปรทดสอบที่บ่งบอกความหนาแน่นของ ESTS ภายในระบบโดยตรง โดยจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่สามารถทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับ *%ESTS* ที่กำหนดในโครงข่าย เมื่อ *%ESTS* อยู่ในระดับสูงก็ย่อมส่งผลให้โอกาสที่ขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS จะได้รับพลังงานไฟฟ้าจากขบวนที่ติดตั้งภายในระยะที่กำหนดเพิ่มขึ้นตลอดจนช่วยลดช่วงเส้นทางที่มีความเสี่ยงต่อการขาดแคลนขบวนที่ติดตั้ง ESTS ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองในช่วงที่เกิดเหตุไฟดับ อันเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้รถไฟฟ้าบางขบวนไม่สามารถจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและอาจตกค้างระหว่างสถานีผู้โดยสารได้ แม้ว่าในภาพรวมพลังงานไฟฟ้าสำรองของ ESTS จะยังคงมีอยู่เพียงพอก็ตาม ในทางกลับกัน แม้การเพิ่ม *%ESTS* จะช่วยเพิ่มความครอบคลุมเชิงพื้นที่และจำนวนคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้าที่เป็นไปได้ แต่ย่อมแลกมาด้วยต้นทุนการติดตั้งและภาระการบำรุงรักษาที่สูงขึ้น ดังนั้น ตัวแปรนี้จึงมีบทบาทสำคัญต่อการตอบโจทย์หลักของการศึกษาในการประเมินศักยภาพของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าต่อการลดจำนวนการติดตั้ง ESTS โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งระบบให้กับรถไฟฟ้าทุกขบวน

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลดจำนวนการติดตั้ง ESTS ด้วยแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS กำหนดให้ *%ESTS* เท่ากับร้อยละ 50 ของจำนวนขบวนทั้งหมดเป็นกรณีฐาน และทำการวิเคราะห์ที่ *%ESTS* เท่ากับร้อยละ 25 และ 75 เพื่อพิจารณาผลกระทบทั้งในกรณีลดและเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ภายในโครงข่าย ตลอดจนผลต่อความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเกิดขึ้นได้ สำหรับการกำหนดตำแหน่งขบวนที่ติดตั้ง ESTS ใช้วิธีการกระจายอย่างสม่ำเสมอตามลำดับการปล่อยขบวนรถไฟฟ้า ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงที่บางช่วงของเส้นทางจะไม่มีขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS อยู่ใกล้เคียง ตัวอย่างเช่น เมื่อมีขบวนรถไฟฟ้าภายในโครงข่ายรวมทั้งหมด 8 ขบวน หากพิจารณากรณีที่ *%ESTS* เท่ากับร้อยละ 50 จะมีขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS จำนวน 4 ขบวน และจัดวางสลับกับขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ติดตั้ง เป็นต้น ขณะที่กรณี *%ESTS* อื่น

ก็มีการจัดวางขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ให้กระจายห่างกันอย่างเหมาะสม เพื่อเพิ่มความครอบคลุมของพื้นที่ให้บริการให้มากที่สุด ทั้งนี้ $\%ESTS$ ไม่สามารถพิจารณาแยกจาก H ได้โดยสมบูรณ์ เนื่องจาก H ที่กำหนดการให้บริการระบบในช่วงเวลานั้นเปลี่ยนแปลงไป ค่า N_{total} ก็ย่อมเปลี่ยนแปลงตามสมการที่ 5.1 ดังนั้น เพื่อให้ทราบจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS และสามารถจัดสรรตำแหน่งได้อย่างเหมาะสม จึงอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง $\%ESTS$ และ N_{total} ในการคำนวณจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS (Number of trains equipped with ESTS: N_{ESTS}) ดังสมการที่ 5.2

$$N_{ESTS} = \frac{\%ESTS \times N_{total}}{100} \tag{5.2}$$

5.2.1.2 ตัวแปรควบคุม

การทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าด้วย ESTS นอกจากกำหนดตัวแปรทดสอบ H และ $\%ESTS$ เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความเป็นไปได้ของความสำเร็จของแนวคิดนี้แล้ว ยังได้กำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับคงสภาวะแวดล้อมของระบบให้สอดคล้องและเป็นมาตรฐานเดียวกันในทุกกรณีการทดสอบ ซึ่งช่วยให้ผลลัพธ์สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยใดเป็นหลัก และเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้จริง โดยตัวแปรควบคุมครอบคลุมปัจจัยทางกายภาพของระบบทั้งในส่วนของขบวนรถไฟฟ้าและโครงข่ายระบบจ่ายไฟ ลักษณะการเดินรถจริง และกฎพื้นฐานทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องตลอดจนการควบคุมความแปรปรวนจากภาระผู้โดยสารที่มีผลต่อมวลของรถไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าฉุดลากระหว่างการอพยพในช่วงที่เกิดไฟดับ นอกจากนี้ ยังรวมถึงรูปแบบการเกิดสถานการณ์ไฟดับของระบบและเงื่อนไขการทำงานของ ESTS ที่กำหนดลำดับขั้นตอนการดำเนินการไว้อย่างชัดเจน หัวข้อนี้นำเสนอรายละเอียดของตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการศึกษา พร้อมอธิบายบทบาทและความสำคัญต่อผลการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ดังต่อไปนี้

1) ลักษณะทางกายภาพของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เป็นตัวแปรควบคุมที่กำหนดสมรรถนะการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าและพฤติกรรมการจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟในสภาวะปกติและขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับ ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดให้ตัวแปรนี้มีลักษณะเดียวกันในทุกกรณีการทดสอบ เพื่อให้ผลลัพธ์สะท้อนอิทธิพลของตัวแปรทดสอบที่มีผลต่อการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก โดยลักษณะทางกายภาพของระบบครอบคลุมสองส่วนสำคัญ ได้แก่ ส่วนของขบวนรถไฟฟ้าที่กำหนดโครงสร้างและลักษณะการทำงานทั้งหมดของขบวนรถไฟฟ้า

เช่น สมการการเคลื่อนที่ มวล รูปร่าง แรงต้านทานต่าง ๆ เป็นต้น ตลอดจนข้อกำหนดและขีดความสามารถของระบบที่สามารถดำเนินการได้จริง และส่วนของโครงข่ายระบบจ่ายไฟที่กำหนดคุณลักษณะเชิงโครงสร้างและพารามิเตอร์พื้นฐานทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง เช่น รูปแบบของระบบจ่ายไฟ การแบ่งตอนของระบบ ตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ เป็นต้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการคำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้า การสูญเสียพลังงานไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าตกตามระยะทาง และอื่น ๆ ดังนั้น การทดสอบจึงกำหนดใช้ข้อมูลคุณลักษณะจากกรณีศึกษาของระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม เป็นฐานอ้างอิง

2) ภาระผู้โดยสาร (Passenger load level/Assigned Weight: AW) เป็นตัวแปรควบคุมที่ใช้ระบุระดับภาระบรรทุกของขบวนรถไฟฟ้า ซึ่งกำหนดมวลรวมของรถไฟฟ้าและส่งผลต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าฉุดลากระหว่างการเคลื่อนที่โดยตรง ในงานวิศวกรรมระบบรางมักกำหนดระดับ AW เป็นมาตรฐานตั้งแต่ $AW0$ ถึง $AW4$ เพื่อแทนสภาวะการบรรทุกของขบวนรถไฟฟ้าตั้งแต่รถเปล่าจนถึงบรรทุกหนาแน่นมาก สำหรับใช้ในการออกแบบและประเมินสมรรถนะในระบบ โดยทั่วไป $AW0$ แทนสภาวะรถเปล่าพร้อมให้บริการโดยไม่รวมผู้โดยสาร $AW1$ แทนสภาวะผู้โดยสารน้อยที่มีการพิจารณาน้ำหนักขบวนร่วมกับผู้โดยสารนั่งเต็ม $AW2$ แทนภาวะปานกลางที่มีการพิจารณาน้ำหนักขบวนร่วมกับผู้โดยสารนั่งเต็มและผู้โดยสารยืน 4 คนต่อตารางเมตร $AW3$ แทนภาวะค่อนข้างสูงใกล้เคียงการใช้งานจริงในช่วงหนาแน่นที่มีการพิจารณาน้ำหนักขบวนร่วมกับผู้โดยสารนั่งเต็มและผู้โดยสารยืน 6 คนต่อตารางเมตร และ $AW4$ แทนภาวะบรรทุกสูงมากหรือใกล้ขีดจำกัดการรองรับผู้โดยสารที่มีการพิจารณาน้ำหนักขบวนร่วมกับผู้โดยสารนั่งเต็มและผู้โดยสารยืน 8 คนต่อตารางเมตร ในการทดสอบนี้กำหนดให้ AW คงที่ที่ระดับ $AW3$ เพื่อสะท้อนสภาวะการให้บริการที่มีความหนาแน่นของผู้โดยสารสอดคล้องกับการใช้งานจริง และเพื่อลดความแปรปรวนที่อาจส่งผลต่อผลการทดสอบ ขณะที่ระดับ $AW0$ ถึง $AW2$ มักใช้สำหรับเทียบสมรรถนะในสภาวะการบรรทุกของขบวนรถไฟฟ้าต่ำ ส่วน $AW4$ ใช้แทนกรณีที่ต้องการตรวจสอบสภาวะการบรรทุกสูงสุดของขบวนรถไฟฟ้า นอกจากนี้ จากผลการจำลองในตารางที่ 4.6 พบว่าการเปลี่ยนระดับภาระผู้โดยสารไม่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของ ESTS ในช่วงไฟดับอย่างมีนัยสำคัญ

3) โหลดบริการบนขบวนระหว่างเหตุฉุกเฉิน (Auxiliary/Service Loads) เป็นตัวแปรควบคุมที่กำหนดภาระการใช้พลังงานไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ ESTS ต้องมีการจ่ายไฟอย่างต่อเนื่องภายใต้สถานการณ์ไฟดับ โดยภาระดังกล่าวแยกจากพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบฉุดลากอย่างชัดเจน และส่งผลโดยตรงต่ออัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองของ ESTS รวมถึงขีดความสามารถในการสนับสนุนการอพยพผู้โดยสารและการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้า ซึ่งปกติภาระ

การใช้พลังงานไฟฟ้าเหล่านี้จะครอบคลุมในส่วนของโหลดระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ ระบบควบคุม ระบบสื่อสารและประกาศ และระบบความปลอดภัยอื่น ๆ ตามขอบเขตที่ระบบกำหนดไว้ ดังนั้น การทดสอบนี้จึงกำหนดให้โหลดบริการมีการดึงกำลังไฟฟ้าที่ค่าคงที่ เท่ากับ 270 กิโลวัตต์ ตลอดทุกกรณีตามข้อมูลในตารางที่ 4.1 เพื่อให้ผลลัพธ์การใช้พลังงานไฟฟ้าของ ESTS ของแต่ละกรณีให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน

4) ข้อจำกัดเชิงปฏิบัติการของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า (Energy-sharing operational constraints) เป็นตัวแปรควบคุมที่ใช้กำหนดขอบเขตความเป็นไปได้ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายในโครงข่ายระบบจ่ายไฟเดียวกัน โดยยึดกรอบมาตรฐาน EN50126/IEC62278 ที่กำหนดช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับระบบจ่ายไฟของรถไฟฟ้า เพื่อให้การประเมินการแบ่งปันพลังงานอยู่ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน (British Standards Institution, 2004) กล่าวคือ ณ ตำแหน่งจุดที่ขบวนรถไฟฟ้าอยู่ต้องมีแรงดันไฟฟ้าไม่น้อยกว่าค่าขั้นต่ำที่กำหนด เพื่อคงสมรรถนะให้กับระบบขับเคลื่อนและรักษาเสถียรภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าบนขบวนให้อยู่ในสภาวะปกติ นอกจากนี้ ช่วงที่ขบวนรถไฟฟ้าถูกขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS จะมีการจำกัดความเร็วสูงสุดไว้ที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อันเนื่องมาจากข้อจำกัดด้านกำลังไฟฟ้าที่ระบบสามารถจ่ายได้ การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดให้การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้นได้เมื่อขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS และขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งอยู่ในระยะห่างกันไม่เกินรัศมี 3.5 กิโลเมตร ในทุกกรณีทดสอบ โดยรัศมีดังกล่าวกำหนดขึ้นจากข้อจำกัดด้านแรงดันตกในระบบจ่ายไฟกระแสตรง 750 โวลต์ เพื่อให้แรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไม่ต่ำกว่าค่าขั้นต่ำที่กำหนด และทำให้ระบบขับเคลื่อนสามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ รัศมี 3.5 กิโลเมตรมีความสอดคล้องในเชิงวิศวกรรมกับการออกแบบระบบจ่ายไฟรถไฟฟ้าที่ต้องควบคุมแรงดันตก การสูญเสียพลังงานไฟฟ้า และข้อจำกัดเชิงกลไกการทำงานจริงของขบวนรถไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าค่าที่กำหนด (ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2560)

การกำหนดตัวแปรในหัวข้อนี้ได้คัดเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการประเมินแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS โดยครอบคลุมทั้งตัวแปรทดสอบที่ปรับเปลี่ยนค่าเพื่อสะท้อนสภาวะการปฏิบัติการที่แตกต่างกัน และตัวแปรควบคุมที่คงค่าไว้เพื่อรักษาคุณลักษณะพื้นฐานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและโครงข่ายระบบจ่ายไฟ ภาระผู้โดยสาร ภาระโหลดบริการบนขบวนรถไฟฟ้า และข้อจำกัดเชิงปฏิบัติการของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้สอดคล้องกันตลอดการทดสอบ ส่งผลให้ความแตกต่างของผลลัพธ์สามารถตีความได้อย่างตรงประเด็นภายใต้กรอบการ

ประเมินเดียวกัน อีกทั้งเอื้อต่อการจำแนกสาเหตุของกรณีที่ไม่สำเร็จได้ชัดเจนยิ่งขึ้น อันสนับสนุนความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์โดยรวม

5.2.2 การกำหนดกรณีทดสอบและขั้นตอนการจำลอง

จากตัวแปรทดสอบที่กำหนดในหัวข้อ 5.2.1 สามารถออกแบบกรณีทดสอบให้ครอบคลุมทั้งช่วงความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าและรูปแบบการกระจายของการติดตั้ง ESTS ภายในระบบ เพื่อสะท้อนทั้งโอกาสและข้อจำกัดของการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าอย่างเป็นระบบ ขณะเดียวกัน รูปแบบเหตุการณ์ไฟดับและกระบวนการตอบสนองของ ESTS ถูกกำหนดให้เป็นมาตรฐานเดียวกันในทุกกรณีทดสอบ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบระหว่างกรณีมีความชัดเจนและเหมาะสม รวมทั้งสนับสนุนการอธิบายความสัมพันธ์เชิงกลไกระหว่างเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบ พฤติกรรมการกระจายพลังงานไฟฟ้า และผลลัพธ์การอพยพของขบวนรถไฟฟ้าในแต่ละกรณีได้อย่างเป็นลำดับ การกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวช่วยลดผลรบกวนจากปัจจัยแวดล้อมที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของ H และ $\%ESTS$ ทำให้สามารถตีความผลการตอบสนองของระบบได้อย่างตรงประเด็นมากขึ้น อีกทั้งยังเอื้อต่อการวิเคราะห์เปรียบเทียบว่า ความแตกต่างของผลการอพยพในแต่ละกรณีเกิดจากความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าและความครอบคลุมของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเป็นสำคัญ ด้วยเหตุนี้ การออกแบบกรณีทดสอบในส่วนนี้จึงเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการสรุปแนวโน้มสมรรถนะของระบบภายใต้สถานการณ์ไฟดับในหัวข้อต่อไป โดยรายละเอียดกรณีทดสอบและขั้นตอนการจำลองนำเสนอดังต่อไปนี้

5.2.2.1 การกำหนดกรณีทดสอบ

จากตัวแปรทดสอบ H และ $\%ESTS$ ที่กล่าวไว้ข้างต้น สามารถนำมาสร้างกรณีทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้กรอบเงื่อนไขที่ปรับเปลี่ยนทั้งความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าและจำนวน ESTS ที่ติดตั้งในโครงข่ายระบบจ่ายไฟเดียวกัน ซึ่งช่วยสะท้อนทั้งโอกาสและข้อจำกัดของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าขณะเกิดไฟดับได้อย่างเป็นระบบ โดยในการทดสอบนี้กำหนดให้ H จำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 3.45 6 และ 8 นาที ตามช่วงความถี่การเดินขบวนรถที่พบได้จากตารางเดินรถจริง ซึ่งทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขณะเดียวกันได้กำหนด $\%ESTS$ ไว้ที่ร้อยละ 25, 50 และ 75 ของจำนวนขบวนรถไฟฟ้าทั้งหมด เงื่อนไขทั้งสองมิตินี้ทำให้ได้กรณีทดสอบสำหรับประเมินการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายใต้สถานการณ์ไฟดับ อันเอื้อต่อการเปรียบเทียบแนวโน้มการตอบสนองของระบบในเชิงโครงสร้าง และเมื่อจัดเรียงตำแหน่งของ ESTS ใน

ระบบตามหลักการกระจายอย่างสม่ำเสมอให้สอดคล้องกับแต่ละกรณีทดสอบแล้ว จะได้กรณีทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 กรณีทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

กรณี	H (นาที)	N_{total} (ขบวน)	$\%ESTS$ (%)	N_{ESTS} (ขบวน)	การจัดวาง
1	3.45 ชั่วโมง เร่งด่วน	14	25	4	E_1 N_2 N_3 N_4 E_5 N_6 N_7 E_8 N_9 N_{10} N_{11} E_{12} N_{13} N_{14}
2			50	7	N_1 E_2 N_3 E_4 N_5 E_6 E N_7 E_8 N_9 E_{10} N_{11} E_{12} N_{13} E_{14}
3			75	10	N_1 E_2 E_3 E_4 N_5 E_6 E_7 N_8 E_9 E_{10} E_{11} N_{12} E_{13} E_{14}
4	6 ชั่วโมง ปกติ	8	25	2	E_1 N_2 N_3 N_4 E_5 N_6 N_7 N_8
5			50	4	N_1 E_2 N_3 E_4 N_5 E_6 N_7 E_8
6			75	6	N_1 E_2 E_3 E_4 N_5 E_6 E_7 E_8
7	8 นอก ชั่วโมง เร่งด่วน	6	25	2	E_1 N_2 N_3 E_4 N_5 N_6
8			50	3	N_1 E_2 N_3 E_4 N_5 E_6
9			75	4	N_1 E_2 E_3 N_4 E_5 E_6

หมายเหตุ N_n คือ รถไฟฟ้าขบวนที่ n ที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS และ E_n คือ รถไฟฟ้าขบวนที่ n ที่ติดตั้ง ESTS

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าแต่ละกรณีทดสอบกำหนดจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS โดยคำนวณจากค่า $\%ESTS$ ให้สอดคล้องกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าทั้งหมดที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบภายใต้ค่า H ของกรณีนั้น ๆ และปรับให้อยู่ในรูปของจำนวนเต็มตามข้อจำกัดการเดินรถจริง โดยกรณีทดสอบดังกล่าวครอบคลุมช่วงเงื่อนไขที่ต้องการศึกษาและสามารถใช้เป็นฐานในการเปรียบเทียบผลระหว่างกรณีได้อย่างเป็นระบบ นอกจากนี้ ค่า $\%ESTS$ ยังมีผลโดยตรงต่อขนาด

ESTS ที่ควรเลือกติดตั้งในแต่ละกรณีทดสอบ เนื่องจากสัดส่วนระหว่างขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS และขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งระบบเป็นปัจจัยที่กำหนดภาระการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าต่อ ESTS หนึ่งชุด กล่าวคือ หากจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS มีน้อย ESTS หนึ่งชุดย่อมมีแนวโน้มต้องรองรับขบวนรถไฟฟ้าที่ต้องการรับการสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าในสัดส่วนที่สูงกว่า ขณะที่กรณีที่มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS มากขึ้น ภาระต่อหนึ่งชุดย่อมมีแนวโน้มลดลง ดังนั้น ความเหมาะสมของขนาด ESTS ที่ติดตั้งในโครงข่ายระบบจ่ายไฟจึงมิได้ขึ้นอยู่กับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับสัดส่วนระหว่างจำนวน ESTS และจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ต้องรับการสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าร่วมด้วย ซึ่งทำให้ขนาด ESTS ที่เหมาะสมในแต่ละกรณีแตกต่างกันตามโครงสร้างของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 การกำหนดขนาด ESTS ที่เหมาะสมในแต่ละกรณีทดสอบ

กรณี	H (นาที)	$\%ESTS$ (%)	สัดส่วน ESTS ต่อรถไฟฟ้าผู้รับ	ขนาด ESTS ที่ควรรอบรับได้		
				กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)
1	3.45 ชั่วโมงเร่งด่วน	25	1:3	3,590	2,700	195
2		50	1:1	1,200	900	69
3		75	3:1	1,200	900	69
4	6 ชั่วโมงปกติ	25	1:3	3,590	2,700	195
5		50	1:1	1,200	900	69
6		75	3:1	1,200	900	69
7	8 นอกชั่วโมงเร่งด่วน	25	1:2	2,400	1,800	130
8		50	1:1	1,200	900	69
9		75	2:1	1,200	900	69

สัดส่วนระหว่างจำนวน ESTS และจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ต้องรับการสนับสนุนพลังงานไฟฟ้ามีความสำคัญต่อการออกแบบ ESTS ในแต่ละกรณีทดสอบ ดังแสดงในภาคผนวก ก ทั้งนี้ กรณีทดสอบทั้งหมดจะถูกนำไปใช้กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและลำดับขั้นตอนการจำลองในหัวข้อถัดไป เพื่อให้การประเมินผลลัพธ์เป็นไปภายใต้กรอบเดียวกัน

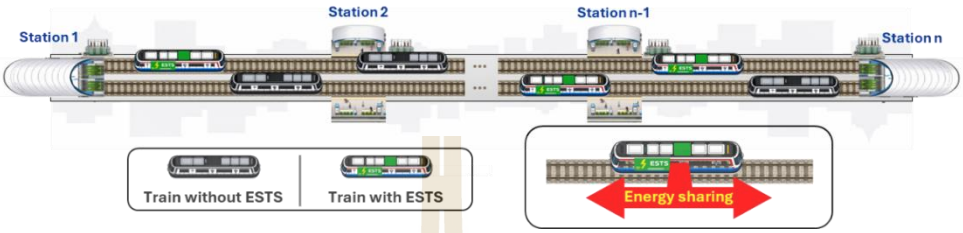
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.2.2.2 ข้อกำหนดและขั้นตอนการจำลอง

จากกรณีทดสอบที่สรุปในตารางที่ 5.1 และกรอบเงื่อนไขที่กำหนดให้เหมือนกันทุกกรณี เพื่อผลลัพธ์ที่ได้อยู่บนฐานการเปรียบเทียบเดียวกันอย่างเป็นระบบ โดยการจำลองเริ่มต้นภายหลังปล่อยขบวนรถไฟฟ้าเข้าสู่เส้นทางให้บริการจนครบทุกขบวนตามจำนวนที่คำนวณได้จากค่า H ที่กำหนดในแต่ละกรณีทดสอบ จากนั้นทำการจำลองเหตุการณ์ไฟดับทั้งโครงข่ายเป็นช่วงเวลาทุก 1 นาทีต่อเนื่อง จนถึงเวลาที่รถไฟฟ้าขบวนแรกเดินทางครบหนึ่งรอบไป–กลับของเส้นทางการให้บริการ แนวทางดังกล่าวทำให้ตำแหน่งสัมพัทธ์ของขบวนรถไฟฟ้า ณ ขณะเกิดเหตุไฟดับมีความหลากหลายสอดคล้องกับสภาพการปฏิบัติการจริงและเอื้อต่อการพิจารณาการกระจายตัวของ ESTS ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างได้ชัดเจน โดยเฉพาะการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งขบวนรถไฟฟ้าและความสามารถในการอพยพผู้โดยสารไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดอย่างปลอดภัย เมื่อถึงเวลาที่กำหนดให้เกิดเหตุไฟดับในแต่ละรอบการจำลอง แบบจำลองจะทำการตัดแหล่งจ่ายไฟหลักออกทั้งโครงข่ายและสั่งให้รถไฟฟ้าทุกขบวนเข้าสู่สู่ลำดับการตอบสนองเหตุฉุกเฉิน โดยกำหนดช่วงหน่วงเวลา 5 นาที ณ ตำแหน่งขณะนั้นที่ขบวนรถไฟฟ้าหยุดนิ่ง เพื่อแทนเวลาที่ระบบใช้ตรวจสอบ ยืนยันเหตุการณ์ และสั่งการให้ระบบ ESTS เริ่มทำงาน นอกจากนี้การกำหนดช่วงหน่วงเวลายังช่วยให้การจัดเก็บและตีความผลการจำลองทำได้เป็นขั้นตอน เนื่องจากช่วงเวลาการทำงานของระบบในแต่ละสภาวะถูกแบ่งออกจากกันอย่างชัดเจน

สำหรับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ในแต่ละกรณีคำนวณจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 5.2 แล้วกำหนดตำแหน่งขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ด้วยหลักการกระจายอย่างสม่ำเสมอตามลำดับการปล่อยขบวนรถไฟฟ้าทั้งหมด เพื่อลดความเสี่ยงของช่วงเส้นทางบริการที่ไม่มีขบวนรถไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองอยู่ในบริเวณที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น เมื่อมีรถไฟฟ้ารวม 8 ขบวน และกำหนดให้ $\%ESTS$ = 50% จะได้รถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS มีทั้งหมด 4 ขบวนที่ถูกจัดวางสลับกับขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ติดตั้ง ESTS เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 5.1 ภายใต้การจัดวางตำแหน่งขบวนรถไฟฟ้าดังกล่าว ลำดับความการทำงานของ ESTS ให้ความสำคัญกับของการจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองแก่ขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS เองก่อน เพื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุด จากนั้นจึงพิจารณาการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไปยังขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ตามขอบเขตเชิงปฏิบัติการที่กำหนด โดยการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าด้วยพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ทั้งหมดจะถูกจำกัดความเร็วไว้ที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากข้อจำกัดด้านกำลังไฟฟ้าที่ ESTS สามารถจ่ายได้ และกำหนดโหลดบริการบนขบวนรถไฟฟ้าจะคงที่ไว้ที่ 270 กิโลวัตต์ตลอดการจำลอง ทั้งนี้การอนุญาตให้เกิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าถูกกำกับด้วยข้อจำกัดเชิงปฏิบัติการและ

เงื่อนไขตัวแปรเดียวกันทุกกรณี แสดงดังรูปที่ 5.2 เพื่อให้ผลลัพธ์สะท้อนข้อจำกัดจากการกระจายตัวของขบวนรถไฟฟ้าและการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าตามระยะทาง



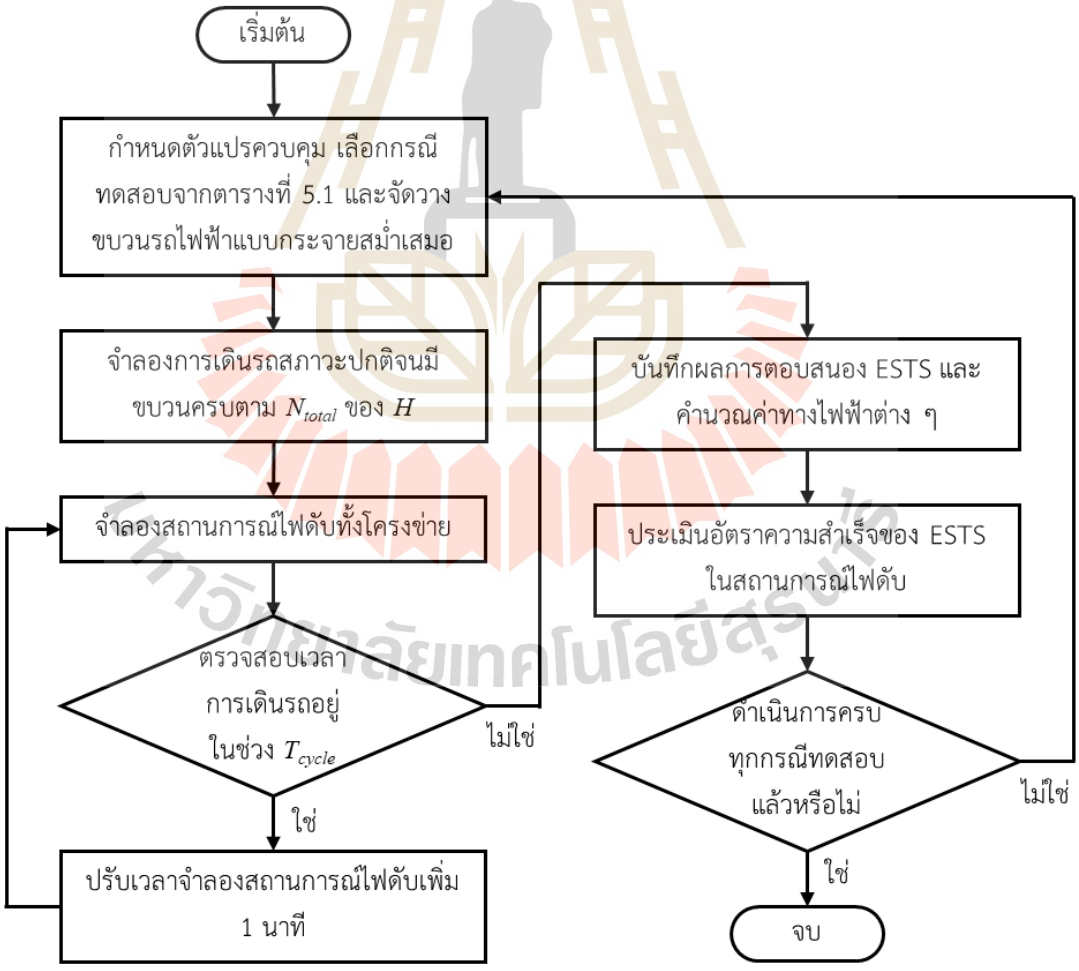
รูปที่ 5.1 การกระจายตำแหน่งของ ESTS ครอบคลุมแนวเส้นทาง



รูปที่ 5.2 ตัวแปรทดสอบและตัวแปรควบคุมที่กำหนดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS

เมื่อกำหนดเงื่อนไขและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองครบถ้วนแล้ว ขั้นตอนการทดสอบสามารถสรุปลำดับการดำเนินงานที่สำคัญได้ดังนี้ (1) เลือกกรณีทดสอบจากตารางที่ 5.1 ตั้งค่าตัวแปร และจัดวางขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ตามหลักการกระจายอย่างสม่ำเสมอ (2)

จำลองการเดินรถในสภาวะปกติจนกระทั่งมีขบวนรถไฟฟ้าเข้าสู่เส้นทางการให้บริการครบตามที่กำหนด (3) จำลองเหตุการณ์ไฟดับทั้งโครงข่ายโดยปรับเปลี่ยนเวลาเกิดเหตุเพิ่มทีละ 1 นาทีภายในช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อให้ตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้า ณ ขณะเกิดเหตุมีความหลากหลาย และใช้พิจารณาการทำงานของ ESTS ทั้งในกระบวนการอพยพของขบวนที่ติดตั้งระบบและการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสำหรับสนับสนุนการอพยพของขบวนที่ไม่ได้ติดตั้งระบบ (4) บันทึกผลการทำงานของ ESTS และคำนวณค่าตัวชี้วัดที่จำเป็น ได้แก่ ตำแหน่ง ความเร็ว สถานะการอพยพของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS ใช้ไป และผลสำเร็จของการอพยพโดยรวม (5) ประเมินอัตราความสำเร็จของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS และ (6) ปรับไปยังกรณีทดสอบถัดไปตามตารางที่ 5.1 แล้วทำซ้ำกระบวนการจำลองจนครบทุกกรณี ซึ่งสามารถสรุปลำดับขั้นตอนโดยรวมได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ขั้นตอนการจำลองการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS

การกำหนดกรอบระเบียบวิธีสำหรับการประเมินแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS เริ่มจากการระบุตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งตัวแปรทดสอบและตัวแปรควบคุม เพื่อให้การจำลองสะท้อนสภาพการปฏิบัติการจริงภายใต้เงื่อนไขที่สามารถเปรียบเทียบข้ามกรณีได้ จากนั้นได้ออกแบบกรณีทดสอบตามระดับค่า H และ $\%ESTS$ รวมถึงกำหนดรูปแบบเหตุการณ์ไฟดับ ลำดับการตอบสนองของระบบ และข้อกำหนดเชิงปฏิบัติการที่ใช้เป็นมาตรฐานเดียวกันในทุกกรณี พร้อมกำหนดขั้นตอนการจำลองและการบันทึกตัวชี้วัดสำหรับวิเคราะห์ผลลัพธ์ให้สอดคล้องกันภายใต้กรอบความเป็นไปได้ทางเทคนิคในแง่ความครอบคลุมเชิงพื้นที่และการตอบสนองของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน หัวข้อถัดไปจะนำเสนอผลการทดสอบตามกรณีที่กำหนด เพื่อประเมินศักยภาพ ข้อจำกัด และแนวโน้มของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในสถานการณ์ไฟดับ

5.3 การทดสอบ

การทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการภายใต้กรอบข้อกำหนดและเงื่อนไขการจำลองเดียวกันตามที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 5.2 โดยกำหนดกรณีทดสอบจากค่า H เพื่อใช้เป็นตัวแทนความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 3 ระดับ ได้แก่ ช่วงชั่วโมงเร่งด่วน (H =3.45 นาที) ช่วงชั่วโมงปกติ (H =6 นาที) และช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน (H =8 นาที) และในแต่ละค่า H กำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ที่ระดับ 25 50 และ 75 ของจำนวนขบวนรถไฟฟ้าทั้งหมด ส่งผลให้ได้กรณีทดสอบรวมทั้งสิ้น 9 กรณี ซึ่งครอบคลุมทั้งเงื่อนไขที่เอื้อต่อการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและเงื่อนไขที่มีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของระบบอย่างเหมาะสม สำหรับการจำลองในแต่ละกรณีทดสอบ ได้กำหนดให้แทรกเหตุการณ์ไฟดับทั้งโครงข่ายในหลายช่วงเวลา โดยเลื่อนเวลาเกิดเหตุเพิ่มทีละ 1 นาทีภายในช่วงที่ขบวนรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไป–กลับระหว่างสถานีต้นทางและปลายทางครบหนึ่งรอบ เพื่อให้ได้ตำแหน่งสัมพัทธ์ของขบวนรถไฟฟ้าที่แตกต่างกันอย่างเพียงพอ และช่วยให้การประเมินผลครอบคลุมสภาวะการตอบสนองของระบบที่หลากหลายมากขึ้น จึงทำให้ในแต่ละกรณีมีผลการจำลองย่อยหลายเหตุการณ์ ทั้งกรณีที่ขบวนรถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถอพยพไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ครบถ้วน และกรณีที่ยังมีขบวนรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนเส้นทางการให้บริการ ดังนั้น เพื่อให้การนำเสนอผลมีความกระชับและชัดเจน หัวข้อนี้จึงเลือกแสดงเฉพาะเหตุการณ์ตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของกรณีอพยพสำเร็จและกรณีไม่สำเร็จในแต่ละกรณีทดสอบ ร่วมกับการสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนองของระบบ ขณะที่การเปรียบเทียบแนวโน้มโดยรวมของทุกกรณีจะอภิปรายในหัวข้อ 5.4 ต่อไป

5.3.1 การทดสอบช่วงชั่วโมงเร่งด่วน (H = 3.45 นาที)

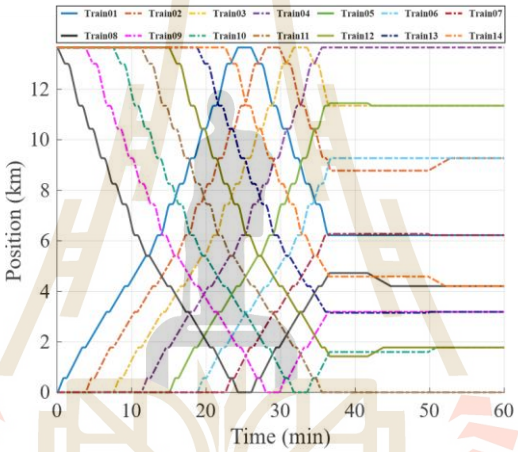
กรณี H = 3.45 นาที ถูกกำหนดให้เป็นตัวแทนสภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงเร่งด่วน ซึ่งมีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบอยู่ในระดับสูง และมีระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าแนวโน้มสั้นลง ส่งผลให้โอกาสเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้ามีมากกว่ากรณีที่ H มีค่าสูงกว่า อย่างไรก็ตาม แม้เงื่อนไขดังกล่าวจะเอื้อต่อการเชื่อมโยงระหว่างขบวนรถไฟฟ้า แต่ความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าที่สูงยังอาจทำให้ ESTS บางชุดต้องรับภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหลายขบวนในช่วงเวลาใกล้เคียงกันได้ ดังนั้น การทดสอบในกรณีนี้จึงมีความสำคัญต่อการประเมินทั้งศักยภาพของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและข้อจำกัดของ ESTS ภายใต้สภาวะที่ระบบมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสำรองพร้อมกันหลายตำแหน่ง

การจำลองกรณีนี้มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการพร้อมกันเฉลี่ยประมาณ 14 ขบวน ซึ่งถือเป็นกรณีที่มีความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าสูงที่สุดในชุดการทดสอบนี้ การกระจายตัวของขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายจึงเพิ่มโอกาสให้ขบวนที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS อยู่ภายในระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของขบวนที่ติดตั้ง ESTS มากขึ้น โดยเฉพาะภายใต้เงื่อนไขระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุด 3.5 กิโลเมตร อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จของการอพยพไม่ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างเพียงอย่างเดียว แต่ยังสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าในขณะเกิดเหตุไฟดับ ทิศทางการเคลื่อนที่ สถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุด พลังงานไฟฟ้าคงเหลือของ ESTS และขีดจำกัดด้านกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟกระแสตรงร่วมด้วย

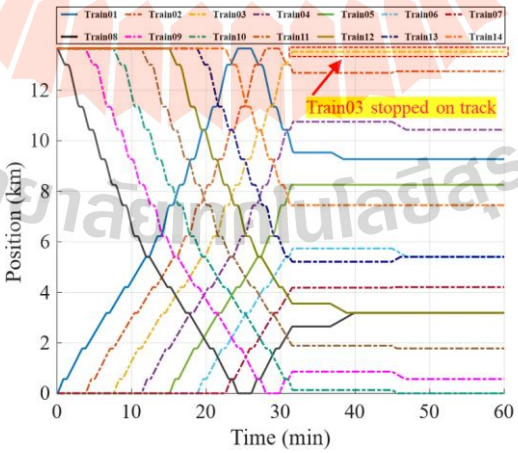
สำหรับการนำเสนอผลในหัวข้อนี้ จะพิจารณากรณีสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ที่แตกต่างกัน ได้แก่ $\%ESTS$ = 25 50 และ 75 เพื่อเปรียบเทียบผลของจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่มีแหล่งพลังงานสำรองต่อความสามารถในการอพยพ ตัวชี้วัดหลักที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วยอัตราความสำเร็จของการอพยพ จำนวนเหตุการณ์ที่ยังมีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนทางวิ่ง ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟฟ้าได้รับ กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ ESTS ต้องจ่าย รวมถึงพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในแต่ละชุด ทั้งนี้ การแสดงผลจะเลือกนำเสนอเหตุการณ์ตัวอย่างร่วมกับการสรุปอัตราความสำเร็จของกรณีทดสอบ เพื่อสะท้อนพฤติกรรมของระบบภายใต้สภาวะชั่วโมงเร่งด่วน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.3.1.1 กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงเร่งด่วน โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 25 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับต่ำเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้ระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้ามีแนวโน้มสั้นลงและเอื้อต่อการเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในบางช่วงเวลา แต่ขณะเดียวกันจำนวน ESTS ที่จำกัดย่อมทำให้ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อหนึ่งชุดมีแนวโน้มสูงขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบในกรณีดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

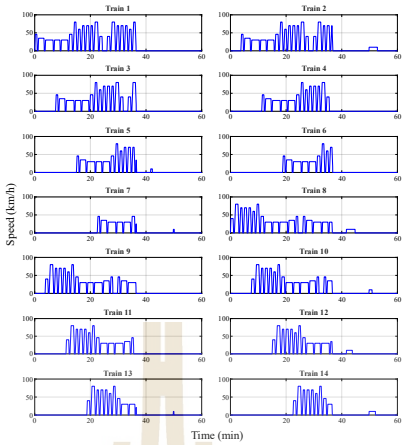


(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

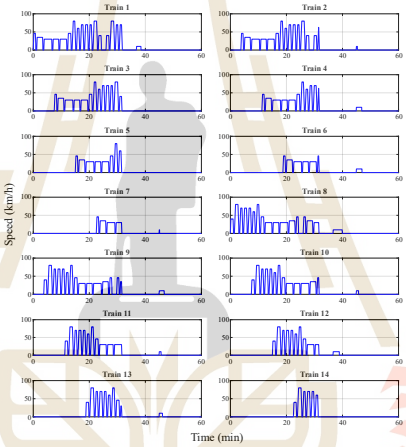


(ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

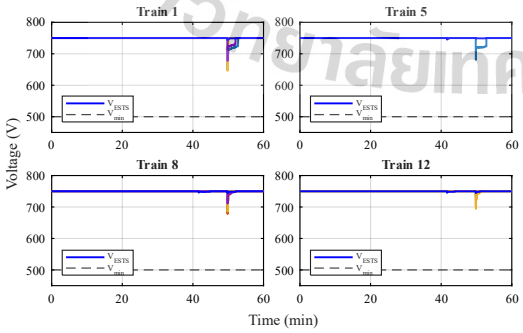


(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

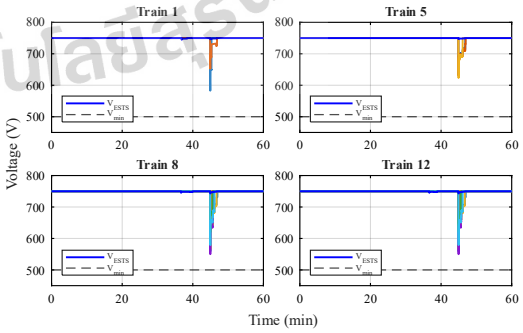


(ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

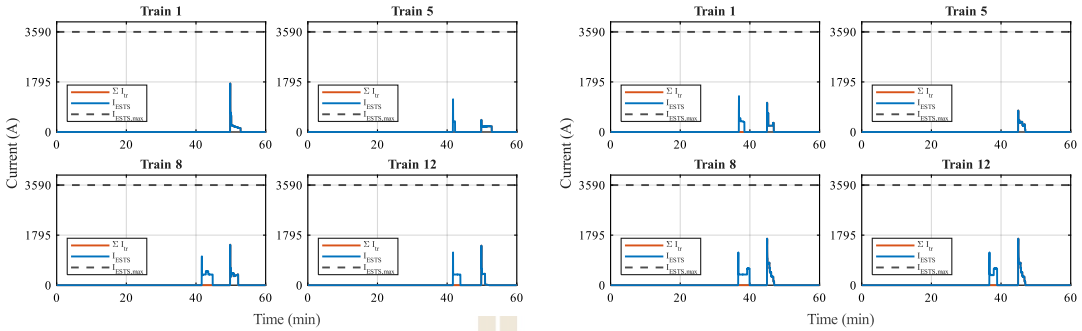


(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



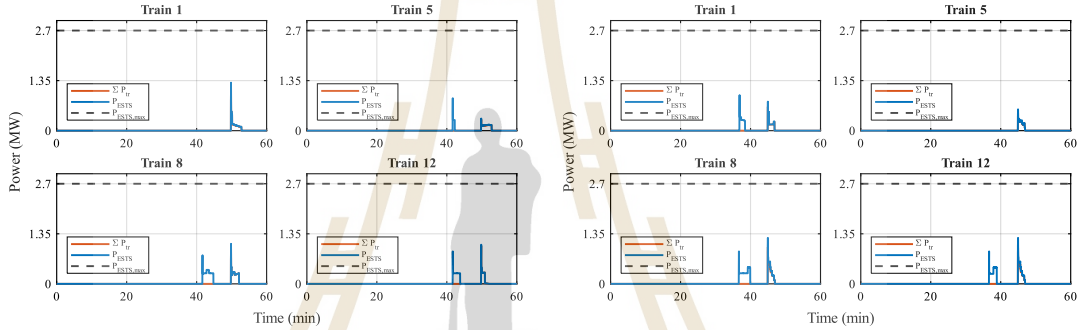
(ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.6 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25%



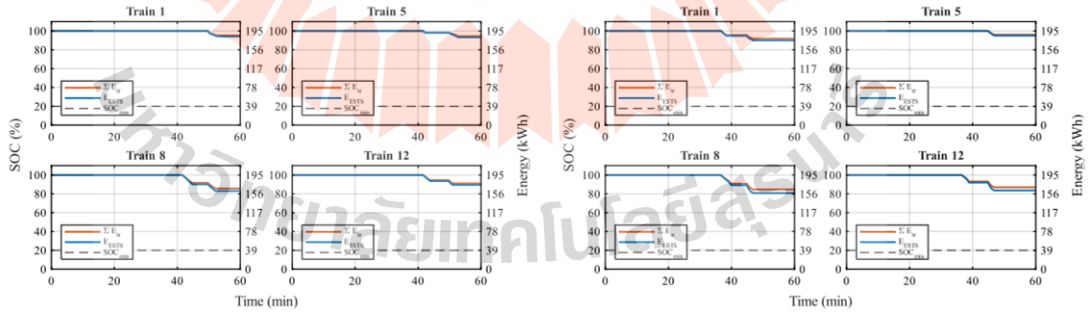
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.7 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25%



(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.8 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

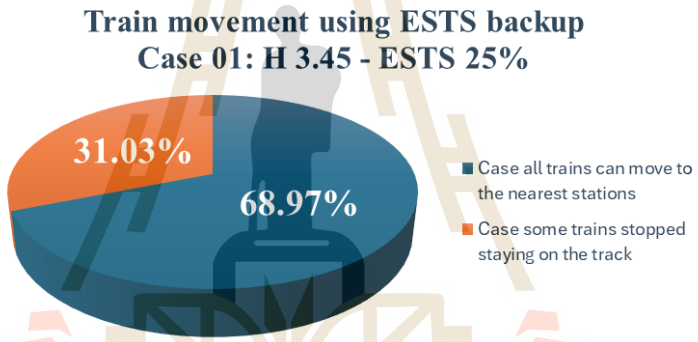


(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.9 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25% พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟฟ้าให้สามารถ

เคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 68.97 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.10 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามีโอกาสประสบความสำเร็จสูงในสภาวะการเดินรถที่มีความหนาแน่นสูง แม้จะมีการติดตั้ง ESTS ในสัดส่วนที่จำกัด อย่างไรก็ตาม ยังปรากฏบางเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนเส้นทางการให้บริการ โดยสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ซึ่งอยู่ห่างจากขบวนรถไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่า ภายใต้สภาวะชั่วโมงเร่งด่วนและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับต่ำ ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้

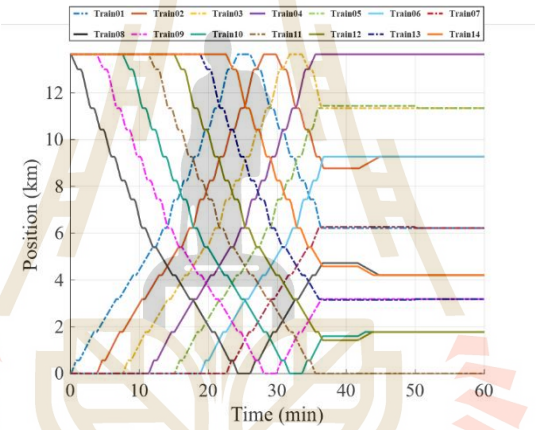


รูปที่ 5.10 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

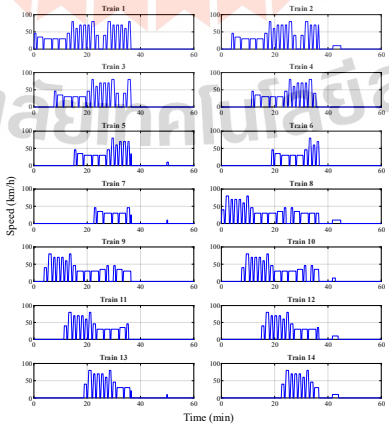
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.3.1.2 กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

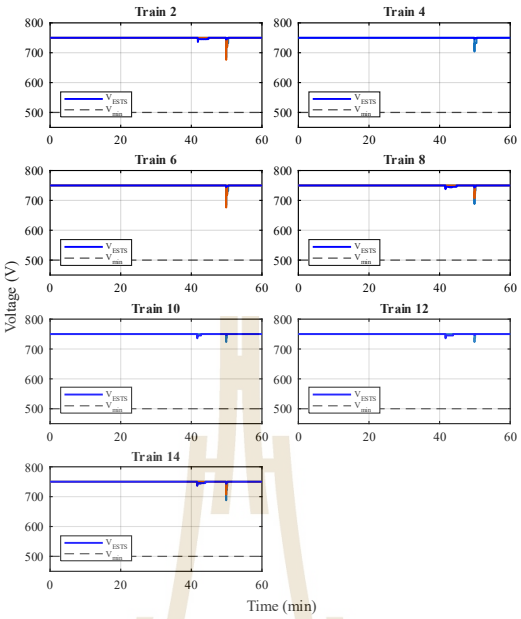
กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงเร่งด่วน โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 50 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับปานกลางเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS เพิ่มขึ้นจากกรณีร้อยละ 25 และช่วยให้ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มดีขึ้น ขณะเดียวกันภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS แต่ละชุดมีแนวโน้มกระจายตัวได้เหมาะสมมากขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบในกรณีดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้



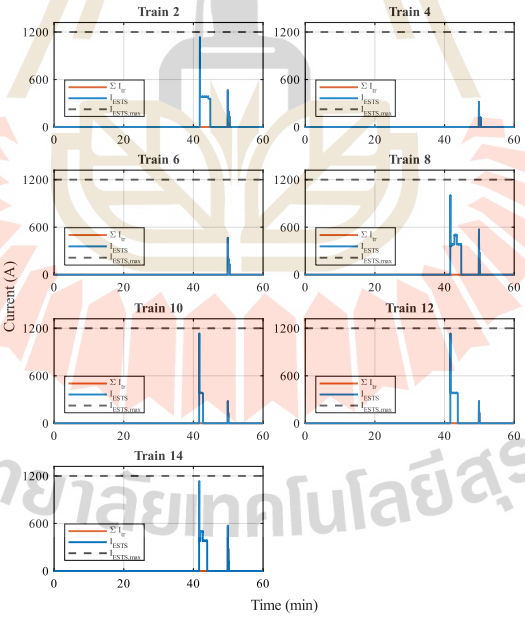
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



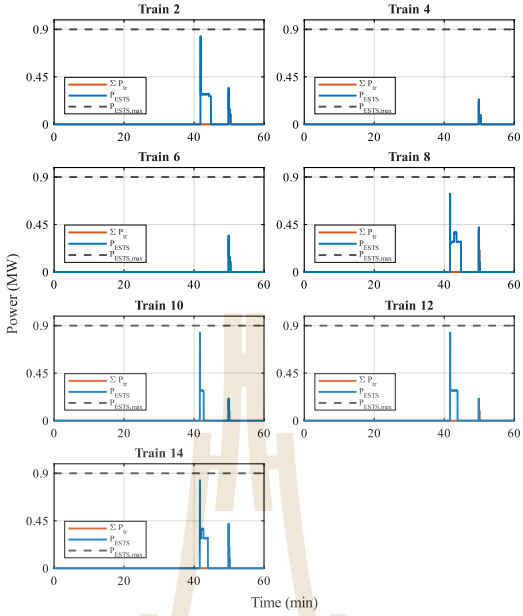
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



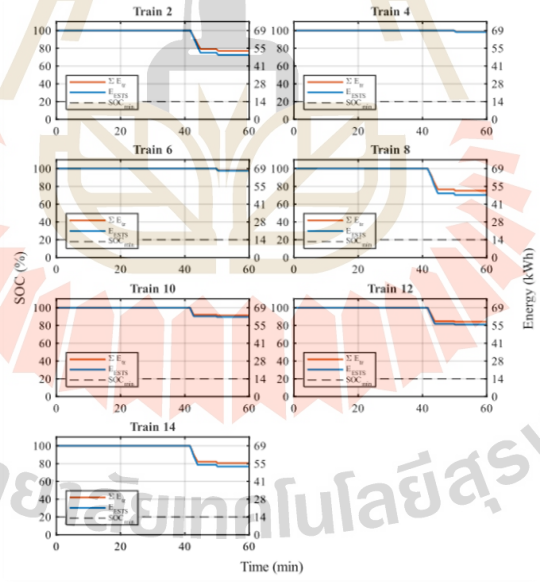
รูปที่ 5.13 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



รูปที่ 5.14 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



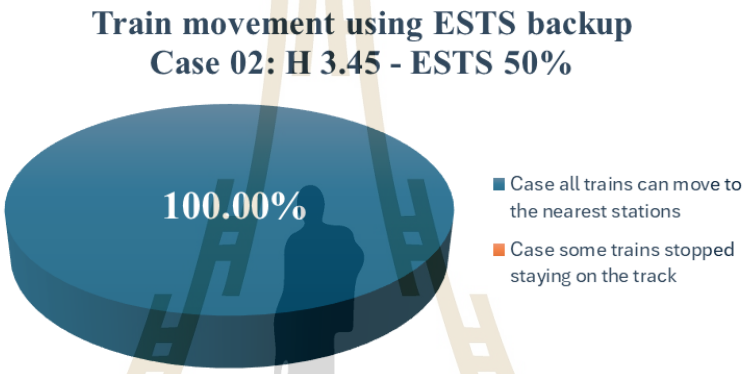
รูปที่ 5.15 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



รูปที่ 5.16 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50% พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟฟ้าให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 100.00 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดง

ดังรูปที่ 5.17 ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่า ภายใต้สภาวะชั่วโมงเร่งด่วนและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับปานกลาง ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามีเพียงพอต่อการจับคู่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้ง ESTS ในทุกเหตุการณ์ที่ทำการทดสอบ อีกทั้งยังช่วยให้ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระจายตัวระหว่าง ESTS หลายชุดได้เหมาะสม ลดแนวโน้มการเกิดคอขวดจากการพึ่งพา ESTS เพียงบางชุดส่งผลให้ภาพรวมการตอบสนองต่อเหตุไฟดับของ ESTS ในกรณีทดสอบนี้สูงขึ้น

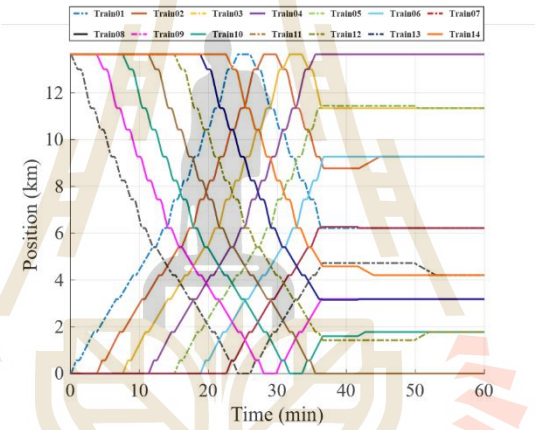


รูปที่ 5.17 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

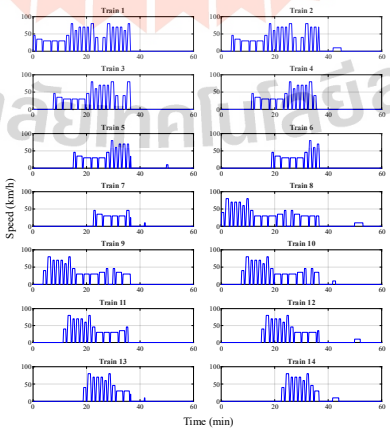
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.3.1.3 กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

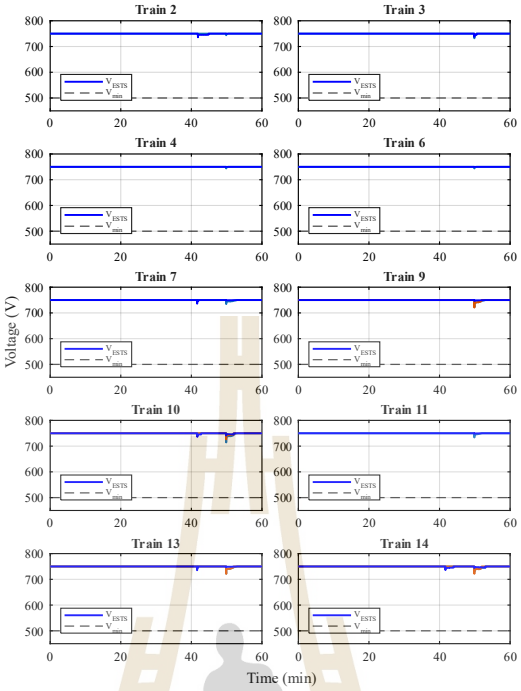
กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงเร่งด่วน โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 75 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับสูงเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS เพิ่มขึ้นจากกรณีร้อยละ 25 และ 50 และช่วยให้ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มดีขึ้น ขณะเดียวกันภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS แต่ละชุดมีแนวโน้มกระจายตัวได้ทั่วถึงมากขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบในกรณีดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้



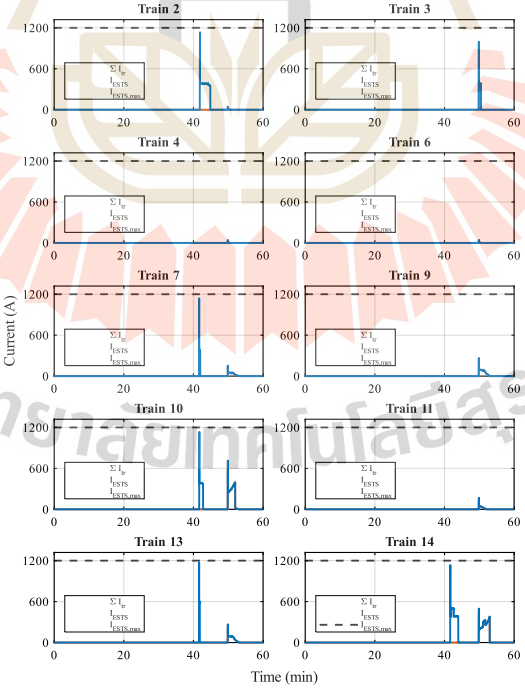
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



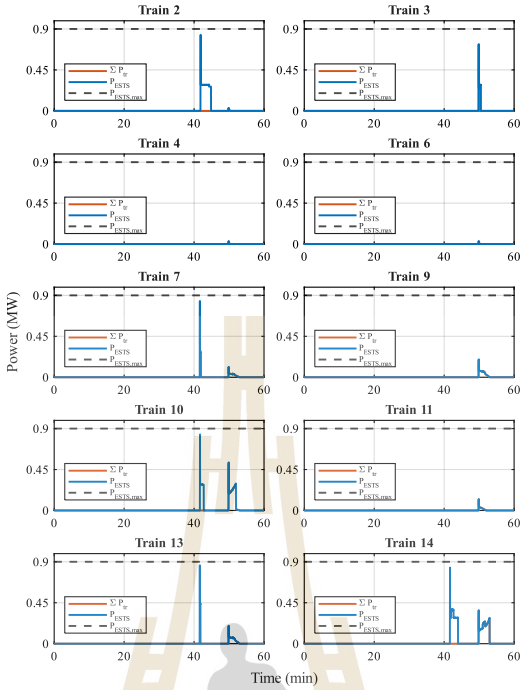
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



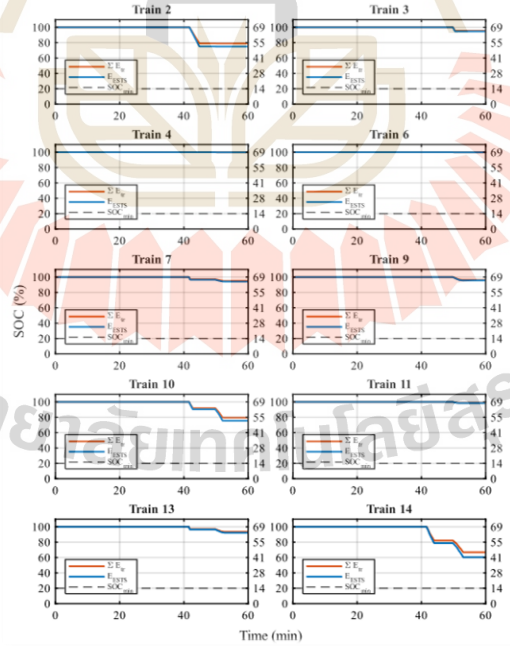
รูปที่ 5.20 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



รูปที่ 5.21 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

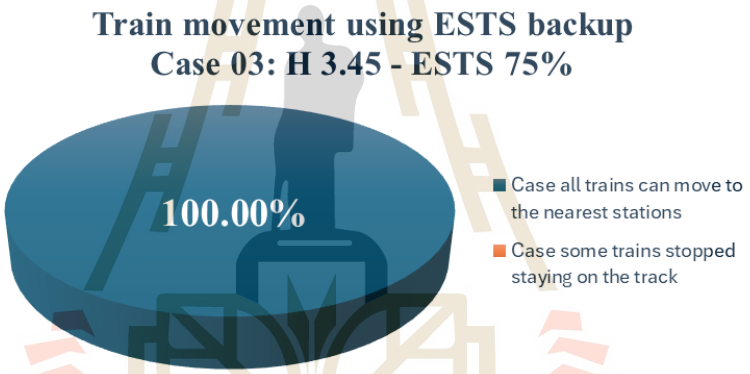


รูปที่ 5.22 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



รูปที่ 5.23 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75% พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟฟ้าให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 100.00 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.24 ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่า ภายใต้สภาวะชั่วโมงเร่งด่วนและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับสูง ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามีเพียงพอต่อการจับคู่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้ง ESTS ในทุกเหตุการณ์ที่ทำการทดสอบ อีกทั้งยังช่วยให้ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระจายตัวระหว่าง ESTS หลายชุดได้เหมาะสม ลดแนวโน้มการเกิดคอขวดจากการพึ่งพา ESTS เพียงบางชุด ส่งผลให้ระบบมีความต่อเนื่องของการตอบสนองต่อเหตุไฟดับสูงขึ้นในภาพรวมของกรณีทดสอบนี้



รูปที่ 5.24 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.3.2 การทดสอบช่วงชั่วโมงปกติ (H = 6 นาที)

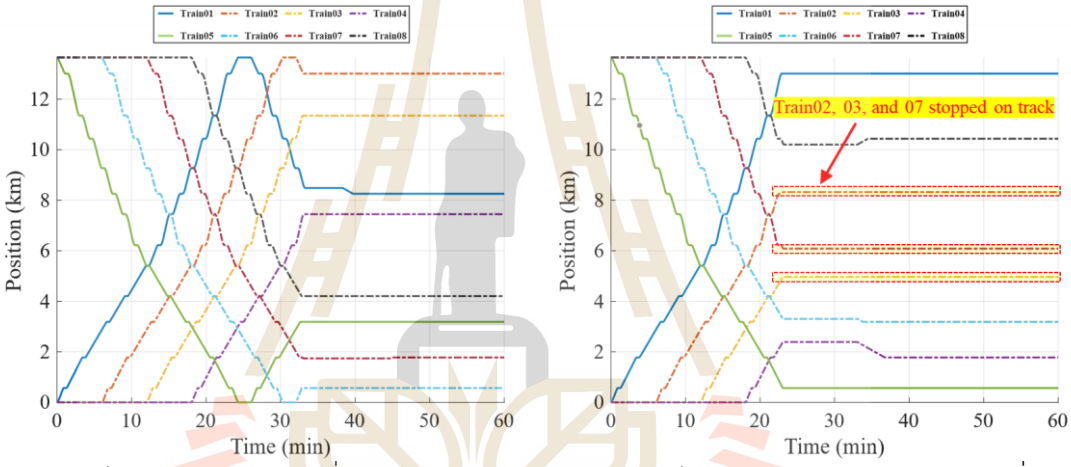
กรณี H = 6 นาที ถูกกำหนดให้เป็นตัวแทนสภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงปกติ ซึ่งมีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับช่วงชั่วโมงเร่งด่วน และมีระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โอกาสเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าลดลงจากกรณี H = 3.45 นาที อย่างไรก็ตาม แม้ความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าที่ลดลงจะช่วยลดแนวโน้มการกระจุกตัวของภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าบน ESTS บางชุด แต่ก็ทำให้ความสำเร็จของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองในโครงข่ายมากขึ้น ดังนั้น การทดสอบในกรณีนี้จึงมีความสำคัญต่อการประเมินขีดความสามารถของ ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถทั่วไป ซึ่งมีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าและโอกาสการเชื่อมโยงระหว่างขบวนอยู่ในระดับปานกลาง

การจำลองกรณีนี้มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการพร้อมกันเฉลี่ยประมาณ 8 ขบวน ซึ่งต่ำกว่ากรณีชั่วโมงเร่งด่วน แต่ยังเพียงพอสำหรับการพิจารณาความเป็นไปได้ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่าย การกระจายตัวของขบวนรถไฟฟ้าในกรณีนี้ทำให้บางเหตุการณ์มีขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS อยู่ภายในระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุด 3.5 กิโลเมตร ขณะที่บางเหตุการณ์อาจมีระยะห่างเกินกว่าข้อจำกัดที่กำหนด ส่งผลให้ไม่สามารถแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้แม้ระบบยังมีพลังงานไฟฟ้าสำรองคงเหลืออยู่ ดังนั้น ผลการทดสอบในกรณี H = 6 นาที จึงสามารถสะท้อนความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้า สัดส่วนการติดตั้ง ESTS และข้อจำกัดด้านระยะทางในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้ชัดเจน

สำหรับการนำเสนอผลในหัวข้อนี้ จะพิจารณากรณีสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ที่แตกต่างกัน ได้แก่ $\%ESTS$ = 25 50 และ 75 เพื่อเปรียบเทียบผลของจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่มีแหล่งพลังงานสำรองต่อความสามารถในการอพยพภายใต้สภาวะชั่วโมงปกติ ตัวชี้วัดหลักที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วยอัตราความสำเร็จของการอพยพ จำนวนเหตุการณ์ที่ยังมีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนทางวิ่ง ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟฟ้าได้รับ กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ ESTS ต้องจ่าย รวมถึงพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในแต่ละชุด ทั้งนี้ การแสดงผลจะเลือกนำเสนอเหตุการณ์ตัวอย่างร่วมกับการสรุปอัตราความสำเร็จของกรณีทดสอบ เพื่อสะท้อนพฤติกรรมของระบบภายใต้สภาวะชั่วโมงปกติ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

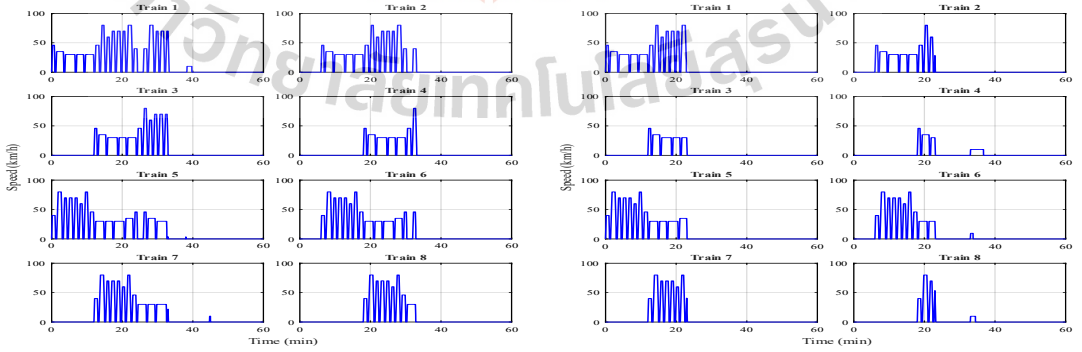
5.3.2.1 กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงปกติ โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 25 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับต่ำเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้ระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงชั่วโมงเร่งด่วน และส่งผลให้โอกาสในการเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าลดลง ขณะเดียวกันจำนวน ESTS ที่จำกัดย่อมทำให้ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อหนึ่งชุดมีแนวโน้มสูงขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบในกรณีดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้



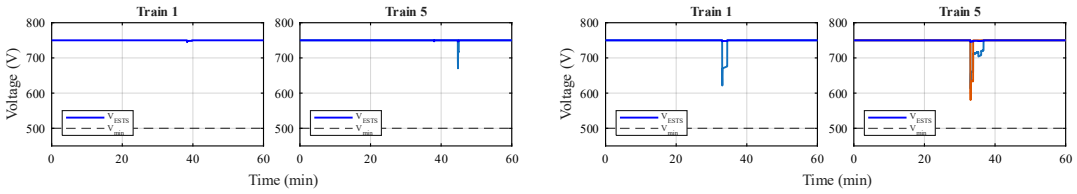
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%



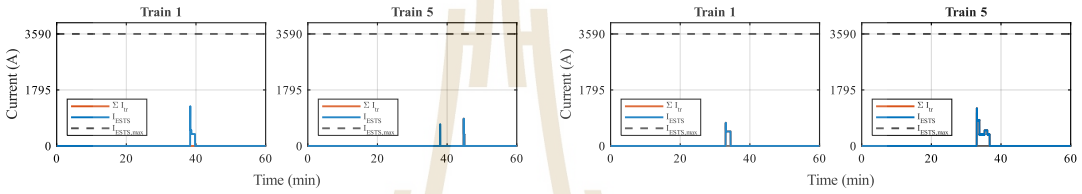
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%



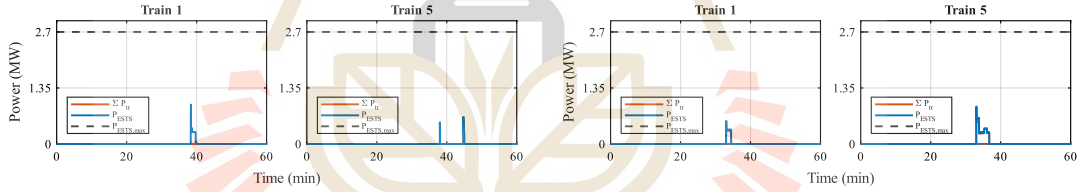
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.27 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%



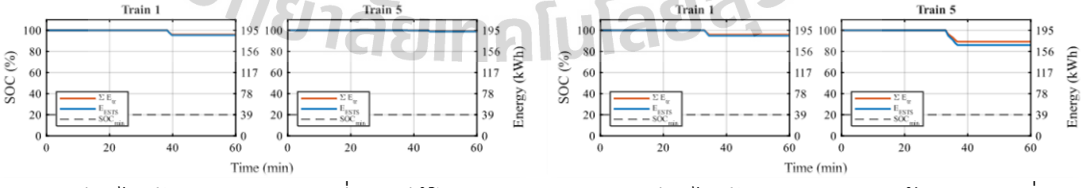
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.28 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%



(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

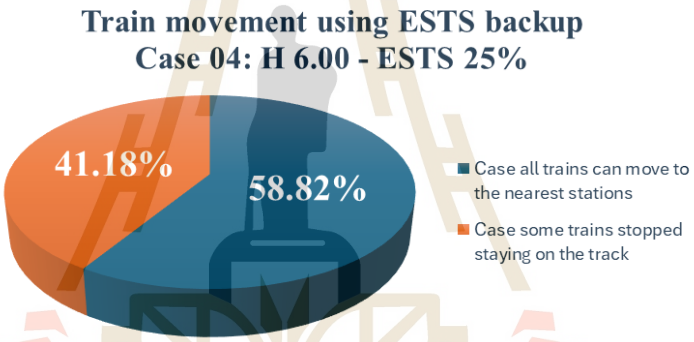
รูปที่ 5.29 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%



(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.30 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25% พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟฟ้าให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 58.82 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.31 โดยยังปรากฏหลายเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนเส้นทางการให้บริการ ซึ่งสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ซึ่งอยู่ห่างจากขบวนรถไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้สภาวะชั่วโมงปกติและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับต่ำ ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้ในระดับที่ยังจำกัด และยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้

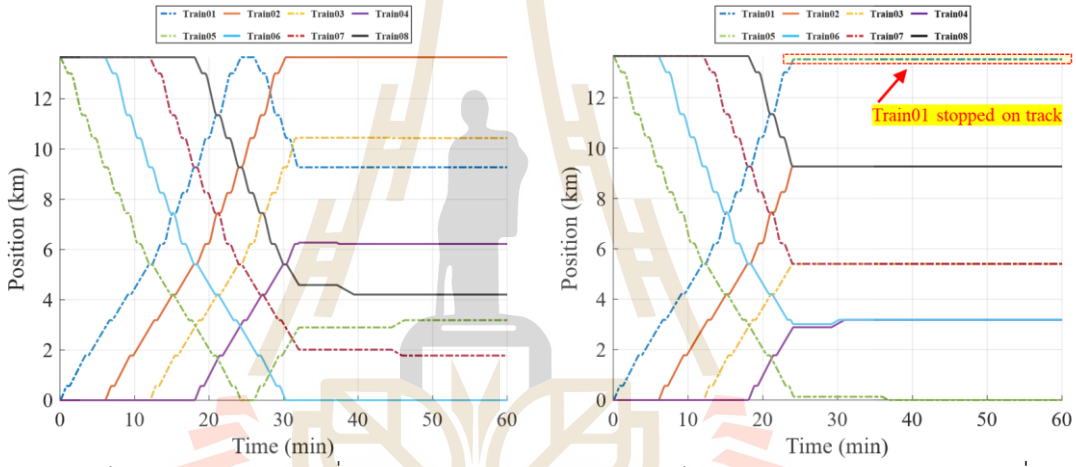


รูปที่ 5.31 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

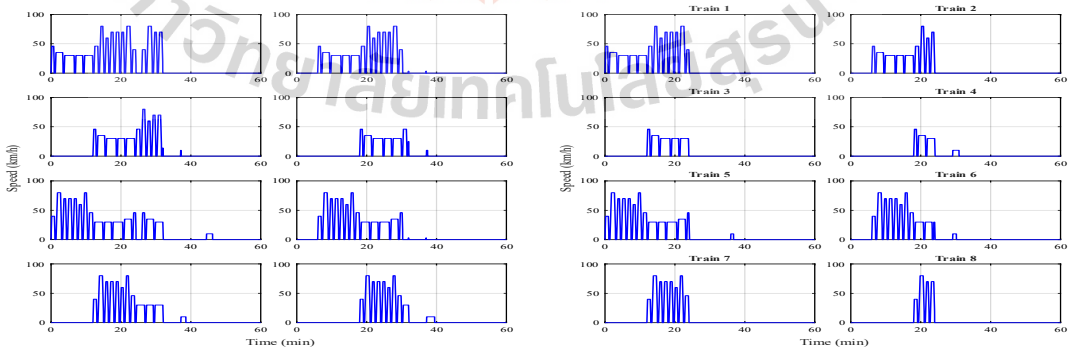
5.3.2.2 กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงปกติ โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 50 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับปานกลางเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS เพิ่มขึ้นจากกรณีร้อยละ 25 และช่วยให้ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าดีขึ้น ขณะเดียวกันภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS แต่ละชุดมีแนวโน้มกระจายตัวเหมาะสมมากขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบ พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้



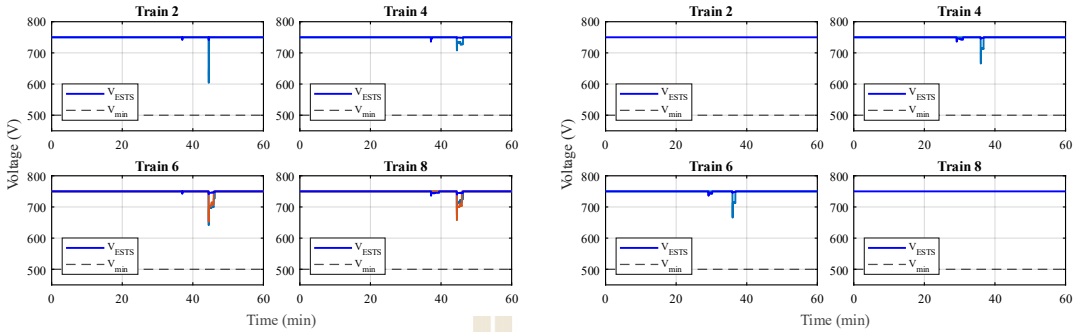
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



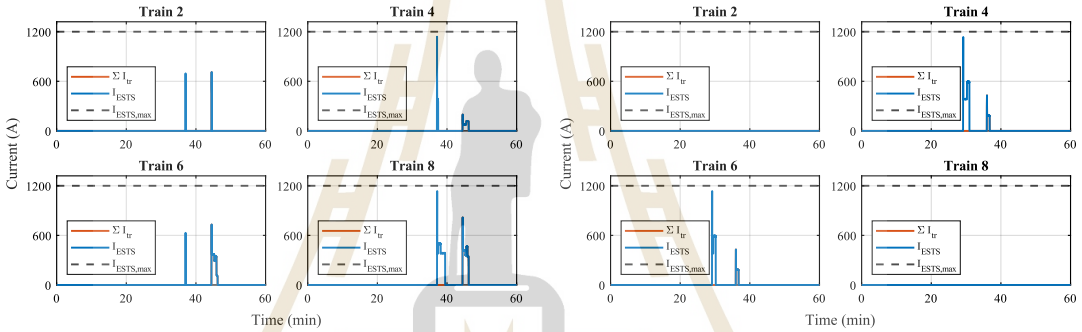
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



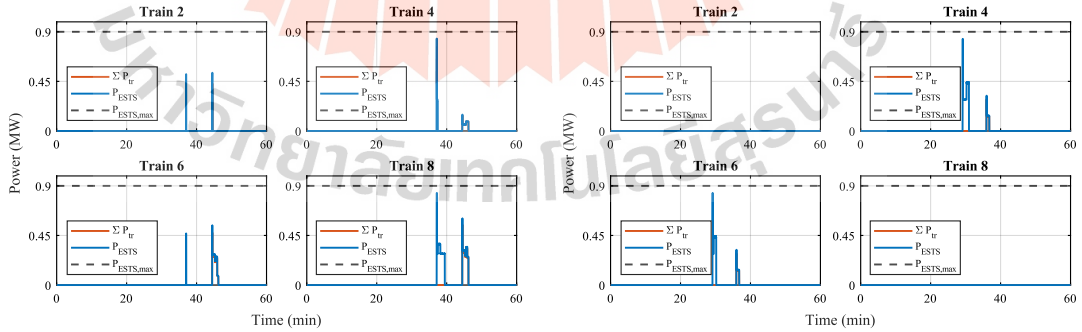
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.34 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



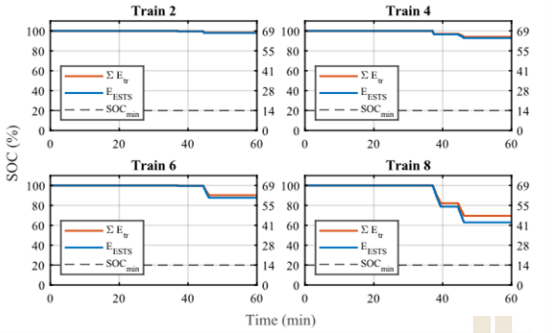
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.35 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

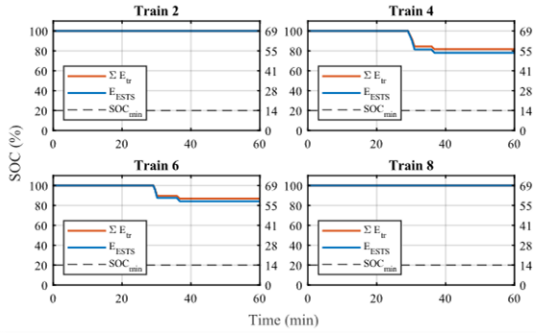


(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.36 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



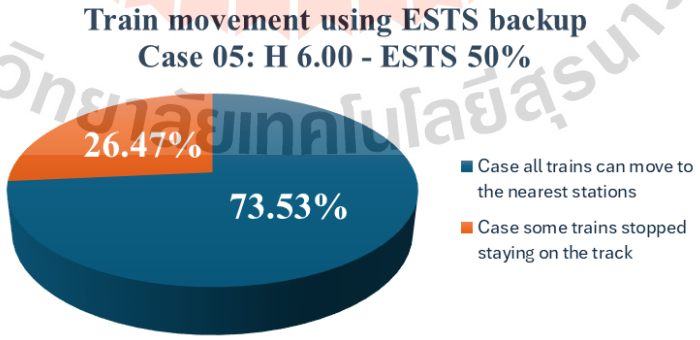
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



(ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.37 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

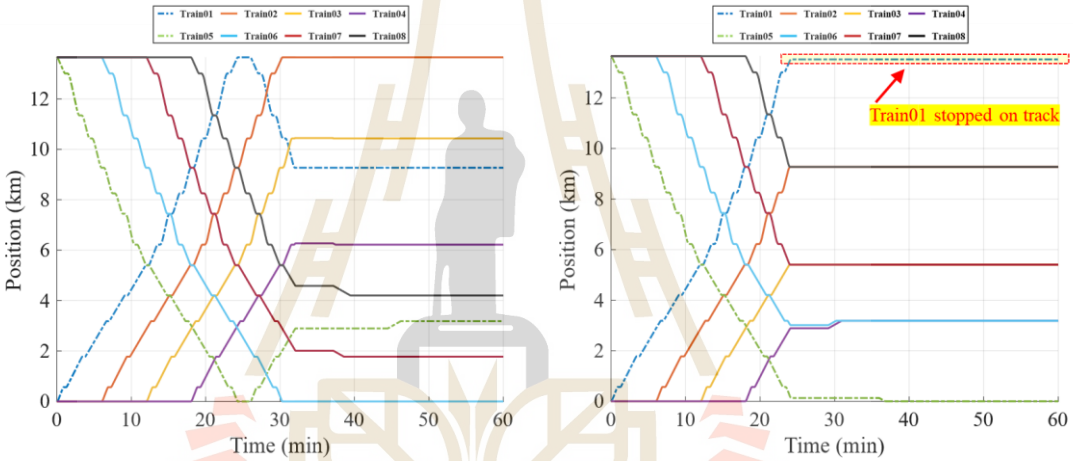
เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50% พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟฟ้าให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 75.53 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.38 อย่างไรก็ตาม ยังปรากฏบางเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนเส้นทางการให้บริการ โดยสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ซึ่งอยู่ห่างจากขบวนรถไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้สภาวะชั่วโมงปกติและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับปานกลาง ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้



รูปที่ 5.38 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

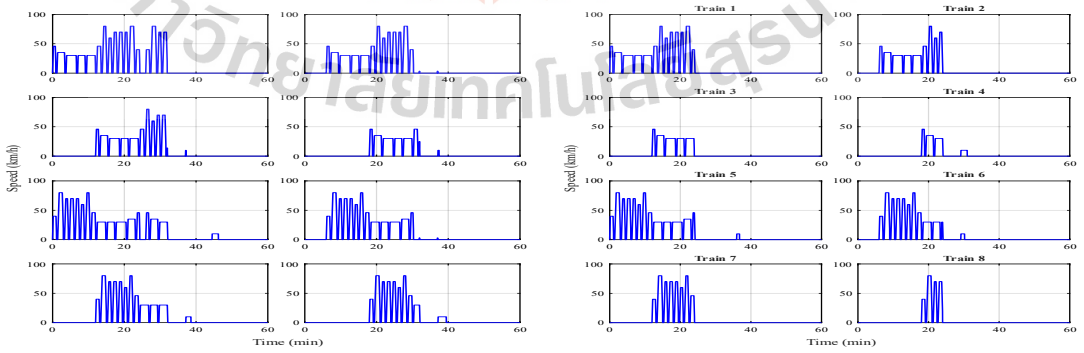
5.3.2.3 กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงปกติ โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 75 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับสูงเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS เพิ่มขึ้นจากกรณีร้อยละ 25 และ 50 และช่วยให้ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าดีขึ้น ขณะเดียวกันภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS แต่ละชุดมีแนวโน้มกระจายตัวทั่วถึงมากขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบ พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้



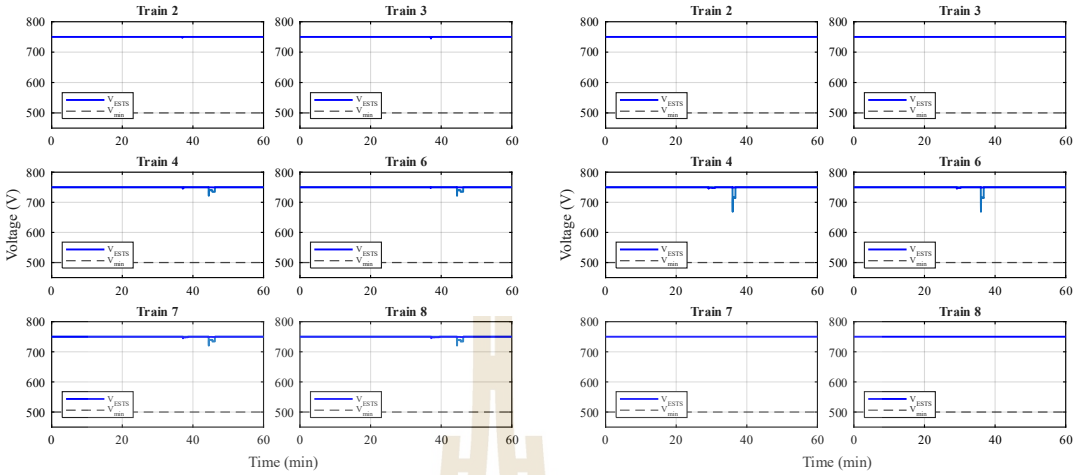
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



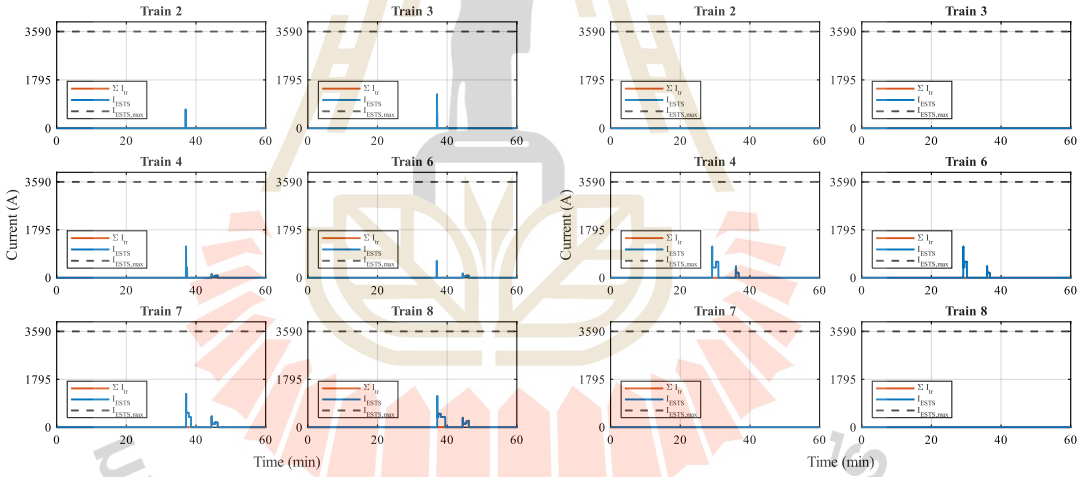
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



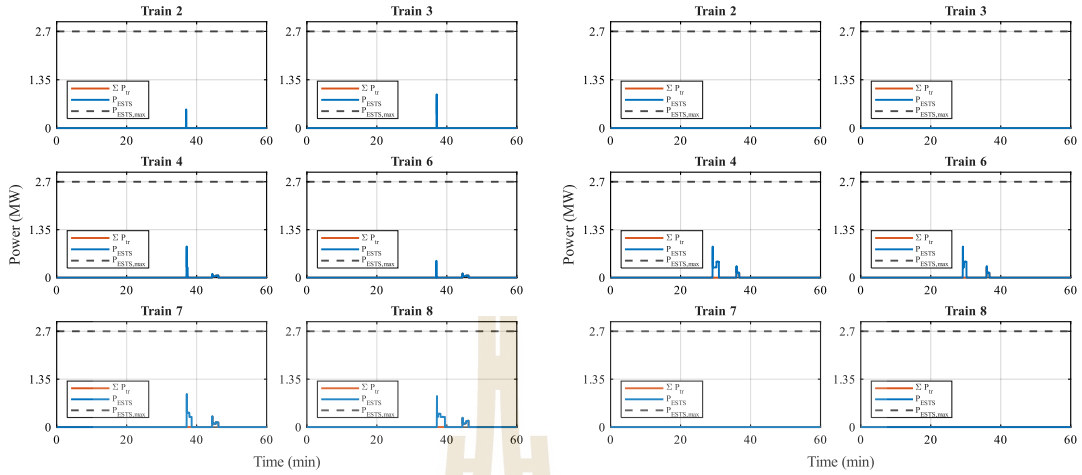
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.41 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



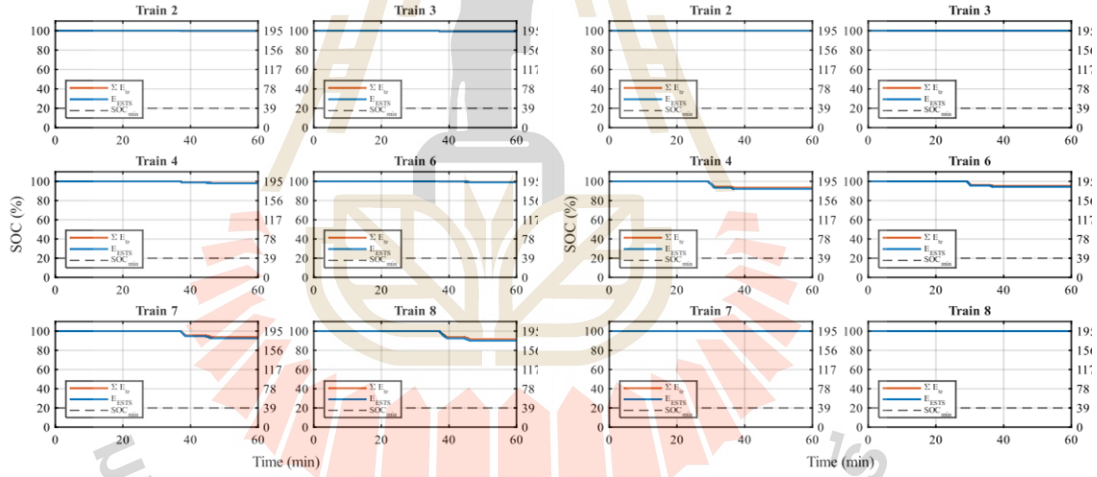
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.42 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.43 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

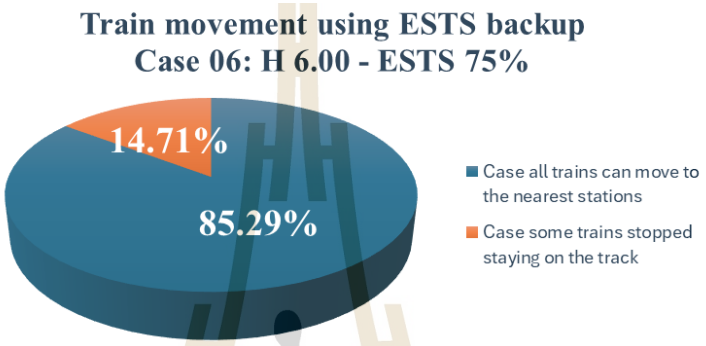


(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.44 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75% พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟฟ้าให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 85.29 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.45 อย่างไรก็ตาม ยังปรากฏบางเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนเส้นทางการให้บริการ โดยสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ซึ่งอยู่ห่างจาก

ขบวนรถไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้สภาวะชั่วโมงปกติและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับสูง ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้



รูปที่ 5.45 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.3.3 การทดสอบช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน (H = 8 นาที)

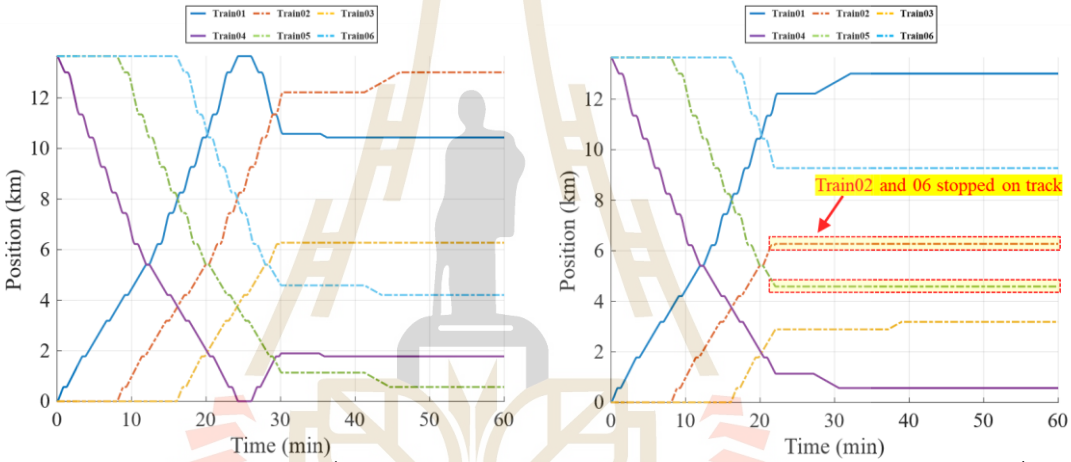
กรณี H = 8 นาที ถูกกำหนดให้เป็นตัวแทนสภาวะการเดินรถช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน ซึ่งมีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับช่วงชั่วโมงเร่งด่วนและช่วงชั่วโมงปกติ อีกทั้งยังมีระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ส่งผลให้โอกาสเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าลดลงจากกรณี H = 3.45 นาที และ H = 6 นาที อย่างไรก็ตาม แม้ความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าที่ลดลงจะช่วยลดแนวโน้มการกระจุกตัวของภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าบน ESTS บางชุด แต่ก็ทำให้ความสำเร็จของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองในโครงข่ายมากขึ้น ดังนั้น การทดสอบในกรณีนี้จึงมีความสำคัญต่อการประเมินข้อจำกัดของ ESTS ภายใต้สภาวะที่ระบบมีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าน้อยและมีโอกาสการเชื่อมโยงระหว่างขบวนจำกัด

การจำลองกรณีนี้มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการพร้อมกันเฉลี่ยประมาณ 6 ขบวน ซึ่งเป็นกรณีที่มีความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าต่ำที่สุดในชุดการทดสอบนี้ การกระจายตัวของขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายจึงมีแนวโน้มทำให้ขบวนที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS อยู่ห่างจากขบวนที่ติดตั้ง ESTS มากขึ้น และในบางเหตุการณ์อาจอยู่นอกระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุด 3.5 กิโลเมตร ส่งผลให้ไม่สามารถรับพลังงานไฟฟ้าสำรองได้ แม้ระบบยังมี ESTS และพลังงานไฟฟ้าคงเหลืออยู่ก็ตาม กรณี H = 8 นาที จึงเป็นเงื่อนไขสำคัญสำหรับตรวจสอบขีดจำกัดของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า โดยเฉพาะผลของระยะห่างเชิงพื้นที่ต่อความสามารถในการอพยพขบวนรถไฟฟ้าไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุด

สำหรับการนำเสนอผลในหัวข้อนี้ จะพิจารณากรณีสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ที่แตกต่างกัน ได้แก่ $\%ESTS$ = 25 50 และ 75 เพื่อเปรียบเทียบผลของจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่มีแหล่งพลังงานสำรองต่อความสามารถในการอพยพภายใต้สภาวะนอกชั่วโมงเร่งด่วน ตัวชี้วัดหลักที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วยอัตราความสำเร็จของการอพยพ จำนวนเหตุการณ์ที่ยังมีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนทางวิ่ง ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟฟ้าได้รับ กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ ESTS ต้องจ่าย รวมถึงพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในแต่ละชุด ทั้งนี้ การแสดงผลจะเลือกนำเสนอเหตุการณ์ตัวอย่างร่วมกับการสรุปอัตราความสำเร็จของกรณีทดสอบ เพื่อสะท้อนพฤติกรรมและข้อจำกัดของระบบภายใต้สภาวะนอกชั่วโมงเร่งด่วน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

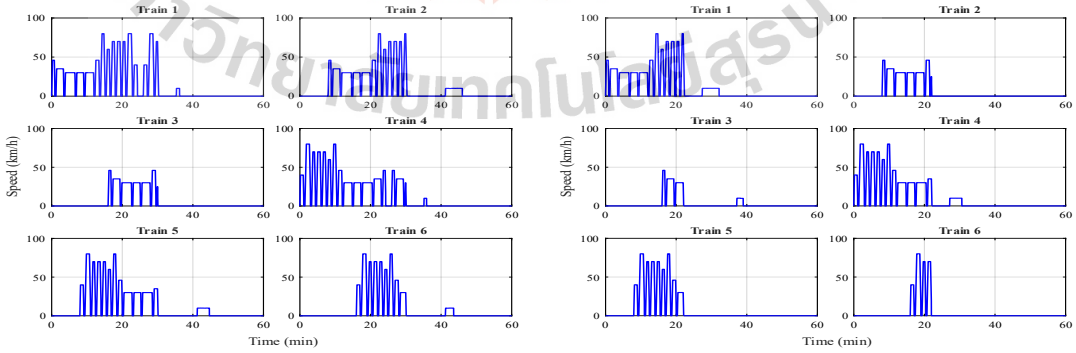
5.3.3.1 กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 25 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับต่ำเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้ระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และส่งผลให้โอกาสในการเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าลดลง ขณะเดียวกันจำนวน ESTS ที่จำกัดย่อมทำให้ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อหนึ่งชุดมีแนวโน้มสูงขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบในกรณีดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้



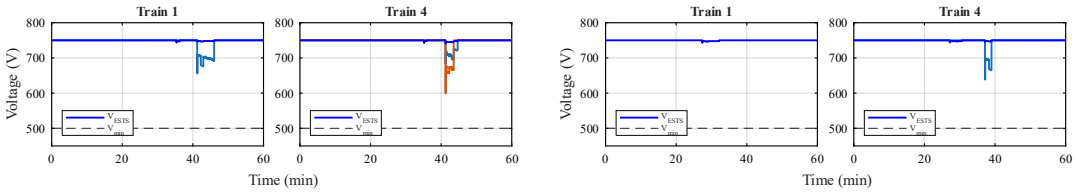
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.46 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%



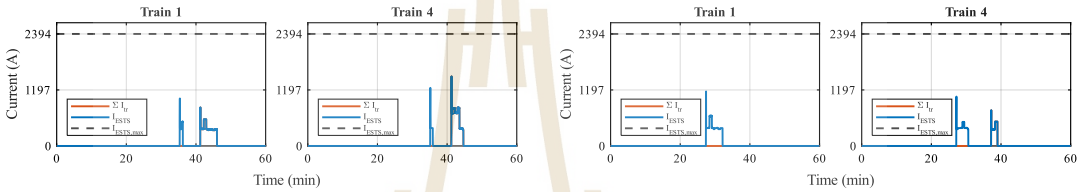
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.47 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%



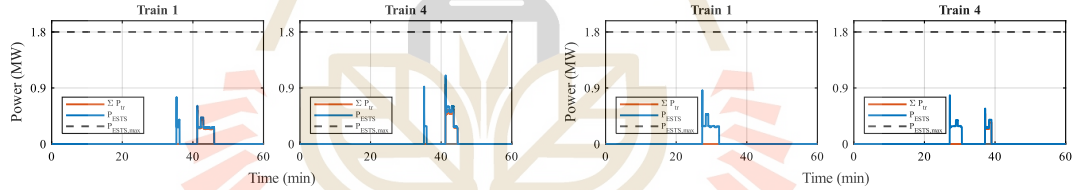
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.48 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%



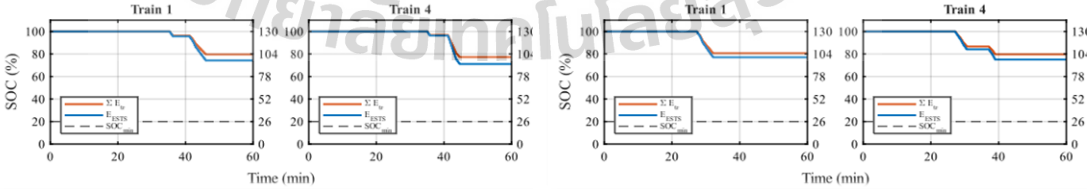
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.49 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%



(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

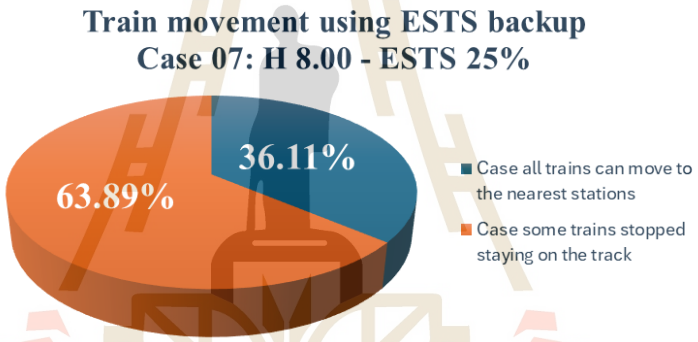
รูปที่ 5.50 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%



(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.51 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25% พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟฟ้าให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 36.11 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.52 โดยยังปรากฏหลายเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนเส้นทางการให้บริการ ซึ่งสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS และอยู่ห่างจากขบวนรถไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้สภาวะนอกชั่วโมงเร่งด่วนและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับต่ำ ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้ในระดับที่ยังจำกัด และยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้

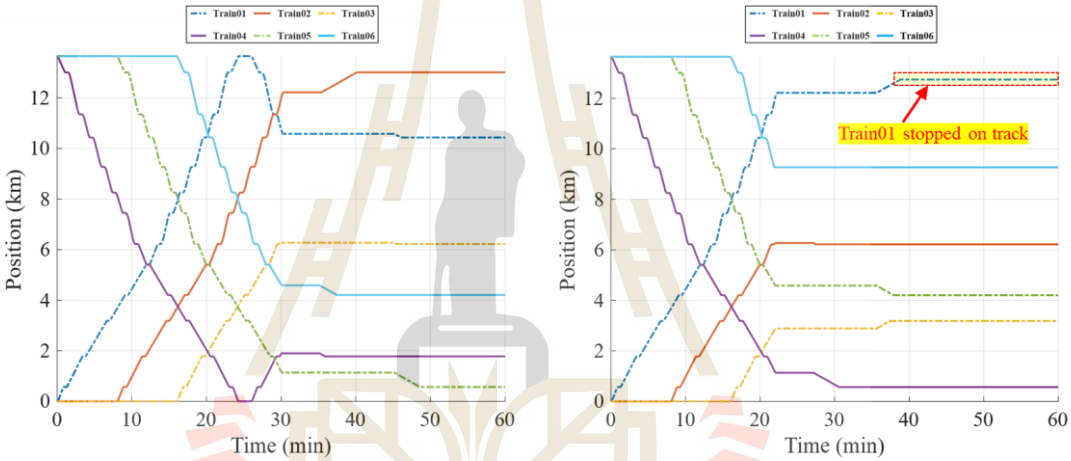


รูปที่ 5.52 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

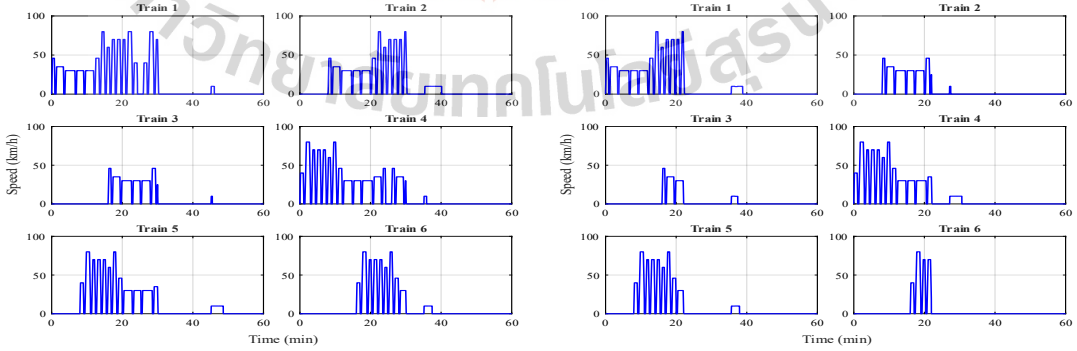
5.3.3.2 กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 50 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับปานกลางเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS เพิ่มขึ้นจากกรณีร้อยละ 25 และช่วยให้ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าดีขึ้น ขณะเดียวกันภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS แต่ละชุดมีแนวโน้มกระจายตัวเหมาะสมมากขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบ พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้



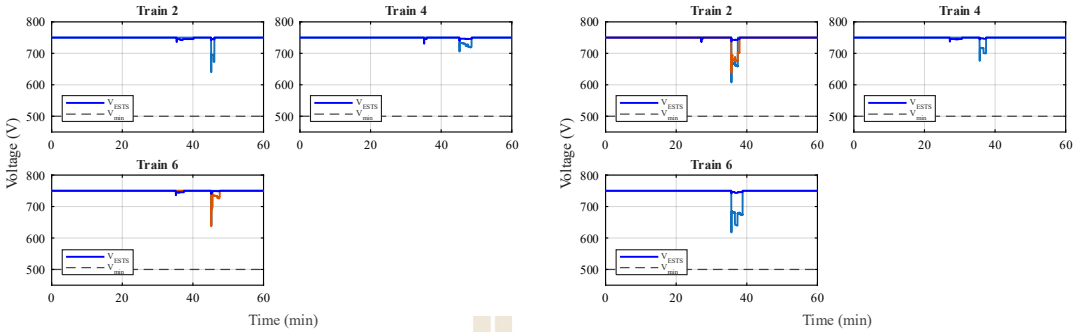
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.53 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



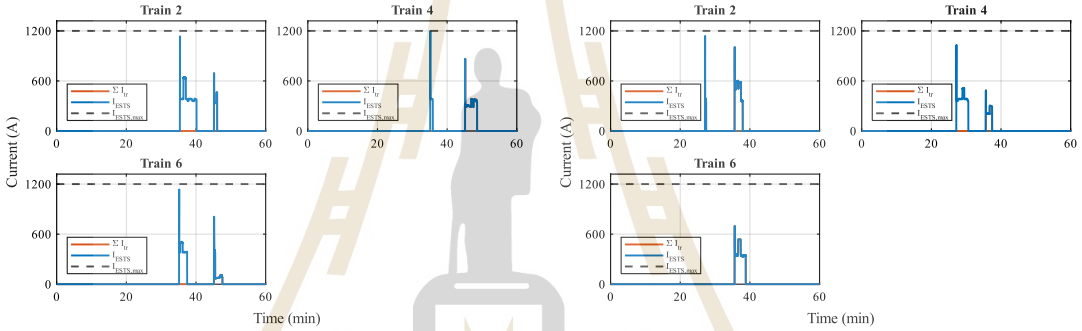
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.54 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



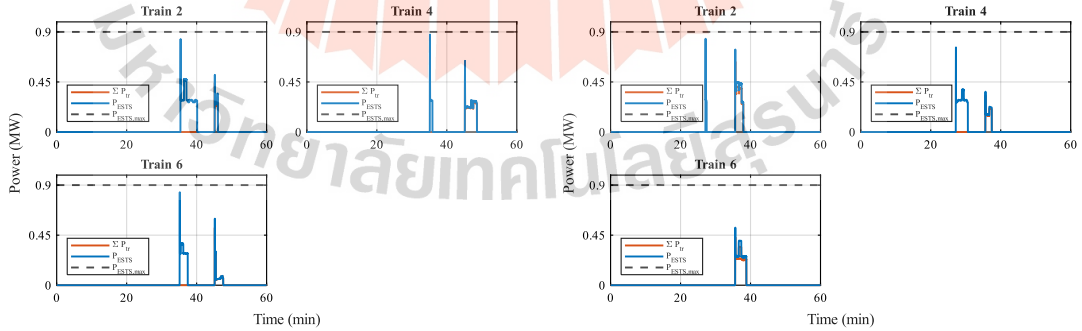
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.55 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



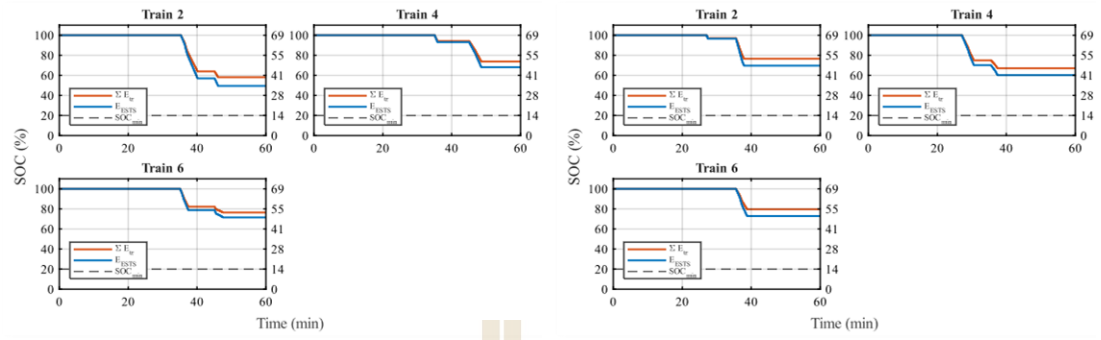
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.56 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

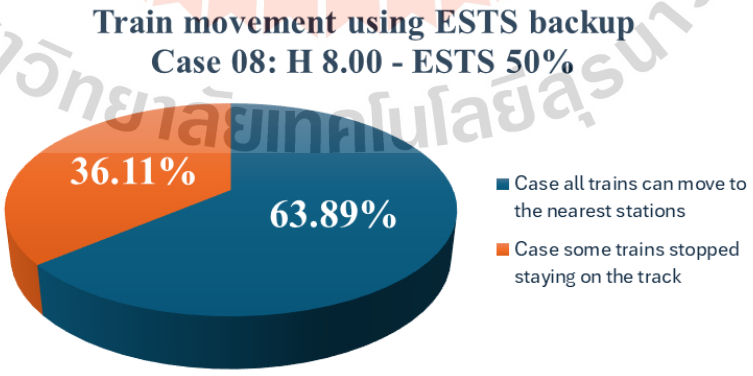
รูปที่ 5.57 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%



(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.58 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

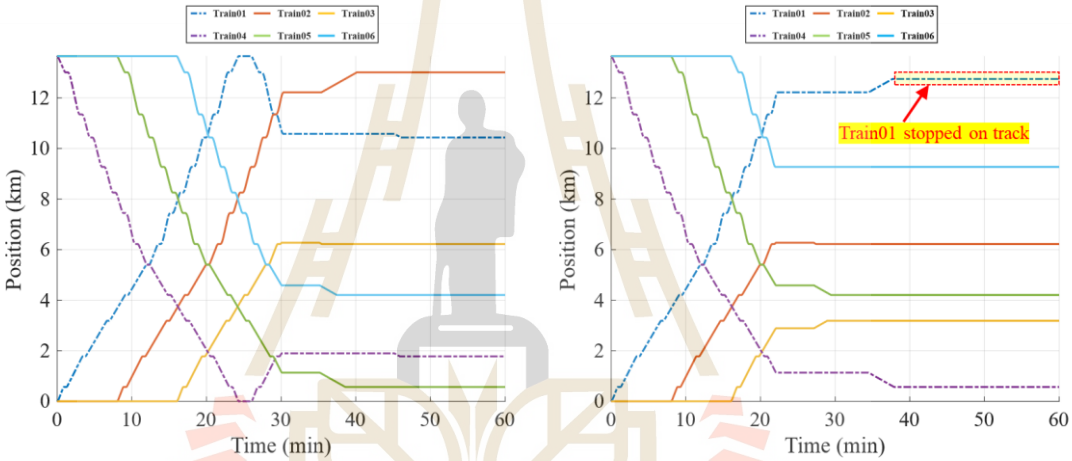
เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50% พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟฟ้าให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 63.89 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.59 โดยยังปรากฏหลายเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนเส้นทางการให้บริการ ซึ่งสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS และอยู่ห่างจากขบวนรถไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้สภาวะนอกชั่วโมงเร่งด่วนและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับปานกลาง ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้ในระดับที่ยังจำกัด และยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้



รูปที่ 5.59 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

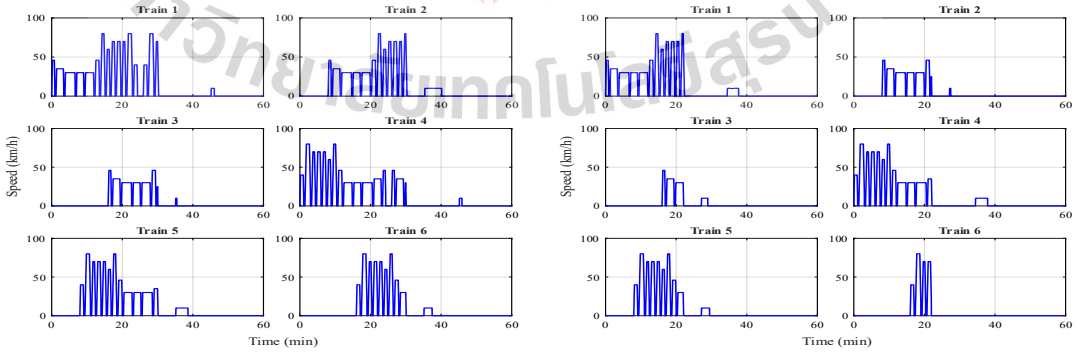
5.3.3.3 กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 75 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับสูงเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS เพิ่มขึ้นจากกรณีร้อยละ 25 และ 50 และช่วยให้ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าดีขึ้น ขณะเดียวกันภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS แต่ละชุดมีแนวโน้มกระจายตัวทั่วถึงมากขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบ พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้



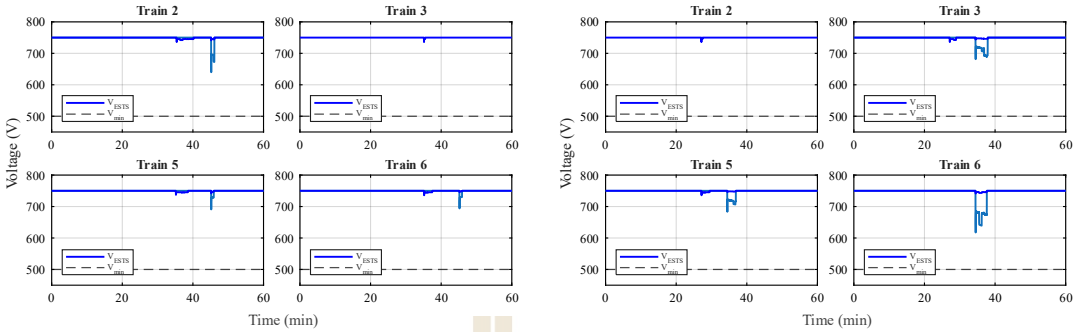
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.60 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



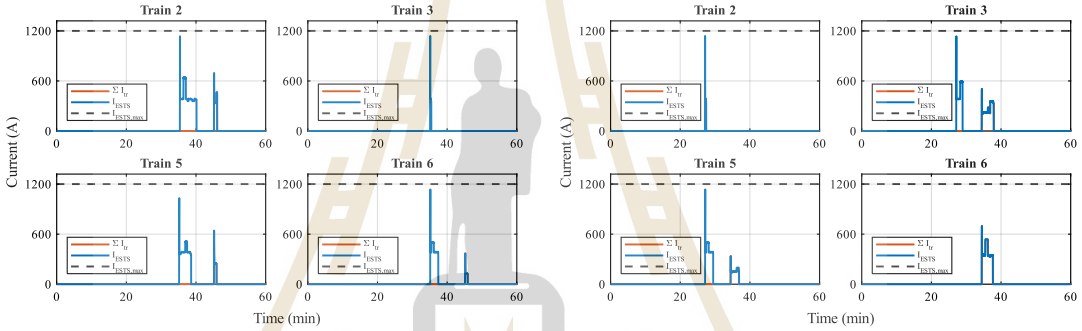
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.61 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



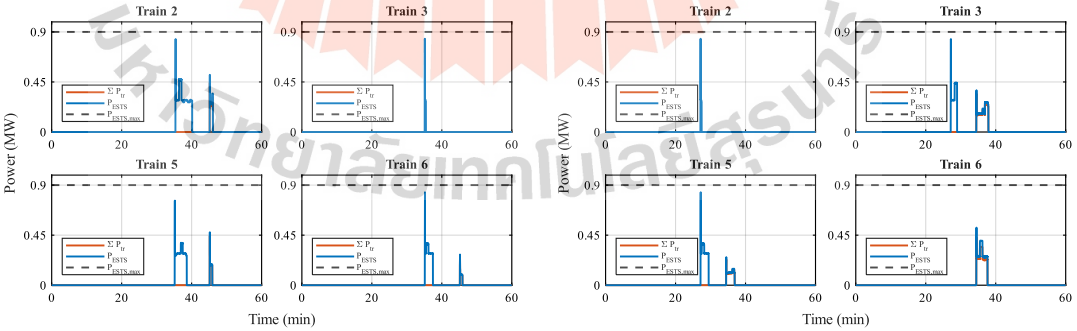
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.62 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



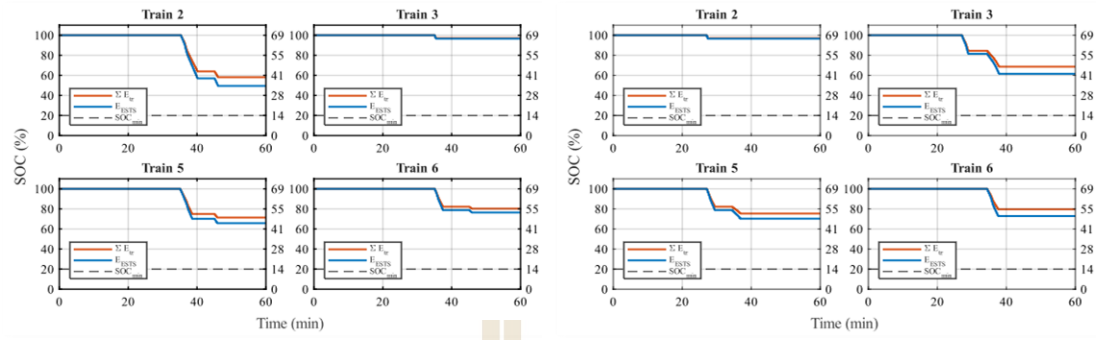
(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.63 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

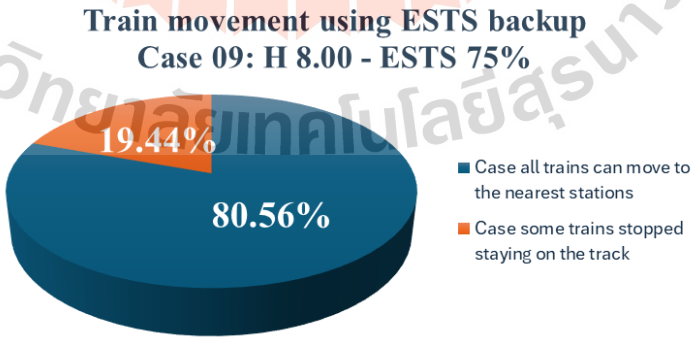
รูปที่ 5.64 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%



(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.65 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75% พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟฟ้าให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 80.56 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.66 อย่างไรก็ตาม ยังปรากฏบางเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนเส้นทางการให้บริการ โดยสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ซึ่งอยู่ห่างจากขบวนรถไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้สภาวะนอกชั่วโมงเร่งด่วนและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับสูง ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้



รูปที่ 5.66 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

จากผลการทดสอบทั้ง 9 กรณี พบว่า การตอบสนองของระบบแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS มีความแตกต่างกันตามค่า H และสัดส่วนการติดตั้ง ESTS อย่างชัดเจน โดยกรณีที่มีระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้าสั้นและมีจำนวน ESTS ในระบบมากขึ้น มีแนวโน้มเอื้อต่อการเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและช่วยเพิ่มอัตราความสำเร็จของการอพยพขบวนรถไฟฟ้าได้มากกว่า ในขณะที่กรณีที่มีระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้ามากขึ้น แม้ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS บางชุดจะมีแนวโน้มลดการกระจุกตัวลง แต่ข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่กลับมีบทบาทเด่นชัดมากขึ้นต่อผลการตอบสนองของระบบ ดังนั้น ผลการทดสอบในหัวข้อนี้จึงสะท้อนให้เห็นทั้งศักยภาพและข้อจำกัดของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้เงื่อนไขการเดินรถที่แตกต่างกัน ซึ่งจะนำไปสู่การอภิปรายเชิงเปรียบเทียบและเชิงวิศวกรรมในหัวข้อ 5.4 ต่อไป

5.4 การอภิปรายผลการทดสอบ

ผลการทดสอบในหัวข้อ 5.3 แสดงให้เห็นว่า การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สถานการณ์ไฟดับของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวน ESTS หรือปริมาณพลังงานไฟฟ้าสำรองรวมของระบบเพียงด้านเดียว แต่ยังมีประเด็นความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าในระบบ สัดส่วนการติดตั้ง ESTS ที่ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และภาระทางไฟฟ้าที่ ESTS แต่ละชุดต้องรองรับได้จริงเกี่ยวข้องด้วย แม้บางกรณีระบบจะยังมีพลังงานไฟฟ้าสำรองคงเหลืออยู่ แต่หากขบวนรถไฟฟ้าที่ต้องการรับการสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าอยู่นอกระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ระบบก็ยังอาจไม่สามารถอพยพรถไฟฟ้าได้ครบทุกขบวน ในทางตรงกันข้าม หากตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายเอื้อต่อการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้า แม้จำนวน ESTS จะอยู่ในระดับไม่สูงมาก ระบบก็ยังสามารถตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การอภิปรายผลในหัวข้อนี้จึงมุ่งวิเคราะห์ทั้งในมิติของสมรรถนะระดับระบบ มิติทางไฟฟ้าของ ESTS และข้อพิจารณาเชิงออกแบบในระดับระบบควบคู่กัน เพื่อให้การตีความผลการทดสอบมีความชัดเจนและเชื่อมโยงไปสู่การประยุกต์ใช้จริงได้มากยิ่งขึ้น

5.4.1 ผลของ H และ $\%ESTS$ ต่อสมรรถนะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของระบบ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบตามค่า H ดังตารางที่ 5.2 พบว่า ความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดโอกาสเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้า กรณี H = 3.45 นาที มีขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการพร้อมกันเฉลี่ย 14 ขบวน ให้ผลการตอบสนองดีที่สุดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยมีอัตราความสำเร็จเท่ากับร้อยละ 68.97 100.00 และ 100.00 ที่ $\%ESTS$ เท่ากับ 25 50 และ

75 ตามลำดับ ขณะที่กรณี H = 6 นาที มีขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการเฉลี่ย 8 ขบวน ให้อัตราความสำเร็จลดลงเป็นร้อยละ 58.82 73.53 และ 85.29 และกรณี H = 8 นาที มีขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการเฉลี่ย 6 ขบวน ให้อัตราความสำเร็จลดลงเป็นร้อยละ 36.11 63.89 และ 80.56 ตามลำดับ ผลดังกล่าวสะท้อนว่า เมื่อ H เพิ่มขึ้น ระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้โอกาสที่ขบวนรถไฟฟ้าที่ต้องการรับพลังงานไฟฟ้าจะอยู่ภายในรัศมีการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า 3.5 กิโลเมตรลดลง แม้ระบบยังมี ESTS และพลังงานไฟฟ้าสำรองคงเหลืออยู่ก็ตาม อย่างไรก็ตาม การเพิ่มสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ช่วยชดเชยข้อจำกัดดังกล่าวได้บางส่วน เนื่องจากเพิ่มจำนวนแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองและเพิ่มความเป็นไปได้ที่ขบวนรถไฟฟ้าที่ตกค้างจะอยู่ใกล้กับ ESTS อย่างน้อยหนึ่งชุด ดังนั้น ค่า H และ $\%ESTS$ จึงควรพิจารณาร่วมกันในการออกแบบการติดตั้ง ESTS ให้เหมาะสมกับรูปแบบการเดินรถ

ตารางที่ 5.3 สรุปผลการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS สำหรับ 9 กรณีทดสอบ

กรณี	H (นาที)	$\%ESTS$ (%)	Success (%)	สัดส่วน ESTS ต่อรถไฟฟ้าผู้รับ	ขนาด ESTS ที่ควรรองรับ (กำลังไฟฟ้า/กระแสไฟฟ้า/พลังงานไฟฟ้า)
1	3.45	25	68.97	1:3	2.7 MW / 3,590 A / 195 kWh
2	3.45	50	100.00	1:1	0.9 MW / 1,200 A / 69 kWh
3	3.45	75	100.00	3:1	0.9 MW / 1,200 A / 69 kWh
4	6	25	58.82	1:3	2.7 MW / 3,590 A / 195 kWh
5	6	50	73.53	1:1	0.9 MW / 1,200 A / 69 kWh
6	6	75	85.29	3:1	0.9 MW / 1,200 A / 69 kWh
7	8	25	36.11	1:2	1.8 MW / 2,400 A / 130 kWh
8	8	50	63.89	1:1	0.9 MW / 1,200 A / 69 kWh
9	8	75	80.56	2:1	0.9 MW / 1,200 A / 69 kWh

ตารางที่ 5.4 ผลของการเพิ่ม $\%ESTS$ ต่ออัตราความสำเร็จในแต่ละค่า H

H (นาที)	Success rate $\%ESTS$ = 25 (%)	Success rate $\%ESTS$ = 50 (%)	Success rate $\%ESTS$ = 75 (%)	เพิ่ม $\%ESTS$ จาก 25 ⟶ 50	เพิ่ม $\%ESTS$ จาก 50 ⟶ 75
3.45	68.97	100.00	100.00	10.34%	0.00%
6	58.82	73.53	85.29	47.06%	5.88%
8	36.11	63.89	80.56	30.00%	13.89%

จากทั้งสองตารางเมื่อพิจารณาผลของ *%ESTS* ภายในแต่ละ H จะพบว่า การเพิ่ม *%ESTS* จากร้อยละ 25 เป็นร้อยละ 50 ทำให้เห็นผลสมรรถนะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าชัดเจนกว่าการเพิ่มจากร้อยละ 50 เป็นร้อยละ 75 ในทุกค่า H โดยในกรณี H = 3.45 นาที อัตราความสำเร็จเพิ่มขึ้น 10.34 จุดร้อยละ จากร้อยละ 89.66 เป็น 100.00 และไม่เพิ่มขึ้นอีกเมื่อเพิ่มเป็นร้อยละ 75 ขณะที่กรณี H = 6 นาที อัตราความสำเร็จเพิ่มขึ้น 47.06 จุดร้อยละ จากร้อยละ 41.18 เป็น 88.24 และเพิ่มขึ้นอีกเพียง 5.88 จุดร้อยละ เมื่อเพิ่มเป็นร้อยละ 75 และกรณี H = 8 นาที อัตราความสำเร็จเพิ่มขึ้น 30.00 จุดร้อยละ จากร้อยละ 38.89 เป็น 63.89 และเพิ่มขึ้นอีก 13.89 จุดร้อยละ เมื่อเพิ่มเป็นร้อยละ 75 แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า *%ESTS* = 50 เป็นระดับที่ช่วยเพิ่มความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองได้อย่างดีในหลายกรณี ขณะที่การเพิ่ม *%ESTS* ต่อจากระดับดังกล่าวยังช่วยเพิ่มสมรรถนะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้แต่ผลเพิ่มจะเริ่มลดลง โดยเฉพาะในกรณีที่ข้อจำกัดหลักของระบบเปลี่ยนจากข้อจำกัดด้านจำนวน ESTS ไปเป็นข้อจำกัดด้านระยะห่างของขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายเมื่อเชื่อมโยงผลดังกล่าวกับโครงสร้างของกรณีทดสอบ จะเห็นได้ว่า ค่า H ทำหน้าที่กำหนดความเป็นไปได้เชิงพื้นที่ของการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้า ขณะที่ *%ESTS* ทำหน้าที่กำหนดความหนาแน่นของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองภายในระบบ ดังนั้น สมรรถนะของการตอบสนองจึงเป็นผลร่วมของทั้งสองปัจจัยมากกว่าการพิจารณาแยกออกจากกัน

5.4.2 ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS

จากข้อมูลทางไฟฟ้าจากผลการทดลอง พบว่า ESTS ในแต่ละกรณีมีลักษณะการรับภาระโหลดที่แตกต่างกัน ทั้งในด้านพลังงานไฟฟ้าสูงสุดต่อชุด (E_{max}) พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชุด (E_{avg}) สถานะประจุต่ำสุด (SOC_{min}) กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{peak}) และกระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{peak}) ของ ESTS แสดงดังตารางที่ 5.4 โดยเฉพาะกรณีที่ *%ESTS* ต่ำ จะมีค่า E_{max} P_{peak} และ I_{peak} ของ ESTS บางชุดสูงกว่าค่าเฉลี่ยของระบบ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไม่ได้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในทุกชุด แต่มีลักษณะกระจุกตัวอยู่ที่ ESTS บางชุดเท่านั้น ขณะที่กรณีที่ *%ESTS* เพิ่มขึ้น ภาระโหลดดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงและกระจายตัวได้เหมาะสมมากขึ้น ทำให้ระดับการใช้งาน ESTS แต่ละชุดอยู่ใกล้เคียงกันมากขึ้น และช่วยลดโอกาสที่บางชุดจะเข้าใกล้ข้อจำกัดด้านพลังงานไฟฟ้ากำลังไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าสูงสุด และสนับสนุนให้การจัดสรรพลังงานไฟฟ้าของระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นโดยผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าสมรรถนะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานไฟฟ้าสำรองรวมเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับการกระจายภาระทางไฟฟ้าระหว่าง ESTS แต่ละชุดร่วมด้วย

ตารางที่ 5.5 ผลเชิงไฟฟ้าของการทดสอบแต่ละกรณี

กรณี	H (นาที)	$\%ESTS$	E_{max} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)
1	3.45	25	52.96	29.26	72.84	1.67	2,260.28
2	3.45	50	35.80	17.18	48.12	0.88	1,200.00
3	3.45	75	35.98	12.14	47.86	0.88	1,200.00
4	6	25	65.61	51.19	66.35	1.53	2,064.60
5	6	50	55.18	35.97	20.00	0.88	1,200.00
6	6	75	32.71	24.87	83.23	1.41	1,903.95
7	8	25	51.51	34.59	60.37	1.26	1,708.71
8	8	50	34.86	25.51	49.47	0.88	1,200.00
9	8	75	34.29	17.90	50.31	0.88	1,200.00

พิจารณาตารางที่ 5.5 พบว่ากรณี H = 3.45 นาที เมื่อมี $\%ESTS$ = 25 มีค่า E_{max} = 52.96 กิโลวัตต์ชั่วโมง P_{peak} = 1.67 เมกะวัตต์ และ I_{peak} = 2,260.28 แอมป์ ซึ่งสูงกว่ากรณีที่ระบบมี ESTS เป็นจำนวนร้อยละ 50 และ 75 โดยทั้งสองกรณีนี้มีค่า P_{peak} สูงสุดเพียง 0.88 เมกะวัตต์ และ I_{peak} ไม่เกิน 1,200.00 แอมป์ ส่วนในกรณี H = 6 นาที เมื่อมี $\%ESTS$ = 25 จะมีภาระการจ่ายไฟสูงที่สุดเช่นกัน โดยมีค่า E_{max} = 65.61 กิโลวัตต์ชั่วโมง P_{peak} = 1.53 เมกะวัตต์ และ I_{peak} = 2,064.60 แอมป์ ซึ่งสูงกว่ากรณีที่ระบบมี ESTS เป็นจำนวนร้อยละ 50 และ 75 โดยกรณีร้อยละ 75 ยังมีค่า P_{peak} = 1.41 เมกะวัตต์ และ I_{peak} = 1,903.95 แอมป์ ในบางเหตุการณ์ สะท้อนว่า ESTS บางชุดยังอาจรับภาระการจ่ายไฟให้กับรถไฟฟ้าหลายขบวนเกิดขึ้น และกรณี H = 8 นาที แม้โอกาสเกิดภาระการจ่ายไฟโดยรวมจะลดลง แต่กรณีที่ $\%ESTS$ = 25 ยังคงมีค่า E_{max} = 51.51 กิโลวัตต์ชั่วโมง P_{peak} = 1.26 เมกะวัตต์ และ I_{peak} = 1,708.71 แอมป์ ขณะที่ร้อยละการติดตั้ง ESTS อีกสองกรณีจะมีค่า P_{peak} สูงสุดเพียง 0.88 เมกะวัตต์ และ I_{peak} ไม่เกิน 1,200.00 แอมป์ เท่านั้น นอกจากนี้ ค่า SOC_{min} ยังมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่แตกต่างกันไป โดยไม่ขึ้นกับค่า P_{peak} และ I_{peak} ที่บ่งบอกถึงจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าว่ามากหรือน้อย

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าภาระทางไฟฟ้าของ ESTS ที่ต้องจ่ายไฟให้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ โดยเป็นผลร่วมของค่า H สัดส่วนการติดตั้ง $\%ESTS$ และรูปแบบการกระจายตำแหน่งของ ESTS ในระบบ กล่าวคือ กรณีที่ $\%ESTS$ ต่ำมักทำให้

ภาระการจ่ายไฟของ ESTS กระจุกตัวอยู่เพียงบางชุด ขณะที่การเพิ่ม $\%ESTS$ ช่วยลดภาระดังกล่าว และทำให้การกระจายภาระเหมาะสมขึ้น แต่ไม่ได้รับประกันว่าค่าทางไฟฟ้าทุกตัวจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกับการเพิ่มจำนวน ESTS เสมอไป เนื่องจากยังมีอิทธิพลของตำแหน่งขบวนรถไฟฟ้าและรูปแบบการตอบสนองของระบบเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้น การประเมินสมรรถนะของ ESTS ในระบบจึงควรพิจารณาให้ครอบคลุม E_{max} E_{avg} SOC_{min} P_{peak} และ I_{peak} เพื่อให้สามารถสะท้อนภาระที่ ESTS ต้องรองรับจริง และนำไปสู่ข้อพิจารณาเชิงออกแบบได้อย่างเหมาะสม

5.4.3 ข้อพิจารณาเชิงออกแบบและความเป็นไปได้ในการใช้จริง

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อก่อนหน้าสามารถสรุปได้ว่า แนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS สามารถสนับสนุนการอพยพของขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS และไม่ได้ติดตั้งระบบได้ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม โดยผลการทดสอบเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าระดับความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้ ESTS กล่าวคือ กรณี H = 3.45 นาที ซึ่งมีขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการพร้อมกันเฉลี่ย 14 ขบวน ให้ค่าอัตราความสำเร็จเท่ากับร้อยละ 89.66 100.00 และ 100.00 เมื่อ $\%ESTS$ เท่ากับ 25 50 และ 75 ตามลำดับ ขณะที่กรณี H = 6 นาที ซึ่งมีขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการเฉลี่ย 8 ขบวน ให้อัตราความสำเร็จเท่ากับร้อยละ 41.18 88.24 และ 94.12 ตามลำดับ และกรณี H = 8 นาที ซึ่งมีขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการเฉลี่ยเพียง 6 ขบวน ให้อัตราความสำเร็จเท่ากับร้อยละ 38.89 63.89 และ 77.78 ตามลำดับ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ภายใต้เงื่อนไขของโครงข่ายและระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า 3.5 กิโลเมตร แนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS จะมีความเหมาะสมมากขึ้นเมื่อระบบมีขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการอย่างน้อยประมาณ 8 ขบวนร่วมกับการติดตั้ง ESTS ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 หรือหากต้องการคงสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ต่ำ เช่น ร้อยละ 25 ระบบควรมีความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าสูงใกล้เคียงกรณี H = 3.45 นาที จึงจะสามารถรักษาโอกาสการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในระดับสูงได้

อย่างไรก็ตาม ความเป็นไปได้ในการนำแนวคิดนี้ไปใช้จริงควรพิจารณาร่วมกับเงื่อนไขการเดินรถของระบบเป้าหมายด้วย โดยผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าแนวคิดนี้เหมาะกับระบบที่มีความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าสูง เนื่องจากมีโอกาสเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนมากกว่า และทำให้ ESTS ที่ติดตั้งบนรถไฟฟ้าเพียงบางขบวนสามารถครอบคลุมพื้นที่การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางตรงกันข้าม แนวคิดนี้อาจยังไม่เหมาะกับสภาวะที่มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายน้อยหรือมีระยะห่างระหว่างขบวนมาก เช่น กรณี H = 8 นาที ซึ่งแม้เพิ่ม $\%ESTS$ เป็นร้อยละ 75 แล้ว อัตราความสำเร็จยังอยู่ที่ร้อยละ 77.78 และต่ำกว่ากรณี H ที่

สั้นกว่าอย่างชัดเจน สะท้อนว่าข้อจำกัดหลักไม่ได้อยู่ที่พิกัดของ ESTS เพียงอย่างเดียว แต่อยู่ที่โอกาสในการเชื่อมโยงเพื่อแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในโครงข่ายด้วย ดังนั้น หากต้องการประยุกต์ใช้แนวคิดนี้ในระบบที่มีความหนาแน่นของขบวนต่ำ อาจจำเป็นต้องเพิ่มสัดส่วนการติดตั้ง ESTS พิจารณาการกระจายตำแหน่งของ ESTS ให้เหมาะสมกับบทบาทเชิงโครงข่ายของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน หรือพัฒนากลยุทธ์ควบคุมเสริมเพื่อเพิ่มโอกาสในการเชื่อมโยงระหว่างขบวนภายใต้สถานการณ์ไฟดับ ผลการวิจัยนี้จึงไม่ได้เพียงเสนอแนวคิดเชิงทฤษฎีเท่านั้น แต่ยังให้กรอบเชิงวิศวกรรมสำหรับพิจารณาว่าแนวคิดดังกล่าวควรถูกออกแบบและประยุกต์ใช้ภายใต้เงื่อนไขใด จึงจะเกิดประสิทธิผลสูงสุดสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีความยืดหยุ่นและคุ้มค่ามากขึ้นในอนาคต

5.5 สรุป

การทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สถานการณ์ไฟดับของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยกำหนดเงื่อนไขด้านระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้าและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS เป็นกรอบการทดสอบ พบว่าสมรรถนะของระบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้า ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และสัดส่วนของขบวนรถไฟฟ้าที่สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองได้ โดยกรณีที่มีค่า H ต่ำและมี $\%ESTS$ ในระดับที่สูง จะช่วยเพิ่มโอกาสในการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและเพิ่มอัตราความสำเร็จของการอพยพขบวนรถไฟฟ้าไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุด ซึ่งสะท้อนว่าแนวคิดนี้มีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้จริงในระบบที่มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการในโครงข่ายมากเพียงพอ อย่างไรก็ตาม แม้ระบบจะยังมีพลังงานไฟฟ้าสำรองคงเหลืออยู่ แต่หากขบวนรถไฟฟ้าที่ต้องการรับการสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าอยู่นอกระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ก็อาจเกิดการตกค้างบนเส้นทางการให้บริการได้ ขณะเดียวกันการวิเคราะห์ภาระจ่ายไฟของ ESTS ยังแสดงให้เห็นว่า ESTS แต่ละชุดไม่ได้รับภาระเท่ากันในทุกกรณี ซึ่งมีความสำคัญต่อการกำหนดขนาดความจุ สัดส่วนการติดตั้ง และข้อพิจารณาเชิงออกแบบของระบบในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะในสภาวะที่มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายน้อยหรือมีระยะห่างระหว่างขบวนมาก ดังนั้น ผลการศึกษาในบทนี้จึงช่วยยืนยันทั้งศักยภาพ ข้อจำกัด และเงื่อนไขสำคัญของการประยุกต์ใช้ ESTS เพื่อสนับสนุนการอพยพขบวนรถไฟฟ้าภายใต้หลักการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในสถานการณ์ไฟดับ และเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในบทถัดไป

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทนำ

บทที่ 6 นำเสนอการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะจากการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ภายหลังการพัฒนาแบบจำลองและการทดสอบแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายใต้สถานการณ์ไฟดับ ผลการศึกษาช่วยให้เห็นทั้งศักยภาพ ข้อจำกัด และเงื่อนไขสำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ โดยเฉพาะระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้า สัดส่วนการติดตั้ง ESTS ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และภาระทางไฟฟ้าที่ ESTS แต่ละชุดต้องรองรับจริง แม้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะสามารถใช้ประเมินความเป็นไปได้และแนวโน้มการตอบสนองของระบบได้อย่างชัดเจน แต่ยังคงมีข้อจำกัดบางประการเมื่อเทียบกับการประยุกต์ใช้ในระบบจริง ดังนั้น บทนี้จึงมุ่งสรุปสาระสำคัญของผลการวิจัยในเชิงวิศวกรรม พร้อมทั้งนำเสนอข้อเสนอแนะสำหรับการต่อยอดงานวิจัยและการพัฒนาแนวทางประยุกต์ใช้ ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนต่อไปในอนาคต

6.2 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายใต้สถานการณ์ไฟดับทั้งโครงข่าย โดยมีเป้าหมายเพื่อลดความจำเป็นในการติดตั้ง ESTS ให้กับรถไฟฟ้าทุกขบวน ขณะที่ยังคงสามารถสนับสนุนการอพยพผู้โดยสารไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ โดยกำหนดกรณีศึกษาบนระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม ระยะทาง 13.65 กิโลเมตร 14 สถานี และระบบจ่ายไฟกระแสตรง 750 โวลต์ 7 สถานีไฟฟ้าย่อย พร้อมกำหนดกรณีทดสอบจากระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้าและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS รวม 9 กรณี จากผลการศึกษาพบว่าสมรรถนะของระบบขึ้นอยู่กับทั้งค่า H และ $\%ESTS$ โดยกรณีที่มีค่า H ต่ำจะเอื้อต่อการเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามากกว่ากรณีที่มีค่า H สูง เนื่องจากระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าสั้นกว่า ทำให้ขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS มีโอกาสอยู่ในระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

ของขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ได้มากกว่า ทั้งนี้ กรณี H = 3.45 นาที ให้ค่าอัตราความสำเร็จเท่ากับร้อยละ 68.97 100.00 และ 100.00 เมื่อ $\%ESTS$ เท่ากับ 25 50 และ 75 ตามลำดับ ขณะที่กรณี H = 6 นาที ให้ค่าเท่ากับร้อยละ 58.82 73.53 และ 85.29 และกรณี H = 8 นาที ให้ค่าเท่ากับร้อยละ 36.11 63.89 และ 80.56 ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนว่าแนวคิดนี้มีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้จริงได้ดีในระบบที่มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการในโครงข่ายมากเพียงพอและมีความหนาแน่นของขบวนสูง

เมื่อพิจารณากลไกการทำงานของระบบพบว่าความสำเร็จของการตอบสนองเกิดจากการที่ขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS กระจายตัวอยู่ในระยะที่สามารถแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ต้องการรับการสนับสนุนได้ ในทางตรงกันข้าม ความล้มเหลวของระบบเกิดจากข้อจำกัดเชิงพื้นที่ที่ทำให้ไม่สามารถสร้างคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้ครบทุกขบวน แม้ว่า ESTS จะยังมีพลังงานไฟฟ้าสำรองคงเหลืออยู่ก็ตาม นอกจากนี้ การวิเคราะห์ภาระทางไฟฟ้าของระบบยังยืนยันว่า ESTS แต่ละชุดไม่ได้รับภาระการจ่ายไฟเท่ากันในทุกกรณี โดยกรณีที่ $\%ESTS$ ต่ำ ภาระด้านพลังงานไฟฟ้ากำลังไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ามักกระจุกตัวอยู่ที่ ESTS บางชุด เช่น กรณี H =3.45 นาที ที่ มีค่า E_{max} =54.17 กิโลวัตต์ชั่วโมง E_{avg} =29.66 กิโลวัตต์ชั่วโมง P_{peak} =2.12 เมกะวัตต์ และ I_{peak} =2,869.80 แอมป์ ขณะที่กรณี H =6 นาที ที่ มีค่า E_{max} =54.11 กิโลวัตต์ชั่วโมง E_{avg} =29.67 กิโลวัตต์ชั่วโมง P_{peak} =2.21 เมกะวัตต์ และ I_{peak} =2,997.57 แอมป์ เป็นต้น ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า การเพิ่ม $\%ESTS$ มีแนวโน้มช่วยลดและกระจายภาระการจ่ายไฟของ ESTS ได้ดีขึ้น แม้แนวโน้มดังกล่าวจะไม่แปรผันตรงกับจำนวน ESTS ที่เพิ่มขึ้นในทุกกรณี

การออกแบบการติดตั้ง ESTS ที่เหมาะสมจึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะจำนวน ESTS หรือปริมาณพลังงานไฟฟ้าสำรองรวมของระบบเพียงด้านเดียว แต่ควรพิจารณาร่วมกันทั้งความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้า ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และการกระจายภาระการใช้งานของ ESTS ผลการศึกษายังยืนยันว่าแนวคิดนี้เหมาะกับระบบที่มีความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าสูง แต่อาจยังไม่เหมาะกับระบบที่มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายน้อยหรือมีระยะห่างระหว่างขบวนมาก โดยผลการทดลองสนับสนุนว่า กรณี H = 3.45 นาที ในทุกระดับของ $\%ESTS$ และกรณี H = 6 นาที ที่ $\%ESTS \geq 50\%$ เป็นช่วงการทำงานที่ให้สมดุลเหมาะสม เนื่องจากเป็นกรณีที่ระบบมีอัตราความสำเร็จของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 และสามารถลดความจำเป็นในการใช้ ESTS ขนาดสูงเกินไปต่อหนึ่งชุดได้อย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้าม สำหรับระบบที่มีความหนาแน่นของขบวนต่ำ อาจจำเป็นต้องเพิ่มสัดส่วนการติดตั้ง ESTS หรือพิจารณามาตรการเสริม

ร่วมเพื่อสนับสนุนการอพยพขบวนรถไฟฟ้าขณะเกิดไฟดับ ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ยืนยันทั้งศักยภาพ ข้อจำกัด และความเป็นไปได้ของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในระดับโครงข่าย สำหรับการออกแบบระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีความยืดหยุ่น ปลอดภัย และคุ้มค่ามากขึ้นภายใต้สถานการณ์ไฟดับในอนาคต

6.3 ข้อเสนอแนะ

จากการยืนยันถึงความเป็นไปได้ของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าด้วย ESTS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ หากมีการศึกษาต่อยอดในอนาคต ควรมุ่งเน้นการพัฒนาองค์ความรู้จากการประเมินเชิงความเป็นไปได้ไปสู่การกำหนดแนวทางการออกแบบและการประยุกต์ใช้ในระบบจริงอย่างเป็นรูปธรรมยิ่งขึ้น ทั้งในแง่ของแบบจำลอง กลยุทธ์ควบคุม การบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้า และการวิเคราะห์ผลกระทบในเชิงระบบ โดยข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไปสามารถสรุปได้ดังนี้

ประการแรก ควรพัฒนาแบบจำลองให้สามารถสะท้อนพฤติกรรมของระบบได้ละเอียดขึ้นทั้งในด้านการควบคุม การจัดลำดับความสำคัญของการช่วยเหลือ และข้อจำกัดทางไฟฟ้าแบบเวลาจริง โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้า สถานะประจุของ ESTS ภาระโหลดบนขบวนรถไฟฟ้า และการตัดสินใจเริ่มหรือยุติการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความสำเร็จของระบบไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้าสำรองเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าด้วย ดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองที่สามารถวิเคราะห์ประเด็นดังกล่าวได้ละเอียดขึ้นจะช่วยให้ผลการประเมินมีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

ประการที่สอง ควรศึกษาการออกแบบ ESTS ในระดับโครงข่ายอย่างเป็นระบบมากขึ้น โดยเฉพาะการหาค่าที่เหมาะสมของจำนวน ตำแหน่ง และขนาด ESTS ภายใต้เงื่อนไขการเดินรถที่แตกต่างกัน เนื่องจากการเพิ่มจำนวน ESTS ช่วยเพิ่มสมรรถนะของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้จริง แต่ผลตอบแทนจากการเพิ่มจำนวน ESTS อาจไม่เป็นเชิงเส้นเสมอไป กล่าวคือ ในบางกรณีการติดตั้ง ESTS มากเกินความจำเป็นอาจทำให้ ESTS บางชุดแทบไม่ถูกใช้งาน ขณะที่หากติดตั้งน้อยเกินไป ภาระทางไฟฟ้าจะกระจุกตัวอยู่ที่ ESTS บางชุดอย่างเด่นชัด ดังนั้น ในการศึกษาต่อไปควรพิจารณาแนวทางการออกแบบในระดับระบบ เช่น การเลือกติดตั้ง ESTS ในขบวนที่มีบทบาทเชิง

โครงข่ายสูง การกำหนดขนาด ESTS ให้แตกต่างกันตามบทบาทของขบวน หรือการพิจารณากลยุทธ์การกระจายตำแหน่งของ ESTS ให้เหมาะสมกับลักษณะการเดินรถของระบบ เพื่อให้ได้สมดุลระหว่างสมรรถนะ ความปลอดภัย และความคุ้มค่าทางวิศวกรรม

ประการที่สาม ควรต่อยอดไปสู่การพิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงในมิติที่กว้างขึ้น ทั้งด้านระบบควบคุม การสื่อสารระหว่างขบวนรถไฟฟ้า การป้องกันทางไฟฟ้า และความปลอดภัยของการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้า รวมถึงควรศึกษามาตรการเสริมสำหรับสภาวะที่มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายน้อยหรือมีระยะห่างระหว่างขบวนมาก ควบคู่กับการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์และความคุ้มค่าการลงทุนร่วมกับผลด้านสมรรถนะ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายและการออกแบบระบบในทางปฏิบัติ ดังนั้น หากสามารถพัฒนาประเด็นดังกล่าวเพิ่มเติมได้ จะช่วยยกระดับจากแนวคิดเชิงวิจัยที่มุ่งลดความจำเป็นในการติดตั้ง ESTS ให้ครบทุกขบวน ไปสู่แนวทางการออกแบบและการบริหารจัดการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีทั้งความปลอดภัย ประสิทธิภาพ และความคุ้มค่าในการใช้งานจริงในอนาคต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

Bao, X. (2018). Urban rail transit present situation and future development trends in China: Overall analysis based on national policies and strategic plans in 2016–2020. *Urban Rail Transit*, *4*(1), 1–12. doi: 10.1007/s40864-018-0078-4

İnaç, H., & Vayvay, Ö. (2018). Risk management in city rail transportation system project: A case study of Istanbul. *International Journal of Innovation Engineering and Science Research*, 2(1), 23–29.

Mohammadi Pirouz, H., & Hajizadeh, A. (2020). A highly reliable propulsion system with onboard uninterruptible power supply for train application: Topology and control. *Sustainability, 12*(10), 3943. doi: 10.3390/su12103943

ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2560). *ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ (Railway Electrification)*. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: บริษัท จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์ จำกัด.

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. (2565). *รายงานแผนแม่บทการพัฒนาระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตเมือง (M-MAP2)*. กระทรวงคมนาคม. สืบค้นจาก https://www.otp.go.th/post/view/1657

ปณิตา เผ่าลินจง, กัณทิมา ภาคภูมิชน, ชิษชีพ บุรีรักษ์, ปาริชาติ เนี่ยะกุ๊น, วรรณภา สุวรรณชาติ, ศรัญยา เอี่ยมพงษ์, และ ธเนส เตชะเสน. (2565). ปัจจัยทางเศรษฐกิจที่มีผลต่อการตัดสินใจใช้บริการรถไฟฟ้า บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) (บีทีเอส) ของประชากรในเขตกรุงเทพมหานคร. *วารสารบริหารธุรกิจ, 12*(1), 13–27.

ไทยรัฐออนไลน์. (2565, 17 มีนาคม). รถไฟฟ้า BTS – MRT ขัดข้องชั่วคราว แนะผู้โดยสารเผื่อเวลาวางแผนการเดินทาง. *ไทยรัฐ*. สืบค้นจาก https://www.thairath.co.th/news/society/2343802

เดลินิวส์ออนไลน์. (2568). *ผู้ให้บริการทุกรายโปรดทราบ เมื่อรถไฟฟ้าของคุณ "ขัดข้อง"*. สืบค้นจาก https://www.dailynews.co.th/articles/1534330/

บีบีซีไทย. (2561). *รถไฟฟ้าบีทีเอส: ปัญหาขัดข้องเกิดจากอะไร?*. สืบค้นจาก https://www.bbc.com/thai/thailand-44611664

Chovančíková, N., & Dvořák, Z. (2019). Effect of a power failure on rail transport. *Transportation Research Procedia, 40*, 1297–1303. doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.179

Haes Alhelou, H., Hamedani-Golshan, M. E., Njenda, T. C., & Siano, P. (2019). A survey on power system blackout and cascading events: Research motivations and challenges. *Energies, 12*(4), 682. doi: 10.3390/en12040682

กรมการขนส่งทางราง. (2563). *ระบบการจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ*. สืบค้นจาก https://www.drt.go.th/library/ระบบการจ่ายไฟฟ้าสำหรับ-2

กระทรวงคมนาคม. (2568). สถิติอุบัติเหตุระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน. สืบค้นจาก https://datagov.mot.go.th/en/dataset/stat_incident_metro

Yuan, D., Gu, S., Liu, J., Zhang, Y., & Lv, C. (2012). Design and analysis of emergency self-traction system for urban rail transit vehicles. *Energy Procedia, 20*, 81–87. doi: 10.1016/j.egypro.2012.01.094

Xu, X., Sun, X., Zhou, Q., Jiang, X., Hu, D., & He, R. (2018). Design and research on the function of lithium-ion batteries emergency traction system for rail vehicles. *Advances in Mechanical Engineering, 10*(12), 1–21. doi: 10.1177/1687814018812296

Tian, Q., Zeng, G., Xu, W., Huang, Z., & Ma, D. (2022). Design of a bi-directional DC-DC converter for high-efficiency emergency self-traction of high-speed railway trains. *Proceedings of the 2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES)* (pp. 281–286). Beijing, China. doi: 10.1109/SPIES55999.2022.10082705

Kulworawanichpong, T. (2015). Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton–Raphson method. *Journal of Modern Transportation, 23*, 241–251. doi: 10.1007/s40534-015-0086-y

Alnuman, H., Gladwin, D., & Foster, M. (2018). Electrical modelling of a DC railway system with multiple trains. *Energies, 11*(11), 3211. doi: 10.3390/en11113211

Liu, X., & Li, K. (2020). Energy storage devices in electrified railway systems: A review. *Transportation Safety and Environment, 2*(3), 183–201. doi: 10.1093/tse/tdaa016

Zhang, H., Song, M., & Zhang, M. (2016). An energy-efficient optimized control algorithm for urban rail transit system. *Proceedings of the 2016 Chinese Control Conference* (pp. 10222–10226). doi: 10.1109/CHICC.2016.7554972

Su, S., Tang, T., & Wang, Y. (2016). Evaluation of strategies to reducing traction energy consumption of metro systems using an optimal train control simulation model. *Energies, 9*(2), 105. doi: 10.3390/en9020105

Mongkoldee, K., Leeton, U., & Kulworawanichpong, T. (2016). Single train movement modelling and simulation with rail potential consideration. *Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration* (pp. 7–12). Sapporo, Japan. doi:10.1109/SII.2016.7843967

Arboleya, P., Mohamed, B., & El-Sayed, I. (2018). DC railway simulation including controllable power electronic and energy storage devices. *IEEE Transactions on Power Systems, 33*(5), 5319–5329. doi: 10.1109/TPWRS.2018.2801023

Khodaparastan, M., Dutta, O., Saleh, M., & Mohamed, A. A. (2019). Modeling and simulation of DC electric rail transit systems with wayside energy storage. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68*(3), 2218–2228. doi: 10.1109/TVT.2019.2895026

Nagaura, Y., Oishi, R., Shimada, M., & Kaneko, T. (2017). Battery-powered drive systems: Latest technologies and outlook. *Hitachi Review, 66*(2), 138–144.

Hao, F., Zhang, G., Chen, J., Liu, Z., Xu, D., & Wang, Y. (2020). Optimal voltage regulation and power sharing in traction power systems with reversible converters. *IEEE Transactions on Power Systems, 35*(4), 2726–2735. doi: 10.1109/TPWRS.2020.2968108

Razmjou, S. (2021). A Comprehensive DC Railway Traction System Simulator Based on MATLAB: Tabriz Line 2 Metro Project Case Study. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering, 9*(2), 144–159. doi: 10.22098/joape.2021.8197.1569

Yu, X., Wang, X., & Qin, Y. (2024). Urban rail system modeling and simulation based on dynamic train density. *Electronics, 13*(5), 853. doi: 10.3390/electronics-13050853

Wang, K., Ge, Q., & Li, Y. (2014). Analysis and optimized control of emergency traction by storage battery for urban rail transit vehicle. *Proceedings of the 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (pp. 175–179). Hangzhou, China. doi: 10.1109/ICEMS.2014.7013467

Gao, J., Ma, R., Qiu, T., Zhu, Y., & Diao, L. (2022). Electric braking energy absorption schemes for emergency self-running EMU under long ramp. *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT) 2021, Lecture Notes in Electrical Engineering* (Vol. 864, pp. 263–274). Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-16-9905-4_22

Zhu, Y., & Li, Y. (2024). A loss-model-based efficiency optimization control method for induction traction system of high-speed train under emergency self-propelled mode. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 8*(2), 227–239. doi: 10.30941/CESTEMS.2024.00017

Wang, J., Huang, D., Hu, Y., Qin, N., & Zhu, Y. (2024). Modeling and SOC estimation of on-board energy storage device for trains under emergency traction. *Journal of Energy Storage, 100*, 113414. doi: 10.1016/j.est.2024.113414

Wang, J., Hu, Y., Huang, D., Zhang, Y., & Fang, J. (2023). Modeling and estimation of train traction characteristics under emergency traction considering on-board energy storage devices. *Proceedings of the 2023 IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)* (pp. 350–355). Xiangtan, China. doi: 10.1109/DDCLS58216.2023.10167130

Yang, X., Huang, D., & Wang, Q. (2024). Dynamic programming based trajectory optimization of electric multiple units during emergency self-rescue. *Proceedings of the 2024 IEEE 13th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)* (pp. 813–818). Kaifeng, China. doi: 10.1109/DDCLS61622.2024.10606579

Kume, Y., Kawatsu, H., & Shimizu, T. (2017). Development of emergency train travel function provided by stationary energy storage system. *Hitachi Review, 66*(2), 66–70.

Yang, Z., Yang, Z., Xia, H., & Lin, F. (2018). Brake voltage following control of supercapacitor-based energy storage systems in metro considering train operation state. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65*(8), 6751–6761. doi: 10.1109/TIE.2018.2793184

Sumpavakup, C., Suwannakijborihan, S., Ratniyomchai, T., & Kulworawanichpong, T. (2018). Peak demand cutting strategy with an on-board energy storage system in mass rapid transit. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 42*, 49–62. doi: 10.1007/s40998-018-0048-6

Meishner, F., & Sauer, D. U. (2019). Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids. *eTransportation, 1*, 100001. doi: 10.1016/j.etran.2019.04.001

British Standards Institution. (2004). *BS EN 50163:2004 – Railway applications – Supply voltages of traction systems*. London: British Standards Institution.

Qin, Q., Guo, T., Lin, F., & Yang, Z. (2019). Energy transfer strategy for urban rail transit battery energy storage system to reduce peak power of traction substation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68*(12), 11714–11724. doi: 10.1109/TVT.2019.2948766

Kou, L., Fan, W., & Song, S. (2020). Multi-agent-based modelling and simulation of high-speed train. *Computers & Electrical Engineering, 86*, 106744. doi: 10.1016/j.compeleceng.2020.106744

Zhu, F., Yang, Z., Lin, F., & Xin, Y. (2020). Decentralized cooperative control of multiple energy storage systems in urban railway based on multiagent deep reinforcement learning. *IEEE Transactions on Power Electronics, 35*(9), 9368–9379. doi: 10.1109/TPEL.2020.2971637

Yooyong, S., Kulworawanichpong, T., & Ratniyomchai, T. (2021). Energy saving by train-to-train energy-sharing in a DC rapid transit railway system. *Proceedings of the 2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)* (pp. 89–92). Nakhon Ratchasima, Thailand.
doi: 10.1109/ICPEI52436.2021.9690658

Cabrane, Z., & Lee, S. H. (2022). Control and management of railway system connected to microgrid stations. *IEEE Access, 10*, 40445–40455.
doi: 10.1109/ACCESS.2022.3165832

Chen, J., Zhao, Y., Wang, M., Wang, K., Huang, Y., & Xu, Z. (2024). Power sharing and storage-based regenerative braking energy utilization for sectioning post in electrified railways. *IEEE Transactions on Transportation Electrification, 10*(2), 2677–2688. doi: 10.1109/TTE.2023.3295089

Wright, L., & Fjellstrom, K. (2005). *Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy-makers in Developing Cities, 3a Module: Mass Transit Options*. Bangkok: GTZ Transport and Mobility Group.

นคร จันทศร. (2555). *ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

Brenna, M., Foiadelli, F., & Zaninelli, D. (2018). *Electrical Railway Transportation Systems*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Puttipakorn, P., & Upala, P. (2018). Comparative Analysis of Environmental Graphic Design for Wayfinding on the Exit Patterns of Mass Transit Stations. *The Open Transportation Journal*, *12*(1), 150–166.
doi: 10.2174/1874478018120100150.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Garre, A. G., & Gabaldon, A. (2019). Analysis, Evaluation and Simulation of Railway Diesel-Electric and Hybrid Units as Distributed Energy Resources. *Applied Sciences*, *9*(17). doi: 10.3390/app9173605.

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. (2561). *มขร S-T-001-256x มาตรฐานการแบ่งประเภททางรถไฟ*. ใน *มาตรฐานโครงสร้างทางรถไฟ* (น.1–1 - 1–4). กรุงเทพฯ: สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร.

National Academy of Sciences, Engineering, and Medicine. (2012). *Maintenance and Storage Facility*. in *Guidebook for Planning and Implementing Automated People Mover Systems at Airports* (pp. 27). Houston: Kimley-Horn and Associates Inc.

White, R. D. (2011). AC 25kV 50 Hz electrification supply design. in *5th IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems (REIS 2011)*, 92–130. doi: 10.1049/ic.2011.0181

Siemens. (2020). *DC traction power supply | Rail Electrification | Global*. Retrieved from https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/electrification/dc-traction-power-supply.html.

ชัยยุทธ์ สัมภวะคุปต์. (2560). *กลยุทธ์การตัดค่ายอดสำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นในรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน* (ปริญญานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต). นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สมพงษ์ ศิริโสภณศิลป์ วิษารัช สัญญาลักษณ์ฤชัย และวิรัช หิรัญ. (2554). การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย. *Journal of Transportation and Logistics*, *3*(1), 11–17. doi: 10.58837/CHULA.TRANSLOG.2011.1.2

Chymera, M., & Goodman, C. J. (2012). Overview of electric railway systems and the calculation of train performance. *IET Professional Development Course on Electric Traction Systems*. doi: 10.1049/ic.2012.0070

Nowakowski, W., Olczykowski, Z., & Wojciechowski, J. (2017). Supply railway traffic control devices in case of failure of the power system. *Transport System Telematics, 10*(4), 16–20.

Triwijaya, S., Pradipta, A., & Wati, T. (2023). Optimization of Alternating Current Power Flow Analysis in Railway Electrical System: A Brief Review. *Proceedings of the International Conference on Railway and Transportation (ICORT 2022)*, 249–257. doi: 10.2991/978-94-6463-126-5_26

Kile, H., Uhlen, K., Warland, L., & Kjølle, G. (2014). A comparison of AC and DC power flow models for contingency and reliability analysis. *Proceedings of the 2014 Power Systems Computation Conference*, 1–7. doi: 10.1109/PSCC.2014.7038459

Chovančíková, N., & Hoterová, K. (2021). Scenario analysis of the impact of a power outage to the transport infrastructure in the selected area. *Transportation Research Procedia*, *55*, 1423–1430. doi: 10.1016/j.trpro.2021.07.128

Fabella, V. M., & Szymczak, S. (2021). Resilience of Railway Transport to Four Types of Natural Hazards: An Analysis of Daily Train Volumes. *Infrastructures, 6*(12), 174. doi: 10.3390/infrastructures6120174

ABB Switzerland Ltd. (2021). *Lithium-ion battery system for ABB UPS solutions – SDI CE & UL 9540: Reliable, lightweight and compact UPS energy storage for critical applications*. สืบค้นจาก https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=4NWP107784R0001_EN&LanguageCode=en

Lin, S., Li, N., Feng, D., Guo, X., Pan, W., Wang, J., & Yang, C. (2020). A preventive opportunistic maintenance method for railway traction power supply system based on equipment reliability. *Railway Engineering Science*, *28*, 199–211. doi: 10.1007/s40534-020-00211-0

Chalkhure, K., Jijankar, S., Dhore, A., Sanganwar, A., & Parihar, V. R. (2017). Regenerative braking system for energy harvesting from railways and vehicles: A review and an approach. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, *5*(10), 18–25. doi: 10.17148/IJIREEICE.2017.51004.

Andrusca, M., Adam, M., Dragomir, A., & Lunca, E. (2021). Innovative integrated solution for monitoring and protection of power supply system from railway infrastructure. *Sensors, 21*(23), 7858. doi: 10.3390/s21237858

Bai, X., & Chen, J. (2024). Research on safety control technology of high-speed railway combined test based on threatening event analysis. *Railway Sciences*, *6*, 731–745. doi: 10.1108/RS-09-2024-0039

กรมการขนส่งทางราง. (2568). *ข้อมูลเหตุขัดข้องของรถไฟฟ้าในเมืองและชานเมือง*. สืบค้นจาก https://drt.gdcatalog.go.th/dataset/drt2565_06

คมชัดลึกออนไลน์. (2568). *อัปเดตวันนี้ (31 มี.ค. 68) รถไฟฟ้า "สายสีชมพู" เปิดให้บริการ ตั้งแต่ 06.00 น.* สืบค้นจาก https://www.komchadluek.net/news/general-news/600048

Miao, Y., Hynan, P., Jouanne, A. V., & Yokochi, A. (2019). Current Li-Ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, *12*(6), 1074. doi: 10.3390/en12061074

Rechard, G., & Gouttefangeas, R. (2017). Recovering energy from train braking for traction and grid use. *Energy Procedia*, *143*, 61–66. doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.648

Alfieri, L., Iannuzzi, D., Mottola, F., Pagano, M., & Roscia, M. (2018). Battery-based energy storage systems for catenary-free electric trains. *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*. doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607588

Abad, G. (2016). *Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Kale, S. (2019). DC to DC Converters and Its Application for Railway System – A Review. *International Journal of Electrical Engineering & Technology*, *10*(4), 13–21. doi: 10.34218/IJEET.10.4.2019.002

Ghaviha, N., Campillo, J., Bohlin, M., & Dahlquist, E. (2017). Review of application of energy storage devices in railway transportation. *Proceedings of the 8th International Conference on Applied Energy (ICAE 2016)*, *105*(pp. 4561–4568). doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.980

Khodaparastan, M., Mohamed, A. A., & Brandauer, W. (2019). Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *20*(8), 2831–2847. doi: 10.1109/TITS.2018.2886809

Gorji, S. A., Sahebi, H. G., Ektesabi, M., & Rad, A. B. (2019). Topologies and control schemes of bidirectional DC–DC power converters: An overview. *IEEE Access*, *7*, 117997–118019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937239

García, O., Zumel, P., De Castro, A., & Cobos, J. A. (2006). Automotive DC–DC bidirectional converter made with many interleaved buck stages. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *21*(3), 578–586. doi: 10.1109/TPEL.2006.872379

Kan, J., Wu, Y., Tang, Y., Zhang, B., & Zhang, Z. (2016). Dual active full-bridge bidirectional converter for V2G charger based on high-frequency AC buck-boost control strategy. *Proceedings of the 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)* (pp. 46–50). doi: 10.1109/ITEC-AP.2016.7512920

Park, S. & Song, Y. (2011). An interleaved half-bridge bidirectional dc–dc converter for energy storage system applications. *Proceedings of the 2011 International Conference on Power Electronics (ICPE)*. doi: 10.1109/ICPE.2011.5944485

Battistelli, L., Fantauzzi, M., Iannuzzi, D., & Lauria, D. (2012). Energy management of electrified mass transit systems with energy storage devices. *Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2012)* (pp. 1172–1177). doi: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264499

González-Gil, A., Palacin, R., & Batty, P. (2013). Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy Conversion and Management*, *75*, 374–388. doi: 10.1016/j.enconman.2013.06.039

Barrero, R., Tackoen, X., & Van Mierlo, J. (2008). Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro network. *Proceedings of the 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2008)* (pp. 75–388). doi: 10.1109/VPPC.2008.4677491

Camara, M. B., Gualous, H., Gustin, F., Berthon, A., & Dakyo, B. (2010). DC/DC converter design for supercapacitor and battery power management in hybrid vehicle applications: Polynomial control strategy. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *57*(2), 587–597. doi: 10.1109/TIE.2009.2025283

Rashid, H. M. (2018). *Power Electronics Handbook* (3rd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Lin, F., Li, X., Zhao, Y., & Yang, Z. (2016). Control strategies with dynamic threshold adjustment for supercapacitor energy storage system considering the train and substation characteristics in urban rail transit. *Energies*, *9*(4). doi: 10.3390/en9040257

Song, Y., Lu, B., Ji, X., & Zhang, J. (2012). Diffusion induced stresses in cylindrical lithium-ion batteries: Analytical solutions and design insights. *Journal of The Electrochemical Society*, *159*(12), A2060. doi: 10.1149/2.079212jes

Tran, M.-K., DaCosta, A., Mevawalla, A., Panchal, S., & Fowler, M. (2021). Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA. *Batteries*, *7*(3), 51. doi: 10.3390/batteries7030051

Kang, H. (2020). The application analysis of electrochemical energy storage technology in new energy power generation side. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 558*(5). doi: 10.1088/17551315/558/5/052018

Bachmann, I. (2017). *Batteries in a portable world* (4th ed.). British Columbia: Cadex Electronics Inc.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2558). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเซลล์และแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่มีอิเล็กโทรไลต์แอลคาไลน์หรืออิเล็กโทรไลต์อื่นที่ไม่ใช้กรดสำหรับการใช้งานแบบพกพาเฉพาะด้านความปลอดภัย* (มอก. 2217-2548). กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.

Mun, S. C., & Won, J. H. (2021). Manufacturing processes of microporous polyolefin separators for lithium-ion batteries and correlations between mechanical and physical properties. *Crystals*, *11*(9), 1013. doi: 10.3390/cryst11091013

iGet Solar Cell. (n.d.). *Li-Ion 18650 2600mAh 5C 13A*. Retrieved from https://www.igetsolarcell.com/product/107/li-ion-18650-2600mah-5c-13a

A123systems. (2024). *Cell applications*. Retrieved from http://www.a123systems.com/automotive/products/cells/

Samsung SDI. (n.d.). *Business areas*. Retrieved from https://www.samsungsdi.com/business/index.html

A123systems. (n.d.). *48V product*. Retrieved from https://www.a123systems.com/Product/48V.html

Meishner, F., Ünlübayir, C., & Sauer, D. U. (2022). Model-based investigation of an uncontrolled LTO wayside energy storage system in a 750 V tram grid. *Applied Energy*, *331*, 120337. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120337

Toshiba Corporation. (n.d.). *High-energy type cells*. Retrieved from https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product-next/product/cell/high-energy.html

Fedele, E., Iannuzzi, D., Tricoli, P., & Del Pizzo, A. (2021). Onboard energy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments. *IET Electrical Systems in Transportation*, *11*(4), 279–309. doi: 10.1049/ELS2.12026

GS Yuasa Corporation. (2014). *System utilizing industrial-use lithium-ion battery module LIM30H-8A installed in the new EV-E301 series developed by East Japan Railway Company*. Retrieved from https://www.gs-yuasa.com/en/newsrelease/article.php?ucode=gs151007580509_154

Microvast Holdings, Inc. (2025). *Lithium-ion battery solutions*. Retrieved from https://microvast.com/batteries/

เกษม อุทัยไขฟ้า และสุภนันท์ ต้นวรรณรักษ์. (2559). แบบจำลองทั่วไปของเซลล์แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนด้วยโปรแกรมจำลอง PSIM. *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 3*(21), 17-27.

Okedu, K. E. (2022). *Management and Applications of Energy Storage Devices*. doi: 10.5772/intechopen.94655

Zhang, J., Wu, M., & Liu, Q. (2017). A Novel Power Flow Algorithm for Traction Power Supply Systems Based on the Thevenin Equivalent. *Energies*, *11*(1), 126. doi : 10.3390/en11010126

Jobsoongnern, C., Ratniyomchai, T., & Kulworawanichpong, T. (2020). Energy Consumption Study of Rapid Charging of Catenary Free Light Rail Transit. *Proceedings of the 2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)* (pp. 13–16). Chiangmai, Thailand. doi: 10.1109/ICPEI49860.2020.9431573

Radu, P. V., Lewandowski, M., & Szelag, A. (2020). On-board and wayside energy storage devices applications in urban transport systems—Case study analysis for power applications. Energies, 13(8), 2013. doi:10.3390/en13082013

ภาคผนวก ก
ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่และการออกแบบขนาด ESTS

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23 Ah

ภาคผนวกส่วนนี้นำเสนอข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนต (Lithium Titanate Oxide: LTO) รุ่น Toshiba SCiB™ 23 Ah แสดงดังรูปที่ ก.1 ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นฐานในการออกแบบ ESD ใน ESTS สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงระดับแรงดันไฟฟ้า 750 โวลต์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ การเลือกใช้เซลล์ชนิดดังกล่าวมิได้พิจารณาจากความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว หากแต่พิจารณาร่วมกับสมรรถนะด้านกำลังไฟฟ้า ความทนทานต่อการใช้งานซ้ำ และความเสถียรทางความร้อน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีลักษณะโหลดแบบทรานเซียนต์สูง



รูปที่ ก.1 ลักษณะทางกายภาพของเซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23 Ah
(ที่มาภาพ: https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product-next/product/cell/high-energy.html [เข้าถึงเมื่อ 19 มีนาคม 2569])

เซลล์ Toshiba SCiB™ 23 Ah เป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้วัสดุแอโนดแบบลิเทียมไททาเนต ซึ่งมีคุณลักษณะเด่นในด้านความสามารถในการรองรับกระแสชาร์จและคายประจุในระดับสูงโดยมีการเสื่อมสภาพต่ำเมื่อเทียบกับเคมีแบตเตอรี่ชนิดอื่น นอกจากนี้ โครงสร้างทางเคมีของ LTO ยังส่งผลให้มีความเสถียรทางความร้อนสูง ลดความเสี่ยงของปรากฏการณ์ความร้อนสูงเกินควบคุมและสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้เซลล์ LTO เหมาะสมต่อการใช้งานในระบบ ESTS ซึ่งต้องรองรับทั้งการจ่ายกำลังไฟฟ้าระดับสูงในช่วงเวลาสั้นและการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าสำหรับอพยพขบวนรถไฟฟ้าในสถานการณ์ไฟดับอย่างมีประสิทธิภาพ

บริบทการใช้งาน LTO ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เซลล์ที่มีความสามารถด้านกำลังไฟฟ้าสูงมีความสำคัญมากกว่าความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากภาระโหลดของขบวนรถไฟฟ้ามีลักษณะเป็นจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้คงที่และเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการเลือกใช้ Toshiba

SCiB™ 23 Ah จึงสอดคล้องกับลักษณะการใช้งานดังกล่าว โดยสามารถรองรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าระดับสูงในช่วงเวลาสั้นได้โดยไม่ทำให้เกิดข้อจำกัดทางความร้อนหรือแรงดันไฟฟ้าตกที่รุนแรงเกินไป

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23 Ah

รายการ	ค่า
เคมีแบตเตอรี่	Lithium Titanate Oxide (LTO)
รุ่นเซลล์	Toshiba SCiB™ 23 Ah
รูปทรง	prismatic
ความจุพิกัด	23 Ah
แรงดันไฟฟ้านอมินัล	2.3 V
กำลังไฟฟ้าอ้างอิง (10s)	1,000 W
ความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าเชิงมวล	96 Wh/kg
ความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าเชิงปริมาตร	202 Wh/L
ขนาดต่อเซลล์	W116 × D22 × H106 mm
น้ำหนักต่อเซลล์	~0.55 kg

จากข้อมูลดังกล่าว จะเห็นได้ว่าเซลล์ LTO มีแรงดันไฟฟ้าปกติของเซลล์ต่ำ ส่งผลให้ต้องใช้จำนวนเซลล์แบบอนุกรมจำนวนมากเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าระดับระบบ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียในด้านจำนวนเซลล์นี้ถูกชดเชยด้วยความสามารถด้านกำลังไฟฟ้าและความทนทาน ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักที่ต้องการสำหรับ ESD ในงานระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ก.2 การออกแบบแบตเตอรี่แพ็ค

การออกแบบแบตเตอรี่แพ็คในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการภายใต้ข้อกำหนดของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงระดับแรงดัน 750 โวลต์ โดยใช้เซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23 Ah เป็นเซลล์อ้างอิงในการออกแบบ แบตเตอรี่แพ็คถูกกำหนดให้สามารถรองรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรับการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบ ESTS และการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งระบบดังกล่าว กำหนดกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณี ตามระดับภาระของระบบ ESTS ต่อจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่แพ็ค ได้แก่ กรณีที่รองรับขบวนรถไฟฟ้า 1 ขบวน

2 ขบวน และ 3 ขบวน โดยกำหนดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแพ็คเท่ากับ 900 กิโลวัตต์ 1,800 กิโลวัตต์ และ 2,700 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ กำลังไฟฟ้าต่อเนื่องและพลังงานขั้นต่ำของแพ็คถูกกำหนดให้เพิ่มขึ้นตามจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ได้รับพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้การออกแบบสะท้อนภาระโหลดที่เพิ่มขึ้นของระบบอย่างเป็นสัดส่วน

ก.2.1 การกำหนดจำนวนเซลล์แบบอนุกรม

จำนวนเซลล์แบบอนุกรม (Number of series cells: N_S) กำหนดจากแรงดันไฟฟ้านอมินัลของแพ็ค (Nominal voltage of pack: V_{pack}) เท่ากับ 750 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้านอมินัลของเซลล์ (Nominal voltage of cell: V_{cell}) เท่ากับ 2.3 โวลต์ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} N_S &= V_{pack} \div V_{cell} \\ &= 750\text{V} \div 2.3\text{V} \\ &\cong 327\text{cells} \end{aligned}$$

ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้านอมินัลของแพ็คที่ได้จากการต่ออนุกรมเซลล์ทั้งหมด 327 ชุด มีค่าจริงเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{pack,actual} &= N_S \times V_{cell} \\ &= 327\text{cells} \times 2.3\text{V} \\ &= 752.1\text{V} \end{aligned}$$

ค่าดังกล่าวถือว่าเหมาะสมกับการเชื่อมต่อเข้ากับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงระดับ 750 โวลต์ และยังทำให้สามารถใช้แรงดันไฟฟ้านอมินัลของแพ็คเป็นฐานในการคำนวณได้

ก.2.2 การกำหนดจำนวนเซลล์แบบขนาน

การกำหนดจำนวนเซลล์แบบขนาน (Number of parallel cells: N_P) พิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำที่ต้องการในแต่ละกรณี โดยกรณีฐานกำหนดให้แบตเตอรี่แพ็คต้องมีความจุนอมินัลของเซลล์ (Nominal capacity of cell: Q_{cell}) เท่ากับ 23 แอมป์ชั่วโมง และพลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำของแพ็ค (Minimum energy of pack: $E_{pack,min}$) เท่ากับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับรองรับภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้ขบวนรถไฟฟ้าจำนวน 1 ขบวน ดังนั้น เมื่อพิจารณากรณีการแบ่งปันพลังงาน

ให้ขบวนรถไฟฟ้า 2 และ 3 ขบวน พลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำของแพ็คจึงกำหนดเป็น 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง และ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ โดยคงจำนวนเซลล์แบบอนุกรมตามแรงดันไฟฟ้าและเพิ่มเซลล์แบบขนานเพื่อขยายความจุแพ็ค ทั้งนี้ ค่าที่คำนวณได้จะปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็ม เพื่อให้พลังงานสำรองไม่น้อยกว่าค่าขั้นต่ำ ซึ่งต้องคำนวณหาความจุของแพ็ค (Capacity of pack: Q_{pack}) ดังนี้

สำหรับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$Q_{pack,65kWh} = E_{pack,min} \div V_{pack}$$
$$= 65\text{kWh} \div 750\text{V}$$
$$= 86.67\text{Ah}$$

สำหรับ 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$Q_{pack,130kWh} = E_{pack,min} \div V_{pack}$$
$$= 130\text{kWh} \div 750\text{V}$$
$$= 173.33\text{Ah}$$

สำหรับ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$Q_{pack,195kWh} = E_{pack,min} \div V_{pack}$$
$$= 195\text{kWh} \div 750\text{V}$$
$$= 260.00\text{Ah}$$

จำนวนเซลล์แบบขนานคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความจุของแพ็คที่ต้องการกับความจุนอมินัลของเซลล์ ดังนี้

สำหรับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$N_{p,65kWh} = Q_{pack,65kWh} \div Q_{cell}$$
$$= 86.67\text{Ah} \div 23\text{Ah}$$
$$\approx 4\text{cells}$$

สำหรับ 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$N_{p,130kWh} = Q_{pack,130kWh} \div Q_{cell}$$
$$= 173.33\text{Ah} \div 23\text{Ah}$$
$$\approx 8\text{cells}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$N_{p,195kWh} = Q_{pack,195kWh} \div Q_{cell}$$
$$= 260.00Ah \div 23Ah$$
$$\approx 12cells$$

ส่งผลให้ความจุของแพ็ค (Actual capacity of pack: $Q_{pack,actual}$) และพลังงานไฟฟ้าของแพ็ค (Energy of pack: $E_{pack,actual}$) ที่ได้จากการต่อขนานเซลล์ตามที่กำหนดมีค่าจริงเท่ากับ

สำหรับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$Q_{pack,actual,65kWh} = N_{p,65kWh} \times Q_{cell}$$
$$= 4 \times 23Ah$$
$$= 92Ah$$
$$E_{pack,actual,65kWh} = V_{pack,actual} \times Q_{pack,actual,65kWh}$$
$$= 752.1V \times 92Ah$$
$$= 69.19kWh$$

สำหรับ 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$Q_{pack,actual,130kWh} = N_{p,130kWh} \times Q_{cell}$$
$$= 8 \times 23Ah$$
$$= 184Ah$$
$$E_{pack,actual,130kWh} = V_{pack,actual} \times Q_{pack,actual,130kWh}$$
$$= 752.1V \times 184Ah$$
$$= 138.39kWh$$

สำหรับ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$Q_{pack,actual,195kWh} = N_{p,195kWh} \times Q_{cell}$$
$$= 12 \times 23Ah$$
$$= 276Ah$$
$$E_{pack,actual,195kWh} = V_{pack,actual} \times Q_{pack,actual,195kWh}$$
$$= 752.1V \times 276Ah$$
$$= 207.58kWh$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.2.3 การตรวจสอบความสามารถในการรองรับกำลังไฟฟ้าของแพ็ค

ภายหลังจากได้โครงสร้างแพ็คแบบ 327s4p แล้ว ต้องตรวจสอบว่าสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak power of pack: P_{peak}) และกำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง (Continuous power of pack: P_{cont}) ตามข้อกำหนดของระบบหรือไม่ โดยคำนวณกระแสไฟฟ้าสูงสุด (Peak current of pack: I_{peak}) และกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง (Continuous current of pack: I_{cont}) จากความสัมพันธ์

$$P = V \times I$$

สำหรับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$I_{peak,65kWh} = P_{peak,65kWh} \div V_{pack,actual}$$
$$= 900\text{kW} \div 752.1\text{V}$$
$$= 1{,}196.7\text{A}$$
$$I_{cont,65kWh} = P_{cont,65kWh} \div V_{pack,actual}$$
$$= 480\text{kW} \div 752.1\text{V}$$
$$= 638.2\text{A}$$

สำหรับ 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$I_{peak,130kWh} = P_{peak,130kWh} \div V_{pack,actual}$$
$$= 1{,}800\text{kW} \div 752.1\text{V}$$
$$= 2{,}393.3\text{A}$$
$$I_{cont,130kWh} = P_{cont,130kWh} \div V_{pack,actual}$$
$$= 960\text{kW} \div 752.1\text{V}$$
$$= 1{,}276.4\text{A}$$

สำหรับ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$I_{peak,195kWh} = P_{peak,195kWh} \div V_{pack,actual}$$
$$= 2{,}700\text{kW} \div 752.1\text{V}$$
$$= 3{,}590.0\text{A}$$
$$I_{cont,195kWh} = P_{cont,195kWh} \div V_{pack,actual}$$
$$= 1{,}440\text{kW} \div 752.1\text{V}$$
$$= 1{,}914.6\text{A}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้ารวมของแต่ละกรณีหารด้วยจำนวนเซลล์แบบขนาน จะได้ว่ากระแสต่อสตริงในกรณีกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ 299.2 แอมป์ และกรณีกำลังไฟฟ้าต่อเนื่องมีค่าประมาณ 159.6 แอมป์ สำหรับทั้งสามกรณี ดังนั้น การเพิ่มจำนวนเซลล์แบบขนานตามจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้าทำให้ภาระกระแสต่อสตริงยังคงอยู่ในระดับเดิม แม้กำลังไฟฟ้ารวมของแพ็คจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน จึงแสดงว่าโครงสร้าง 327s4p 327s8p และ 327s12p สามารถรองรับข้อกำหนดด้านกำลังไฟฟ้าสูงสุดและกำลังไฟฟ้าต่อเนื่องของแต่ละกรณีได้อย่างสอดคล้องกัน

ก.2.4 การคำนวณน้ำหนักรวมของเซลล์ในแพ็ค

จำนวนเซลล์รวมของแพ็คคำนวณได้จากผลคูณของจำนวนเซลล์แบบอนุกรมและแบบขนาน และเมื่ออ้างอิงน้ำหนักต่อเซลล์ประมาณ 0.55 กิโลกรัม น้ำหนักรวมของแพ็คจะมีค่า ดังนี้

สำหรับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$N_{total,65kWh} = N_S \times N_{P,65kWh}$$
$$= 327\text{cells} \times 4\text{cell}$$
$$= 1{,}308\text{cells}$$
$$W_{total,65kWh} = N_{total,65kWh} \times W_{cell}$$
$$= 1{,}308\text{cells} \times 0.55\text{kg}$$
$$= 719.4\text{kg}$$

สำหรับ 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$N_{total,130kWh} = N_S \times N_{P,130kWh}$$
$$= 327\text{cells} \times 8\text{cell}$$
$$= 2{,}616\text{cells}$$
$$W_{total,130kWh} = N_{total,130kWh} \times W_{cell}$$
$$= 2{,}616\text{cells} \times 0.55\text{kg}$$
$$= 1{,}438.8\text{kg}$$

สำหรับ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$N_{total,195kWh} = N_S \times N_{P,195kWh}$$
$$= 327\text{cells} \times 12\text{cell}$$
$$= 3{,}924\text{cells}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$W_{total,195kWh} = N_{total,195kWh} \times W_{cell}$$
$$= 3{,}924\text{cells} \times 0.55\text{kg}$$
$$= 2{,}158.2\text{kg}$$

ทั้งนี้ น้ำหนักดังกล่าวเป็นน้ำหนักของเซลล์เท่านั้น หากรวมอุปกรณ์ประกอบระดับแพ็ค เช่น โครงสร้างกล่องบรรจุ บัสบาร์ อุปกรณ์ป้องกัน ระบบจัดการแบตเตอรี่ ระบบระบายความร้อน เป็นต้น น้ำหนักรวมของแพ็คจริงจะสูงกว่าค่าที่แสดงไว้

ก.2.5 สรุปผลการออกแบบแพ็ค

จากการคำนวณข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าการออกแบบแบตเตอรี่แพ็ค Toshiba SCiB™ 23 Ah สำหรับจำลองกรณีการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ไปยังขบวนรถไฟฟ้าอื่น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณีตามระดับกำลังไฟฟ้าสูงสุดและจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงาน โดยโครงสร้างแพ็คที่เหมาะสมคือ 327s4p 327s8p และ 327s12p ตามลำดับ โครงสร้างดังกล่าวให้พลังงานไฟฟ้าของแพ็คประมาณ 69.19 กิโลวัตต์ชั่วโมง 138.39 กิโลวัตต์ชั่วโมง และ 207.58 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่าพลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำที่กำหนดไว้ที่ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง และ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ อีกทั้งยังสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแพ็คเท่ากับ 900 กิโลวัตต์ 1,800 กิโลวัตต์ และ 2,700 กิโลวัตต์ ได้ภายใต้แรงดันไฟฟ้าแพ็คประมาณ 752.1 โวลต์ กล่าวได้ว่า การเพิ่มจำนวนเซลล์แบบขนานตามจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ได้รับพลังงานช่วยให้แพ็คสามารถเพิ่มทั้งพลังงานรวมและกำลังไฟฟ้ารวมได้อย่างเป็นสัดส่วน ขณะที่กระแสต่อสตริงยังอยู่ในระดับใกล้เคียงกันในทุกกรณี จึงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นโครงสร้างอ้างอิงในการจำลองสมรรถนะของระบบ ESTS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ แสดงดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 สรุปผลการคำนวณของแบตเตอรี่แพ็ค Toshiba SCiB™ 23 Ah

รายการ	**โครงสร้าง ESTS เมื่อ ESTS:tr**		
รูปแบบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	1ESTS : 1tr	1ESTS : 2tr	1ESTS : 3tr
กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแพ็ค	900 kW	1,800 kW	2,700 kW
กำลังไฟฟ้าต่อเนื่องของแพ็ค	480 kW	960 kW	1,440 kW
แรงดันไฟฟ้าของแพ็ค	752.1 V	752.1 V	752.1 V
ความจุไฟฟ้าของแพ็ค	92 Ah	184 Ah	276 Ah

ตารางที่ ก.2 สรุปผลการคำนวณของแบตเตอรี่แพ็ค Toshiba SCiB™ 23 Ah (ต่อ)

รายการ	โครงสร้าง ESTS เมื่อ ESTS:tr		
พลังงานไฟฟ้าของแพ็ค	69.19 kWh	138.39 kWh	207.58 kWh
กระแสไฟฟ้าสูงสุดของแพ็ค	1,196.7 A	2,393.3 A	3,590.0 A
กระแสไฟฟ้าต่อเนื่องของแพ็ค	638.2 A	1,276.4 A	1,914.6 A
จำนวนเซลล์รวมทั้งหมด	1,308 cells	2,616 cells	3,924 cells
จำนวนเซลล์อนุกรม	327 cells	327 cells	327 cells
จำนวนเซลล์ขนาน	4 cells	8 cells	12 cells
โครงสร้างแพ็ค	327s4p	327s8p	327s12p
น้ำหนักเซลล์รวมโดยประมาณ	719.4 kg	1,438.8 kg	2,158.2 kg

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข
การคำนวณระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข้อจำกัดในทางปฏิบัติของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS กับขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งระบบ ประเด็นสำคัญอย่างหนึ่งคือระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกตามแนวระบบจ่ายไฟกระแสตรง 750 โวลต์ โดยอาศัยแบบจำลองความต้านทานเชิงเส้นของสายจ่ายและรางวิ่ง ซึ่งสามารถประมาณแรงดันไฟฟ้าที่ปลายทาง ณ ขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้ตามระยะทางการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยในบทที่ 4 และ 5 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดใช้ระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไว้ที่ประมาณ 3.5 กิโลเมตร เพื่อใช้เป็นข้อจำกัดร่วมกันในทุกกรณีทดสอบ ซึ่งกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายทางของขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้าต้องไม่ต่ำกว่าค่าขั้นต่ำที่ยอมรับได้ภายใต้เงื่อนไขการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า สามารถแสดงรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

$$V_{tr} = V_{ESTS} - I_{tr,max}R_{line}$$

เมื่อ

$$R_{line} = d(R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2})$$

จะได้

$$V_{tr} = V_{ESTS} - I_{tr,max} \times d(R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2})$$

เมื่อต้องการหาระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS ($d_{sh,max}$) ให้กำหนด V_{tr} เท่ากับแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำที่ใช้เป็นเกณฑ์ ($V_{sh,min}$) และ V_{ests} เท่ากับ แรงดันไฟฟ้าระดับปกติของระบบ ($V_{sh,nor}$) จัดรูปสมการใหม่

$$d_{sh,max} = \frac{V_{sh,tr} - V_{sh,min}}{I_{tr,\max}(R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2})}$$

โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณจะสามารถกำหนดโดยอ้างอิงระบบที่ใช้เป็นกรณีศึกษาได้ดังนี้

$V_{sh,nor}$ = 750 โวลต์

$V_{sh,min}$ = 500 โวลต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$I_{tr,max}$ = 1,200 แอมป์

$R_{cond/km}$ = 0.05 โอห์มต่อกิโลเมตร

$R_{rail/km}$ = 0.02 โอห์มต่อกิโลเมตร

แทนค่าลงในสมการหาค่า d_{max} จะได้

$$d_{max} = \frac{750-500}{1,200(0.05+\frac{0.02}{2})}$$

$$= \frac{250}{72}$$

$$= 3.4722$$

$d_{max} \approx$ 3.5 กิโลเมตร

ดังนั้น ระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่คำนวณได้จากแบบจำลองอย่างง่ายนี้มีค่าประมาณ 3.5 กิโลเมตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS



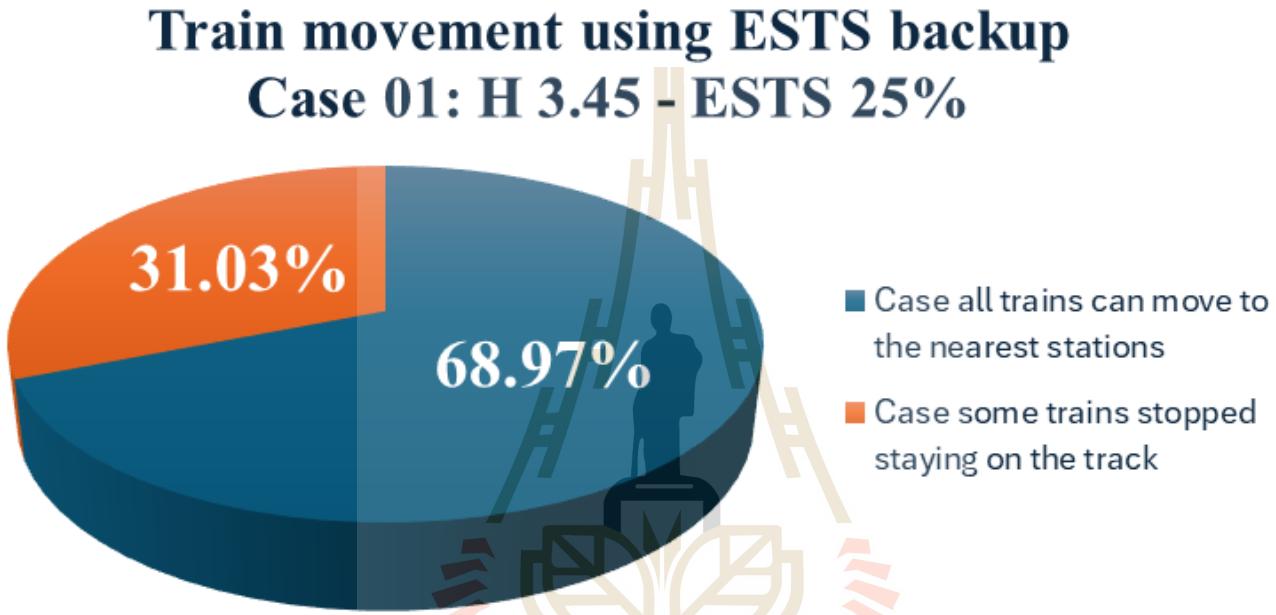
ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบ Case 01 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 25%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	44.32	13.02	26.68	21.79	93.32	77.27	1.34	1,800.40	639.83	-
2	YES	35.46	7.39	20.10	16.53	96.21	81.82	1.23	1,652.80	665.65	-
3	YES	31.25	20.43	24.67	20.12	89.52	83.97	1.85	2,506.40	643.78	-
4	YES	42.36	16.38	27.14	21.87	91.60	78.28	1.56	2,102.40	628.83	-
5	YES	34.60	21.20	27.57	22.49	89.13	82.26	1.80	2,439.10	618.49	-
6	YES	40.81	18.72	26.08	21.26	90.40	79.07	1.88	2,539.10	616.75	-
7	YES	39.31	15.24	25.33	20.92	92.18	79.84	1.33	1,786.60	654.40	-
8	YES	34.64	23.42	28.52	23.34	87.99	82.24	1.02	1,369.20	640.65	-
9	YES	35.55	7.46	21.23	17.49	96.17	81.77	1.42	1,920.10	622.06	-
10	NO	38.57	10.16	25.40	20.98	94.79	80.22	1.84	2,487.50	607.75	Train not at station: 2 3
11	YES	27.61	6.25	17.70	14.64	96.79	85.84	1.54	2,077.80	687.64	-
12	NO	32.64	13.68	23.78	19.55	92.98	83.26	1.26	1,694.60	609.81	Train not at station: 4
13	YES	36.30	1.82	18.33	15.38	99.07	81.38	1.50	2,020.50	628.27	-
14	YES	36.62	25.92	29.59	24.23	86.71	81.22	1.40	1,890.90	660.49	-
15	YES	33.24	11.53	19.58	16.34	94.09	82.96	1.37	1,843.70	673.46	-

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบ Case 01 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 25% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	NO	33.46	19.26	25.11	20.58	90.12	82.84	1.78	2,399.10	607.94	Train not at station: 6
17	YES	27.76	18.60	23.61	19.22	90.46	85.77	1.29	1,739.00	620.79	-
18	YES	37.37	20.41	26.45	21.51	89.53	80.84	1.61	2,173.50	618.38	-
19	YES	31.57	14.57	23.26	18.88	92.53	83.81	1.44	1,947.20	634.42	-
20	YES	44.01	16.31	28.41	23.29	91.63	77.43	1.86	2,517.30	633.40	-
21	YES	54.17	17.25	29.66	24.32	91.16	72.22	2.12	2,869.80	624.68	-
22	YES	34.55	10.02	19.94	16.51	94.86	82.28	1.94	2,627.50	659.92	-
23	NO	44.34	15.32	26.13	21.45	92.15	77.26	1.61	2,169.40	651.43	Train not at station: 7
24	YES	28.15	11.96	21.04	16.89	93.86	85.56	0.94	1,259.70	621.55	-
25	NO	49.24	15.05	26.61	21.78	92.28	74.75	1.62	2,182.00	642.04	Train not at station: 3 6 13
26	NO	26.38	4.58	15.68	12.87	97.65	86.47	2.11	2,861.50	646.15	Train not at station: 3 11 13
27	NO	28.81	11.15	17.96	14.68	94.28	85.22	1.35	1,814.90	644.01	Train not at station: 2 4 6 9 11
28	NO	14.05	4.58	8.51	7.08	97.65	92.79	1.18	1,589.80	666.48	Train not at station: 2 3 10 13
29	NO	11.65	0.00	3.10	2.62	100.00	94.03	0.88	1,175.50	0.00	Train not at station: 3 4 7 10 11 13 14

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง



รูปที่ ค.1 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

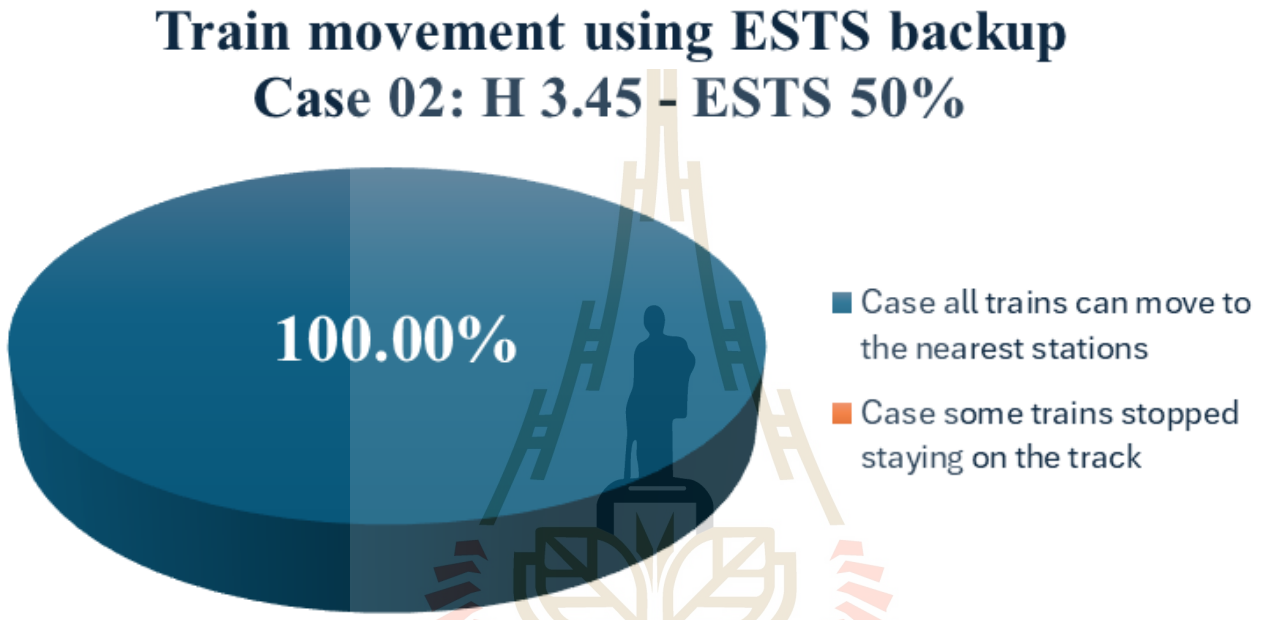
ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบ Case 02 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 50%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	27.98	4.21	15.51	12.86	93.90	59.44	0.87	1,200.00	691.69	-
2	YES	24.23	2.30	11.64	9.70	96.67	64.89	0.87	1,200.00	704.27	-
3	YES	27.24	0.46	14.43	12.05	99.33	60.52	0.86	1,171.89	708.84	-
4	YES	25.95	5.94	16.00	13.30	91.39	62.39	0.84	1,139.73	685.95	-
5	YES	27.64	6.08	16.04	13.36	91.19	59.94	0.85	1,155.46	675.73	-
6	YES	24.66	2.69	15.21	12.65	96.10	64.26	0.88	1,200.00	682.88	-
7	YES	34.02	1.92	14.59	12.14	97.21	50.70	0.84	1,136.14	690.32	-
8	YES	26.71	4.10	16.53	13.72	94.06	61.29	0.86	1,200.00	677.69	-
9	YES	31.91	4.93	12.28	10.24	92.85	53.76	0.88	1,200.00	703.73	-
10	YES	25.29	3.74	16.82	14.03	94.59	63.34	0.85	1,156.62	699.18	-
11	YES	17.05	5.10	10.12	8.37	92.61	75.29	0.86	1,171.89	687.20	-
12	YES	23.62	7.67	15.08	12.60	88.89	65.77	0.85	1,151.72	700.98	-
13	YES	33.49	0.47	10.42	8.73	99.33	51.47	0.87	1,200.00	719.17	-
14	YES	28.18	8.89	17.02	14.06	87.12	59.17	0.87	1,200.00	682.35	-
15	YES	19.83	1.22	11.22	9.39	98.23	71.26	0.84	1,136.14	663.52	-

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบ Case 02 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 50% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	21.99	2.03	15.91	13.24	97.05	68.13	0.88	1,200.00	699.57	-
17	YES	35.13	2.90	13.83	11.57	95.79	49.09	0.87	1,200.00	710.91	-
18	YES	26.05	0.84	15.49	12.93	98.79	62.24	0.87	1,200.00	689.67	-
19	YES	22.11	1.38	13.64	11.36	98.00	67.96	0.84	1,136.14	686.25	-
20	YES	31.01	5.65	16.49	13.77	91.82	55.06	0.86	1,162.69	698.14	-
21	YES	25.93	0.79	17.22	14.34	98.86	62.42	0.88	1,200.00	673.31	-
22	YES	22.82	3.47	11.47	9.57	94.98	66.93	0.86	1,200.00	688.38	-
23	YES	25.97	2.85	15.35	12.69	95.88	62.37	0.84	1,136.14	680.18	-
24	YES	25.39	0.42	12.51	10.43	99.40	63.20	0.88	1,195.76	707.82	-
25	YES	25.47	8.15	15.95	13.29	88.19	63.09	0.85	1,151.72	678.26	-
26	YES	18.83	1.61	10.04	8.32	97.67	72.70	0.86	1,171.89	689.29	-
27	YES	25.60	6.12	15.63	13.01	91.13	62.89	0.84	1,136.14	692.81	-
28	YES	21.82	1.63	11.56	9.63	97.64	68.38	0.88	1,200.00	693.46	-
29	YES	26.25	2.14	14.60	12.08	96.90	61.95	0.84	1,136.14	684.09	-

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง



รูปที่ ค.2 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

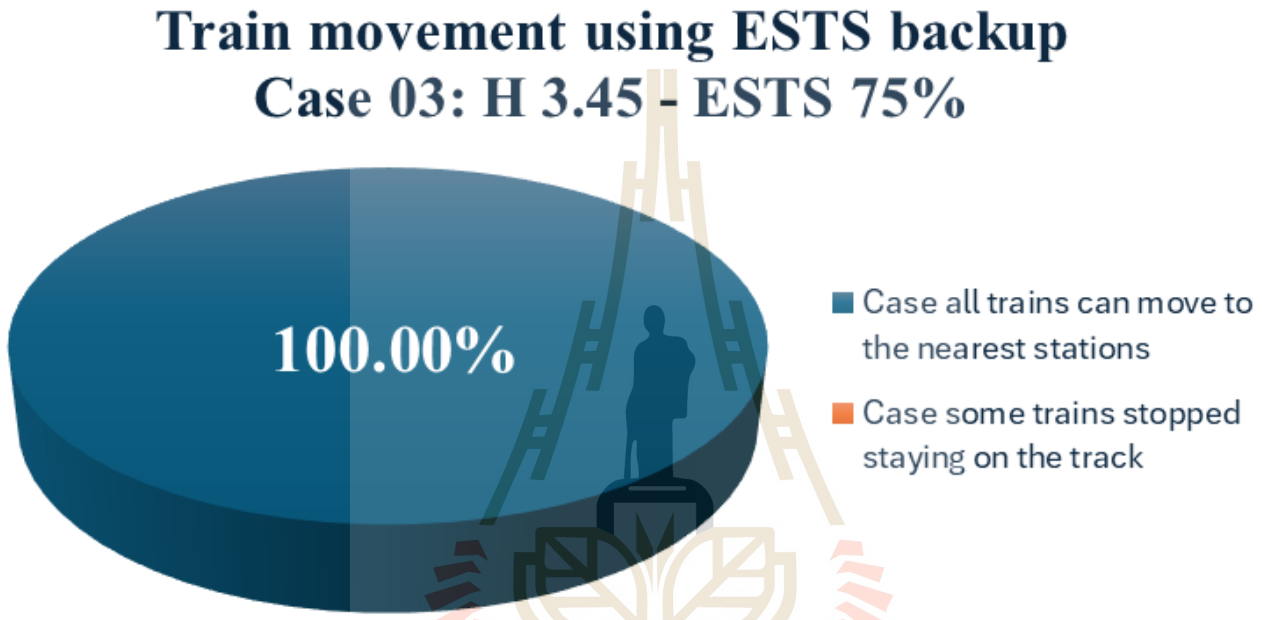
ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบ Case 03 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 75%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	31.20	0.00	10.94	9.16	100.00	54.79	0.87	1,200.00	713.47	-
2	YES	20.50	0.24	8.17	6.84	99.65	70.29	0.84	1,136.14	713.55	-
3	YES	27.24	0.00	10.13	8.49	100.00	60.52	0.86	1,171.89	716.82	-
4	YES	20.01	0.00	11.29	9.47	100.00	71.00	0.86	1,200.00	725.61	-
5	YES	29.00	2.75	11.29	9.44	96.01	57.97	0.84	1,144.84	716.67	-
6	YES	23.08	1.46	10.71	8.97	97.88	66.56	0.88	1,200.00	707.12	-
7	YES	25.40	0.51	10.28	8.60	99.26	63.19	0.87	1,200.00	721.12	-
8	YES	31.15	0.00	11.67	9.77	100.00	54.85	0.86	1,200.00	703.68	-
9	YES	33.65	0.00	8.64	7.24	100.00	51.23	0.88	1,200.00	721.00	-
10	YES	18.41	3.36	11.80	9.86	95.14	73.31	0.84	1,136.14	699.69	-
11	YES	19.32	0.00	7.14	5.96	100.00	72.00	0.86	1,200.00	690.73	-
12	YES	20.44	0.28	10.58	8.85	99.59	70.38	0.85	1,151.72	700.79	-
13	YES	31.91	0.00	7.30	6.12	100.00	53.75	0.87	1,200.00	725.86	-
14	YES	31.00	0.00	12.08	10.11	100.00	55.08	0.87	1,200.00	708.21	-
15	YES	27.32	0.09	7.88	6.60	99.87	60.41	0.86	1,171.89	727.12	-

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบ Case 03 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 75% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	25.79	2.78	11.19	9.35	95.97	62.62	0.88	1,200.00	708.56	-
17	YES	23.04	0.24	9.70	8.13	99.65	66.61	0.87	1,200.00	705.21	-
18	YES	24.80	0.00	10.87	9.11	100.00	64.05	0.87	1,200.00	721.41	-
19	YES	24.95	0.00	9.60	8.04	100.00	63.84	0.86	1,200.00	721.17	-
20	YES	27.38	0.61	11.58	9.70	99.12	60.32	0.88	1,197.95	711.24	-
21	YES	37.03	0.00	12.14	10.17	100.00	46.34	0.88	1,200.00	707.72	-
22	YES	19.37	0.43	8.07	6.76	99.38	71.93	0.86	1,200.00	721.49	-
23	YES	31.33	0.75	10.87	9.10	98.91	54.59	0.86	1,171.89	675.14	-
24	YES	19.36	0.00	8.78	7.34	100.00	71.94	0.88	1,200.00	721.52	-
25	YES	25.38	2.32	11.17	9.32	96.64	63.21	0.87	1,200.00	672.89	-
26	YES	17.15	0.11	7.10	5.95	99.84	75.15	0.86	1,171.89	709.94	-
27	YES	32.26	0.00	11.00	9.21	100.00	53.25	0.87	1,200.00	705.57	-
28	YES	20.79	0.27	8.14	6.82	99.61	69.87	0.87	1,200.00	717.76	-
29	YES	27.99	0.00	10.34	8.67	100.00	59.43	0.86	1,171.89	716.45	-

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง



รูปที่ ค.3 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 3.45 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบ Case 04 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 25%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	44.23	13.02	26.69	21.81	93.33	77.32	1.32	1,782.25	662.15	-
2	YES	31.36	7.39	20.15	16.62	96.21	83.92	1.11	1,496.16	681.79	-
3	YES	27.02	20.57	24.72	20.19	89.45	86.14	1.67	2,253.72	663.07	-
4	YES	43.12	16.60	27.27	22.08	91.49	77.89	1.57	2,120.50	627.94	-
5	YES	34.60	21.20	27.57	22.49	89.13	82.26	1.80	2,439.09	618.49	-
6	YES	40.81	18.72	26.08	21.26	90.40	79.07	1.88	2,539.06	616.75	-
7	YES	47.59	15.24	25.42	21.07	92.18	75.60	1.47	1,988.51	665.94	-
8	YES	34.70	23.22	28.56	23.42	88.09	82.20	1.00	1,338.86	674.11	-
9	YES	35.53	8.01	21.24	17.50	95.89	81.78	1.49	2,003.33	622.06	-
10	NO	38.57	10.16	25.40	20.98	94.79	80.22	1.84	2,487.47	607.75	Train not at station: 2 3
11	YES	27.61	6.25	17.70	14.64	96.79	85.84	1.54	2,077.84	687.64	-
12	NO	32.64	13.68	23.78	19.55	92.98	83.26	1.26	1,694.62	609.81	Train not at station: 4
13	YES	36.30	1.82	18.33	15.38	99.07	81.38	1.50	2,020.54	628.27	-
14	YES	36.62	25.92	29.59	24.23	86.71	81.22	1.40	1,890.90	660.49	
15	YES	33.24	11.53	19.58	16.34	94.09	82.96	1.37	1,843.73	673.46	-

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบ Case 04 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 25% (ต่อ)

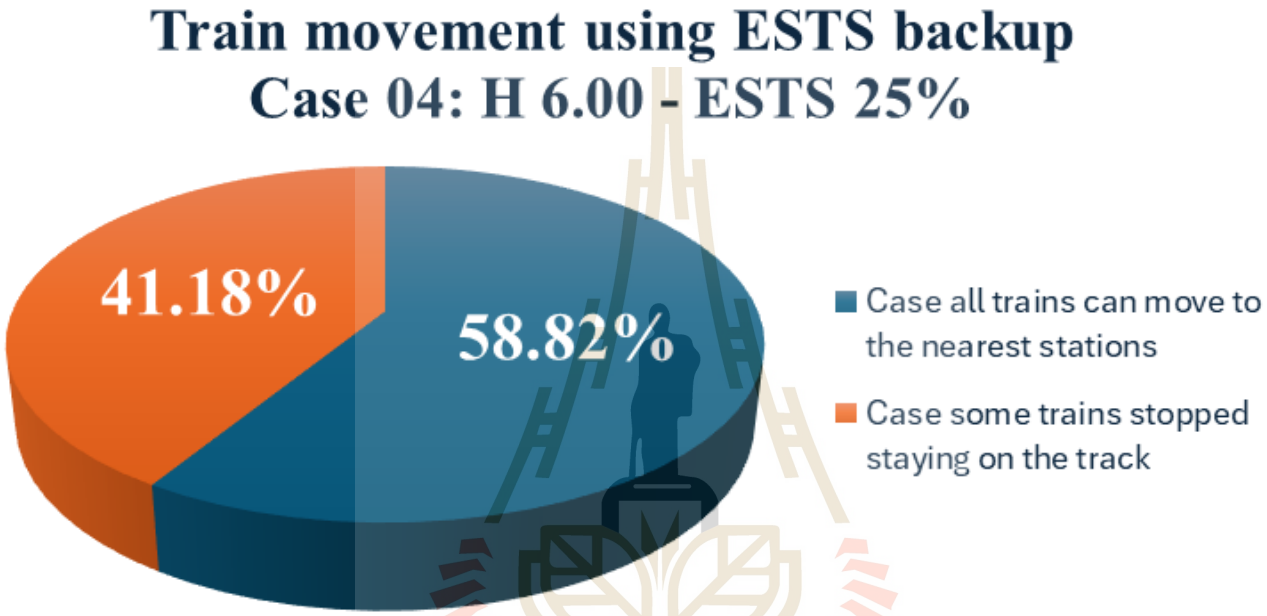
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	NO	33.46	19.26	25.11	20.58	90.12	82.84	1.78	2,399.06	607.94	
17	YES	27.76	18.60	23.61	19.22	90.46	85.77	1.29	1,739.00	620.79	
18	YES	44.85	14.00	26.53	21.64	92.82	77.00	1.75	2,366.75	617.87	-
19	YES	33.33	14.36	23.31	18.97	92.64	82.91	1.36	1,826.66	661.16	-
20	YES	42.05	16.91	28.43	23.32	91.33	78.44	1.88	2,537.09	656.57	-
21	YES	54.11	18.99	29.67	24.34	90.26	72.25	2.11	2,864.57	624.34	-
22	YES	34.55	10.02	19.94	16.51	94.86	82.28	1.94	2,627.53	659.92	-
23	NO	44.34	15.32	26.13	21.45	92.15	77.26	1.61	2,169.40	651.43	Train not at station: 7
24	YES	28.15	11.96	21.04	16.89	93.86	85.56	0.94	1,259.68	621.55	-
25	NO	49.81	14.49	26.61	21.78	92.57	74.46	1.66	2,247.21	642.04	Train not at station: 3 6 13
26	NO	30.85	4.58	15.75	12.97	97.65	84.18	2.21	2,997.57	647.93	Train not at station: 3 11 13
27	NO	28.76	12.10	17.97	14.69	93.79	85.25	1.34	1,800.59	659.29	Train not at station: 2 4 6 9 11
28	NO	13.55	5.11	8.52	7.09	97.38	93.05	1.09	1,466.83	667.62	Train not at station: 2 3 10 13
29	NO	11.65	0.00	3.10	2.62	100.00	94.03	0.88	1,175.52	0.00	Train not at station: 3 4 7 10 11 13 14
30	NO	19.25	0.00	4.81	4.06	100.00	90.13	0.77	1,035.30	0.00	Train not at station: 2 3 4 6 9 11 14

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบ Case 04 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 25% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
31	NO	10.87	0.00	4.35	3.67	100.00	94.43	0.88	1,175.52	0.00	Train not at station: 2 3 4 7 10 13 14
32	NO	5.33	0.00	2.08	1.75	100.00	97.27	0.94	1,265.16	0.00	Train not at station: 2 3 4 7 9 10 11 13 14
33	NO	13.07	0.00	3.27	2.75	100.00	93.30	0.88	1,175.52	0.00	Train not at station: 3 5 6 11 13 14
34	NO	4.77	0.00	2.35	1.98	100.00	97.56	0.88	1,175.52	0.00	Train not at station: 3 4 7 10 12 13

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ค.4 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบ Case 05 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 50%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	7.45	0.09	5.18	4.21	99.87	89.20	0.50	672.56	691.32	-
2	YES	30.31	10.76	19.04	15.28	84.40	56.07	0.87	1,200.00	611.97	-
3	NO	28.45	7.00	22.82	18.96	89.85	58.77	0.84	1,139.73	624.37	Train not at station: 7
4	YES	8.37	0.00	2.53	2.09	100.00	87.87	0.84	1,136.14	672.51	-
5	YES	33.93	14.25	24.65	20.01	79.35	50.82	0.84	1,144.84	652.46	-
6	YES	25.68	11.05	16.13	13.37	83.99	62.78	0.87	1,200.00	666.22	-
7	NO	15.17	0.00	6.53	5.42	100.00	78.02	0.84	1,136.14	665.72	Train not at station: 1
8	YES	33.95	8.49	19.67	16.33	87.69	50.80	0.86	1,200.00	691.50	-
9	YES	30.51	1.50	13.23	10.98	97.83	55.79	0.88	1,200.00	628.72	-
10	YES	1.92	0.00	0.82	0.69	100.00	97.21	0.84	1,136.14	0.00	-
11	NO	57.27	15.28	32.06	26.64	77.85	16.99	0.86	1,200.00	613.18	Train not at station: 3
12	YES	21.47	0.00	9.35	7.67	100.00	68.89	0.85	1,151.72	616.68	-
13	YES	11.25	3.25	7.25	5.85	95.29	83.69	0.84	1,136.14	622.46	-
14	NO	29.25	0.00	18.12	14.80	100.00	57.61	0.87	1,200.00	665.08	Train not at station: 1 3
15	YES	25.75	1.41	10.19	8.36	97.95	62.67	0.84	1,139.73	603.88	-

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบ Case 05 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 50% (ต่อ)

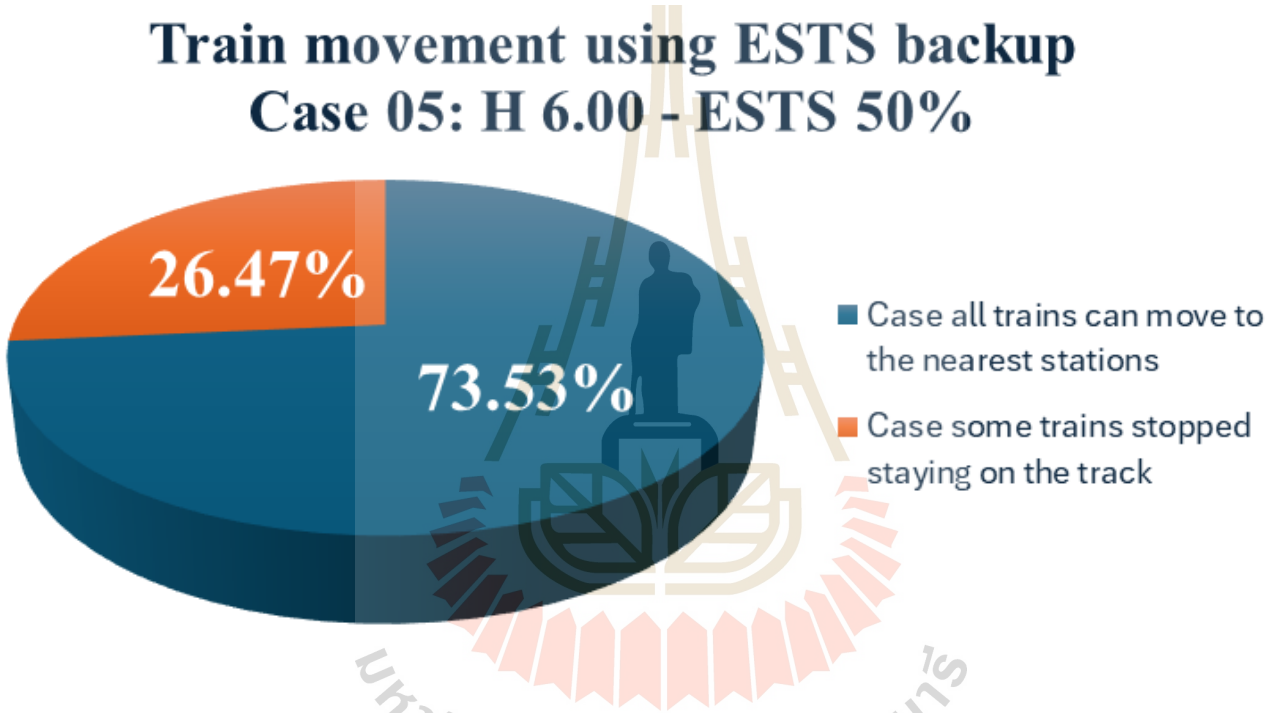
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	8.61	0.00	2.68	2.18	100.00	87.52	0.72	969.18	677.84	-
17	YES	57.24	15.53	36.00	29.97	77.50	17.04	0.84	1,136.14	692.65	-
18	YES	7.43	0.00	4.28	3.58	100.00	89.23	0.86	1,171.89	698.98	-
19	YES	19.17	2.87	11.20	9.09	95.84	72.22	0.88	1,200.00	613.90	-
20	YES	42.06	12.43	25.11	20.77	81.98	39.05	0.87	1,200.00	610.34	-
21	YES	12.59	0.00	6.11	5.11	100.00	81.76	0.88	1,200.00	628.72	-
22	YES	21.10	0.00	8.88	7.20	100.00	69.42	0.86	1,200.00	660.52	-
23	YES	57.27	7.19	34.09	28.33	89.58	16.99	0.84	1,136.14	651.37	-
24	YES	4.47	0.00	1.88	1.55	100.00	93.52	0.84	1,136.14	697.45	-
25	NO	19.78	7.90	13.48	11.02	88.56	71.33	0.86	1,200.00	611.28	Train not at station: 5
26	NO	27.66	0.00	13.44	10.95	100.00	59.91	0.85	1,151.72	626.03	Train not at station: 3
27	YES	7.44	0.28	5.29	4.30	99.59	89.21	0.52	695.86	689.57	-
28	YES	30.04	11.03	18.76	15.07	84.02	56.46	0.87	1,200.00	612.29	-
29	NO	29.51	7.80	23.19	19.26	88.70	57.23	0.84	1,139.73	624.62	Train not at station: 3
30	YES	8.08	0.00	2.48	2.05	100.00	88.29	0.84	1,136.14	675.17	-

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบ Case 05 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 50% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
31	YES	32.60	12.90	24.17	19.61	81.31	52.75	0.88	1,200.00	651.70	-
32	YES	26.16	11.88	16.76	13.89	82.78	62.09	0.87	1,200.00	670.73	-
33	NO	14.66	0.00	6.41	5.33	100.00	78.75	0.84	1,136.14	665.47	Train not at station: 5
34	YES	34.02	8.56	19.34	16.06	87.60	50.70	0.86	1,200.00	686.26	-

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ค.5 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบ Case 06 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 75%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	20.71	0.00	3.59	3.02	100.00	89.38	0.88	1,175.52	736.38	-
2	YES	19.79	2.66	13.01	10.73	98.64	89.85	0.95	1,275.45	666.07	-
3	YES	28.57	2.32	16.13	13.55	98.81	85.35	0.88	1,179.42	628.39	-
4	YES	7.66	0.00	1.71	1.43	100.00	96.07	0.88	1,175.52	700.28	-
5	YES	34.05	6.60	16.64	13.67	96.61	82.54	0.95	1,281.17	657.32	-
6	YES	22.88	2.79	10.94	9.22	98.57	88.27	0.94	1,267.12	0.00	-
7	NO	15.25	0.00	4.38	3.65	100.00	92.18	0.88	1,175.52	668.39	Train not at station: 1
8	YES	25.59	0.00	13.31	11.22	100.00	86.88	0.95	1,275.45	0.00	-
9	YES	20.09	1.52	8.94	7.53	99.22	89.70	0.94	1,267.12	632.87	-
10	YES	1.94	0.00	0.55	0.46	100.00	99.01	0.88	1,175.52	0.00	-
11	YES	57.52	6.60	22.71	19.07	96.61	70.50	0.95	1,281.17	701.82	-
12	YES	16.54	0.00	6.34	5.32	100.00	91.52	0.91	1,216.73	708.85	-
13	YES	11.32	0.00	4.99	4.17	100.00	94.20	0.88	1,175.52	699.27	-
14	YES	38.39	0.42	17.52	14.70	99.78	80.31	0.94	1,265.16	719.19	-
15	YES	19.41	0.28	6.92	5.80	99.85	90.05	0.94	1,267.12	720.32	-

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบ Case 06 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 75% (ต่อ)

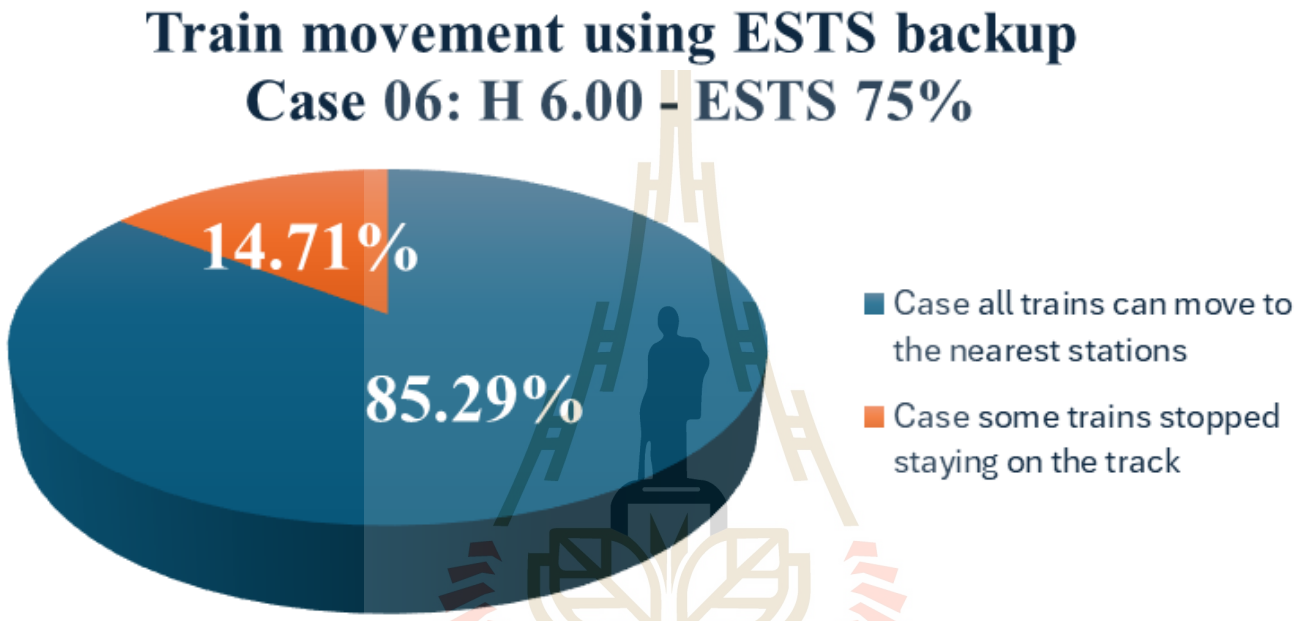
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	6.65	0.00	1.83	1.51	100.00	96.59	0.88	1,175.52	698.43	-
17	YES	29.84	15.60	24.22	20.37	92.00	84.70	0.88	1,175.52	725.14	-
18	YES	7.49	0.00	2.87	2.41	100.00	96.16	0.91	1,216.73	703.99	-
19	YES	18.17	2.84	7.65	6.37	98.55	90.68	0.93	1,254.48	666.41	-
20	YES	42.89	0.00	16.84	14.00	100.00	78.00	0.94	1,267.12	614.25	-
21	YES	12.58	0.00	4.11	3.46	100.00	93.55	0.94	1,267.12	0.00	-
22	YES	21.02	0.00	5.95	4.86	100.00	89.22	0.95	1,275.45	672.84	-
23	YES	35.07	6.99	22.93	19.23	96.41	82.02	0.88	1,175.52	671.66	-
24	YES	6.65	0.00	1.29	1.09	100.00	96.59	0.88	1,175.52	0.00	-
25	NO	18.13	4.81	9.15	7.61	97.53	90.70	0.95	1,281.17	616.72	Train not at station: 5
26	YES	23.14	0.00	11.29	9.44	100.00	88.13	0.94	1,267.12	620.82	-
27	YES	20.66	0.00	3.66	3.08	100.00	89.41	0.88	1,175.52	736.03	-
28	YES	20.24	2.72	12.79	10.55	98.60	89.62	0.95	1,275.45	666.10	-
29	NO	29.67	2.79	15.95	13.40	98.57	84.78	0.88	1,179.42	628.64	Train not at station: 1
30	YES	7.44	0.00	1.68	1.40	100.00	96.19	0.88	1,175.52	700.20	-

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบ Case 06 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 75% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
31	NO	16.07	5.84	10.52	8.79	97.00	91.76	0.95	1,281.17	656.53	Train not at station: 1 5
32	YES	23.14	3.35	11.38	9.59	98.28	88.13	0.94	1,267.12	0.00	-
33	NO	12.58	0.00	3.58	3.02	100.00	93.55	0.88	1,175.52	0.00	Train not at station: 1 5
34	YES	25.87	0.28	13.09	11.03	99.86	86.73	0.95	1,275.45	0.00	-

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ค.6 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 6 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบ Case 07 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 25%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	33.46	14.69	24.07	19.82	88.70	74.27	0.87	1,165.34	666.67	-
2	YES	8.04	2.78	5.41	4.52	97.86	93.82	0.89	1,205.10	687.51	-
3	NO	35.73	20.47	28.10	22.06	84.25	72.51	1.35	1,822.42	615.66	Train not at station: 6
4	YES	52.46	18.32	35.39	29.00	85.91	59.65	1.54	2,090.57	602.26	-
5	YES	14.27	7.21	10.74	8.76	94.45	89.02	0.93	1,254.72	633.10	-
6	NO	28.92	10.71	19.82	15.44	91.76	77.75	1.00	1,342.97	600.44	Train not at station: 2 5
7	NO	32.40	29.79	31.10	25.74	77.08	75.08	0.87	1,165.34	638.39	Train not at station: 2 5
8	NO	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	Train not at station: 6
9	NO	6.20	5.04	5.62	4.73	96.12	95.23	0.87	1,165.34	0.00	Train not at station: 2 3 5 6
10	NO	5.95	0.00	2.97	2.16	100.00	95.42	0.54	727.78	601.50	Train not at station: 2 3
11	NO	7.97	0.28	4.13	3.08	99.78	93.87	0.52	701.85	618.65	Train not at station: 3 6
12	NO	23.77	16.65	20.21	15.56	87.19	81.72	0.60	806.69	619.43	Train not at station: 3 6
13	YES	29.28	26.67	27.98	23.27	79.49	77.47	0.87	1,165.34	627.37	-
14	NO	14.62	0.00	7.31	5.86	100.00	88.75	1.34	1,818.24	600.55	Train not at station: 3 6
15	NO	38.28	33.38	35.83	28.59	74.32	70.56	1.20	1,624.70	620.65	Train not at station: 3

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบ Case 07 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 25% (ต่อ)

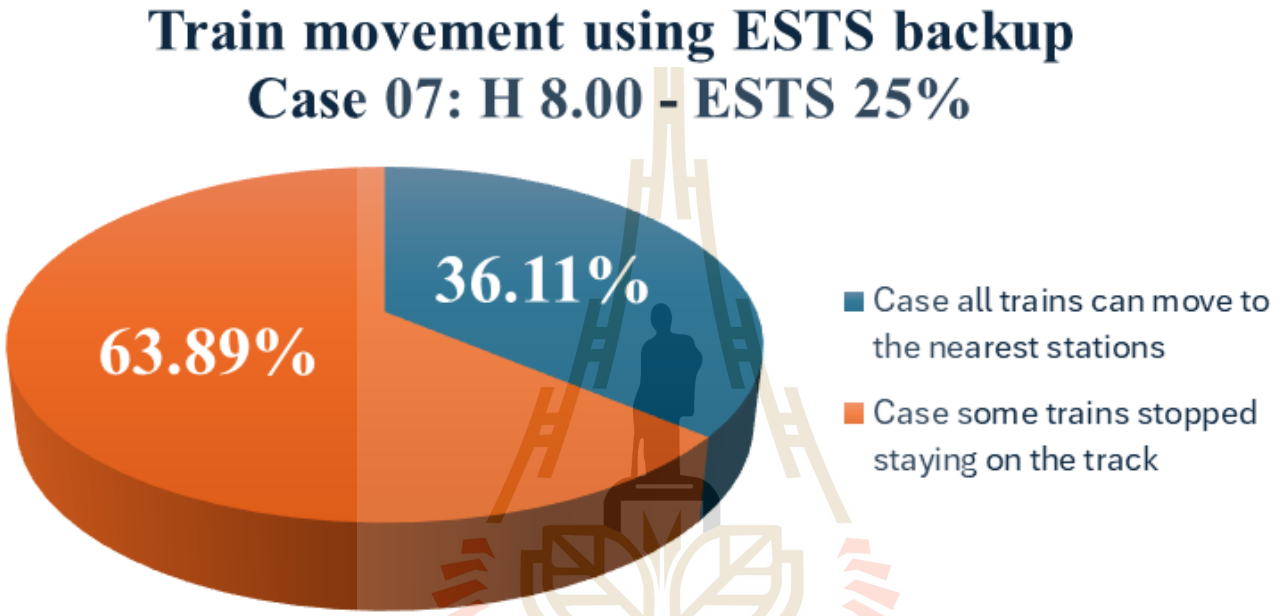
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	23.11	12.50	17.81	14.99	90.38	82.22	0.93	1,254.72	0.00	-
17	NO	30.95	10.07	20.51	16.77	92.25	76.19	1.25	1,684.78	613.48	Train not at station: 2
18	YES	11.74	7.00	9.37	7.87	94.62	90.97	0.94	1,262.92	734.69	-
19	YES	29.03	5.23	17.13	14.39	95.98	77.67	0.89	1,198.40	638.89	-
20	YES	25.55	16.64	21.10	16.60	87.20	80.34	0.87	1,165.34	630.88	-
21	NO	29.78	5.83	17.81	14.18	95.51	77.09	1.09	1,468.09	610.88	Train not at station: 2 3 5
22	NO	16.24	6.65	11.44	9.63	94.89	87.51	0.88	1,184.02	0.00	Train not at station: 5 6
23	NO	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	Train not at station: 2 3 5 6
24	NO	27.90	13.38	20.64	16.73	89.71	78.54	0.93	1,252.79	625.82	Train not at station: 2 5
25	NO	23.33	6.03	14.68	12.19	95.36	82.05	0.87	1,169.16	691.78	Train not at station: 3 6
26	YES	8.65	0.27	4.46	3.62	99.79	93.35	0.74	989.15	682.52	-
27	YES	33.99	14.79	24.39	20.07	88.62	73.85	0.87	1,165.34	667.45	-
28	YES	7.33	3.35	5.34	4.46	97.43	94.36	0.89	1,205.10	687.14	-
29	NO	37.08	20.09	28.59	22.45	84.55	71.47	1.54	2,087.91	617.18	Train not at station: 3
30	NO	52.02	17.66	34.84	28.52	86.41	59.99	1.52	2,068.33	609.96	Train not at station: 5

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบ Case 07 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 25% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
31	YES	14.24	7.01	10.63	8.65	94.61	89.04	0.93	1,254.72	629.06	-
32	NO	30.06	12.05	21.05	16.42	90.73	76.88	1.00	1,343.06	600.73	Train not at station: 2 5
33	NO	29.04	20.34	24.69	20.79	84.36	77.66	0.87	1,165.34	0.00	Train not at station: 2 5 6
34	NO	0.25	0.00	0.12	0.09	100.00	99.81	0.46	610.39	650.24	Train not at station: 3
35	NO	5.83	4.57	5.20	4.37	96.48	95.52	0.87	1,165.34	0.00	Train not at station: 2 3 5 6
36	NO	4.95	0.00	2.47	1.79	100.00	96.19	0.54	728.58	601.70	Train not at station: 2 5 6

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ค.7 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 25%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบ Case 08 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 50%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	NO	19.90	0.09	11.40	9.56	99.87	71.17	0.84	1,136.14	0.00	Train not at station: 1 5
2	NO	6.70	0.00	2.69	2.25	100.00	90.28	0.86	1,171.89	0.00	Train not at station: 1
3	YES	27.24	14.17	22.42	18.40	79.46	60.52	0.86	1,200.00	624.65	-
4	YES	32.81	17.44	23.77	19.60	74.73	52.45	0.84	1,136.14	659.12	-
5	YES	14.21	0.00	7.18	5.89	100.00	79.41	0.88	1,200.00	630.12	-
6	YES	24.41	11.16	19.84	16.05	83.82	64.63	0.87	1,200.00	621.72	-
7	NO	27.39	18.73	22.50	17.91	72.86	60.31	0.84	1,139.73	617.54	Train not at station: 1
8	YES	9.79	0.00	3.26	2.74	100.00	85.82	0.86	1,200.00	0.00	-
9	NO	10.34	4.55	6.64	5.57	93.40	85.02	0.84	1,136.14	0.00	Train not at station: 1 3 5
10	YES	5.92	1.16	3.28	2.48	98.32	91.42	0.84	1,136.14	599.03	-
11	YES	19.00	0.00	8.06	6.44	100.00	72.47	0.84	1,139.73	622.84	-
12	YES	27.61	17.78	21.21	17.28	74.23	59.99	0.85	1,151.72	647.09	-
13	YES	27.32	1.20	17.98	14.45	98.26	60.40	0.87	1,200.00	650.74	-
14	YES	25.49	0.00	11.34	9.40	100.00	63.06	0.87	1,200.00	705.13	-
15	NO	34.86	17.66	24.79	20.55	74.41	49.47	0.88	1,200.00	639.98	Train not at station: 3

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบ Case 08 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 50% (ต่อ)

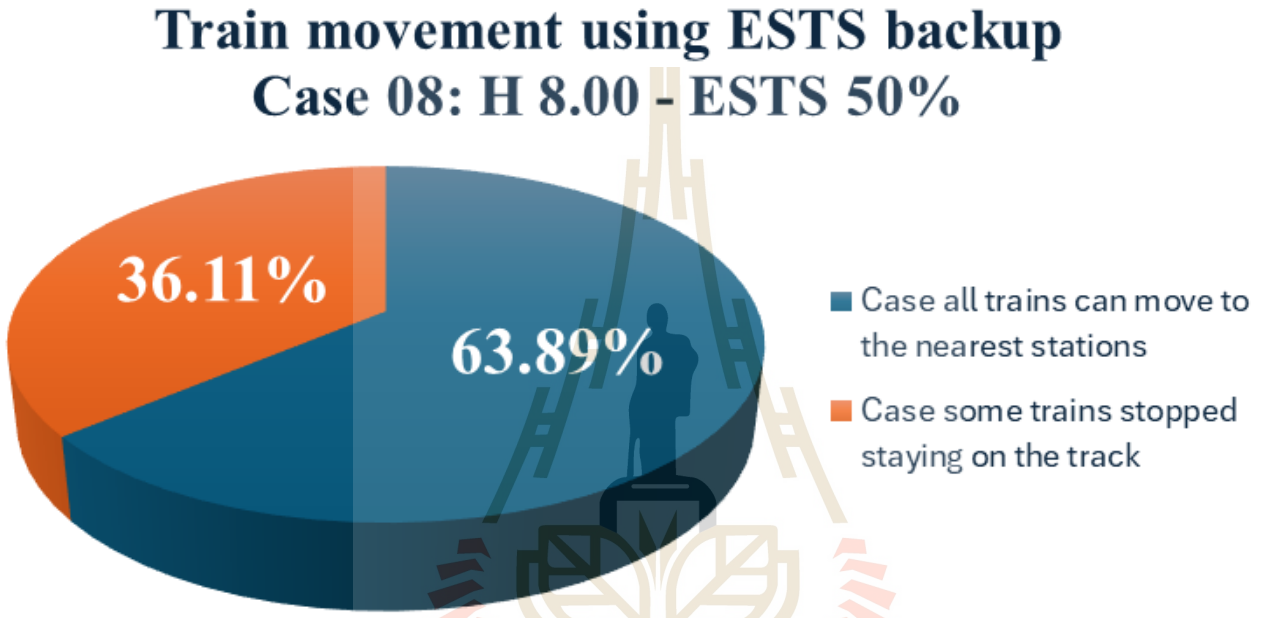
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	23.03	0.00	11.44	9.27	100.00	66.63	0.75	1,011.17	617.00	-
17	NO	17.01	6.17	12.47	10.33	91.06	75.34	0.84	1,136.14	614.81	Train not at station: 3
18	NO	6.70	0.00	2.33	1.95	100.00	90.28	0.86	1,171.89	0.00	Train not at station: 1 3
19	NO	20.28	0.28	9.74	8.16	99.59	70.62	0.84	1,136.14	690.27	Train not at station: 1
20	YES	25.46	1.08	14.37	11.59	98.44	63.11	0.84	1,136.14	616.67	-
21	NO	29.17	12.63	22.01	18.30	81.69	57.73	0.88	1,200.00	624.37	Train not at station: 1
22	YES	22.65	0.00	10.39	8.65	100.00	67.18	0.84	1,136.14	698.49	-
23	YES	33.31	0.00	19.49	15.75	100.00	51.72	0.76	1,032.18	652.46	-
24	YES	25.18	12.43	19.83	16.21	81.98	63.50	0.87	1,200.00	657.91	-
25	NO	20.70	0.00	10.99	8.78	100.00	69.99	0.84	1,139.73	627.49	Train not at station: 3
26	YES	8.92	0.00	3.05	2.55	100.00	87.08	0.86	1,200.00	629.68	-
27	NO	9.81	0.25	5.09	4.27	99.64	85.79	0.84	1,136.14	0.00	Train not at station: 1 5
28	YES	5.70	0.90	3.31	2.55	98.69	91.74	0.84	1,136.14	609.87	-
29	NO	21.47	17.17	19.27	15.34	75.11	68.89	0.84	1,139.73	616.22	Train not at station: 3
30	YES	34.35	17.59	23.27	18.74	74.51	50.21	0.85	1,151.72	611.58	-

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบ Case 08 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 50% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
31	YES	12.32	1.63	6.97	5.57	97.64	82.14	0.88	1,200.00	663.60	-
32	YES	25.21	11.99	20.80	17.14	82.62	63.46	0.87	1,200.00	633.74	-
33	YES	28.92	20.11	25.84	21.34	70.85	58.08	0.84	1,136.14	627.43	-
34	NO	0.28	0.00	0.09	0.08	100.00	99.60	0.52	695.86	0.00	Train not at station: 3
35	NO	24.33	5.79	14.87	12.36	91.60	64.74	0.84	1,136.14	614.48	Train not at station: 3 5
36	NO	6.27	0.00	2.45	2.05	100.00	90.91	0.86	1,171.89	0.00	Train not at station: 5

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ค.8 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 50%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบ Case 09 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 75%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	33.75	0.00	12.09	9.97	100.00	51.09	0.84	1,136.14	676.45	-
2	YES	6.06	0.00	2.68	2.18	100.00	91.22	0.84	1,136.14	688.79	-
3	YES	27.24	8.22	17.13	14.33	88.08	60.52	0.86	1,200.00	704.33	-
4	YES	29.72	11.52	17.68	14.45	83.31	56.93	0.85	1,151.72	666.25	-
5	YES	11.54	1.24	5.34	4.32	98.20	83.27	0.84	1,144.84	647.79	-
6	YES	24.49	11.16	15.39	12.87	83.82	64.50	0.87	1,200.00	633.33	-
7	NO	26.53	2.39	17.04	13.67	96.54	61.55	0.84	1,139.73	617.54	Train not at station: 1
8	YES	9.79	0.00	2.45	2.05	100.00	85.82	0.86	1,200.00	0.00	-
9	NO	24.41	4.55	13.38	11.13	93.40	64.63	0.84	1,136.14	614.81	Train not at station: 1
10	YES	6.70	0.00	2.71	2.27	100.00	90.28	0.86	1,171.89	0.00	-
11	YES	9.94	0.00	6.32	5.29	100.00	85.59	0.86	1,200.00	639.35	-
12	YES	25.46	5.40	16.39	13.74	92.18	63.11	0.85	1,151.72	0.00	-
13	YES	27.32	0.00	13.44	10.78	100.00	60.40	0.88	1,200.00	650.74	-
14	YES	13.98	0.00	8.61	7.21	100.00	79.74	0.87	1,200.00	724.90	-
15	YES	34.86	2.39	19.29	16.07	96.54	49.47	0.84	1,139.73	639.98	-

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบ Case 09 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 75% (ต่อ)

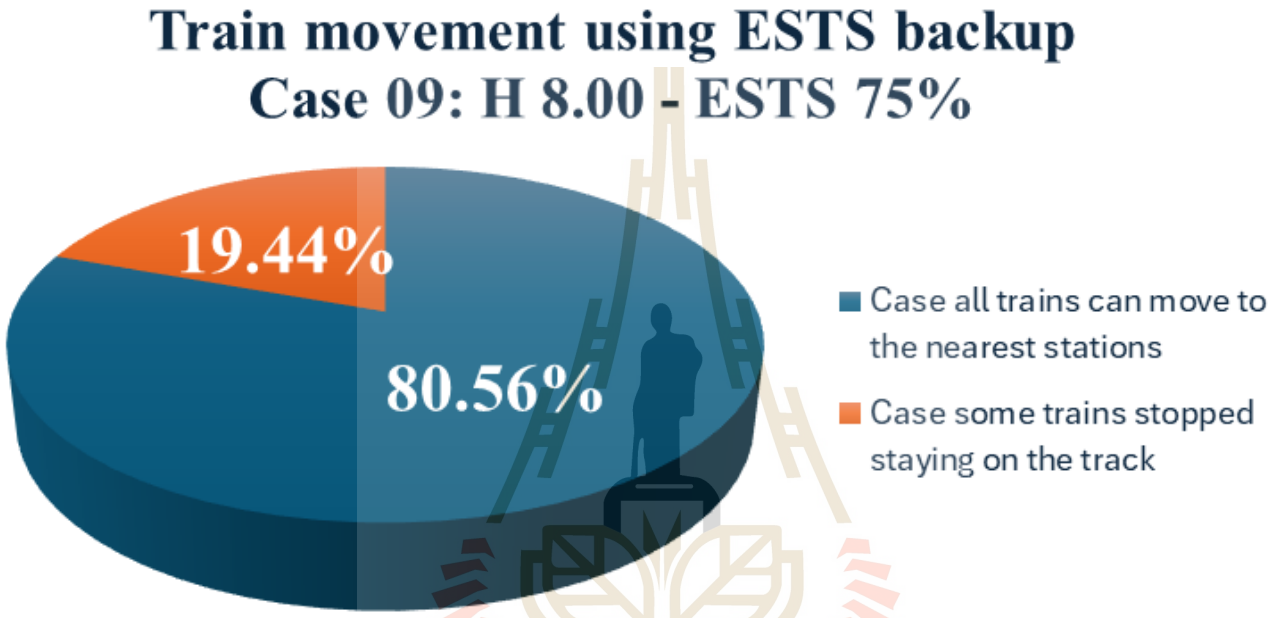
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	13.09	5.79	8.57	6.94	91.62	81.03	0.35	468.15	667.45	-
17	YES	23.00	6.17	11.97	9.96	91.06	66.67	0.84	1,136.14	690.21	-
18	YES	11.65	0.00	4.66	3.89	100.00	83.12	0.86	1,171.89	720.09	-
19	YES	28.12	0.28	8.52	7.07	99.59	59.25	0.84	1,136.14	676.69	-
20	YES	26.47	0.00	11.18	9.36	100.00	61.64	0.84	1,136.14	682.55	-
21	NO	27.99	1.25	16.42	13.61	98.18	59.43	0.88	1,200.00	619.78	Train not at station: 1
22	NO	11.85	0.00	4.75	3.86	100.00	82.83	0.84	1,136.14	663.04	Train not at station: 1 4
23	YES	29.68	4.77	15.16	12.72	93.08	56.99	0.88	1,200.00	0.00	-
24	NO	23.03	0.00	8.87	7.43	100.00	66.63	0.87	1,200.00	0.00	Train not at station: 1 4
25	YES	27.20	1.72	10.03	8.25	97.51	60.58	0.84	1,136.14	624.38	-
26	YES	8.92	0.00	2.30	1.93	100.00	87.08	0.86	1,200.00	0.00	-
27	YES	34.29	0.25	12.37	10.21	99.64	50.31	0.84	1,136.14	675.83	-
28	YES	5.48	0.00	2.62	2.13	100.00	92.06	0.84	1,136.14	688.10	-
29	YES	27.99	7.52	17.39	14.54	89.10	59.43	0.86	1,200.00	704.24	-
30	YES	29.58	11.27	17.73	14.50	83.66	57.13	0.85	1,151.72	666.25	-

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบ Case 09 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ $\%ESTS$ เท่ากับ 75% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
31	YES	11.75	1.13	5.30	4.28	98.37	82.97	0.88	1,200.00	648.08	-
32	YES	25.19	12.31	15.81	13.22	82.16	63.49	0.87	1,200.00	633.74	-
33	NO	26.01	2.77	16.73	13.43	95.98	62.31	0.84	1,139.73	616.96	Train not at station: 4
34	YES	8.92	0.00	2.30	1.93	100.00	87.08	0.86	1,200.00	0.00	-
35	NO	24.33	5.21	13.46	11.21	92.45	64.74	0.84	1,136.14	614.48	Train not at station: 4
36	YES	6.27	0.00	2.67	2.23	100.00	90.91	0.86	1,171.89	0.00	-

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ค.9 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี H = 8 นาที และ $\%ESTS$ = 75%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ง.1 การประชุมวิชาการ

Khemkladmuk, B., & Kulworawanichpong, T. (2021). Analysis of emergency self-traction system for mass rapid transit system. In *Proceedings of the 2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)* (pp. 207–210). Nakhon Ratchasima, Thailand, 20–22 October 2021

Khemkladmuk, B., & Kulworawanichpong, T. (2025). Emergency self-traction and energy sharing of mass rapid transit system. In *Proceedings of the 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)* (pp. 35–40). Chiang Mai, Thailand.

ง.2 วารสารวิชาการ

Khemkladmuk, B., Techawatcharapaikul, C., & Kulworawanichpong, T. (2026). Emergency power sharing by using a self-traction system in a mass rapid transit railway. *IET Energy Systems Integration, 8*, e70040. doi: 10.1049/esi2.70040

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)
October 20-22, 2021, Nakhon Ratchasima, THAILAND

Analysis of Emergency self-traction system for Mass Rapid Transit System

Banri Khemkladmuk[1] and Thanatchai Kulworawanichpong[2]
School of Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima 30000 Thailand
banrikhem1937@gmail.com[1] and thanatchai@gmail.com[2]

***Abstract*— The problem of power outages that occurs while a train is in service, causing many passengers to be stranded on the train and at the station as well as other serious consequences. The electric train system used in Thailand often encounters such problems. Therefore, this article proposes the simulation using the train movement and basic battery modelling calculation to estimate the energy consumption for energy storage system of the emergency self-traction system design. From the result, it was found that the simulation can calculate the energy consumption used in the electric trains.**

Keywords*— *Train movement, Energy Storage System (ESS), and Emergency Self-Traction System (ESTS)

I. INTRODUCTION

In the past few decades Mass Rapid Transit System (MRTS) has been continuously developed in Bangkok and its vicinities such as the Green Line BTS, MRT Blue Line, Airport Rail link, the BEM purple line, etc. that can be seen today. [1] These systems have many advantages such as system performance, ability to transport passengers, low maintenance costs, environmental friendliness, etc., which are very suitable features for use in this era [2].

The Mass Rapid Transit System relies on electric power to drive the electric train. It is therefore essential that the power supply network design is as safe and stable as possible. However, it is undeniable that any system can not avoid the failure of the system that may be caused by humans, natural disasters, or the system itself at all. As a result, there is a massive power outage in the MRTS, which made it impossible to maintain the train's operating status. When the train stops moving in the middle of the route many passengers are stranded on the train and at the station. In the worst-case scenario, the subway stops in a tunnel, causing panic among passengers and possibly other serious consequences. [3,4] In recent years, there have been frequent blackouts of electric trains such as the Light Green Line BTS, Airport Rail link, MRT Purple Line, etc. [5-7] As shown in Figure 1, this is a warning signal that indicates an urgent solution to this problem. For the safety of passengers, extending the life of the system, and improving system performance of the Mass Rapid Transit System are required.

This article focuses on studying how to install Emergency Self-Traction System (ESTS) for solving electric train stop in the event of a power outage, which will help ensure that the train moves to safe area with backup energy stored in the ESTS instead of receiving electricity from a normal external power supply. Energy Storage System (ESS) must be designed or chosen to suit the electric train during power outages. Therefore, the model of the electric train movement has been created to incorporate the ESS design into the ESTS.



Fig. 1. the Green Line BTS [8]

II. EMERGENCY SELF-TRACTION SYSTEM

ESTS is a system designed as a backup power supply installed on an electric train for feeding power to the propulsion system in the event of a train running in a non-electric zone or a power outage time. Normally, ETSE consists of three parts: the ESS (battery and super capacitor), a DC/DC converter and an ESTS control system. [2] In this article, only the battery is used as the ESS because the current battery technology is sufficient for recovering the regenerative braking energy and supplying the drive system during a power outage. Thus, the process of installing the equipment in the ESTS system is reduced, and its cost is reduced as well. [9] The bold line shown in Figure 2 represents the direction of power flow and the dashed line represents the direction of the control signal.

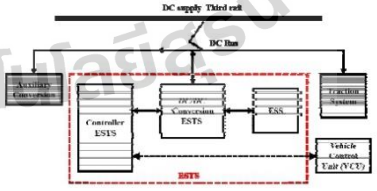


Fig. 2. Emergency self-traction system

2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)
October 20-22, 2021, Nakhon Ratchasima, THAILAND

TABLE I. CHARACTERISTICS OF ESSES UTILIZED IN RAILWAY SYSTEMS [10]

Technology	Gravimetric energy density (Wh/kg)	Gravimetric power density (W/kg)	Cycle efficiency (%)	Daily self-discharge (%)	Cycle life (cycles)
Flywheel	5–100	400–1500	90–95	100	>21,000
EDLC	5–15	5000–10,000	90–97	10–20	>100,000
Lead-acid	30–50	75–300	80–90	0.05–0.3	500–2,000
Ni-Cd	50–75	150–300	60–83	0.2–0.6	1,500–3,000
Ni-MH	54–120	200–1200	65–70	1–2	1,500–3,000
NaS	150–240	150–230	75–90	15–20	2,000–4,500
ZEBRA	100–120	150–200	90	10–15	>2,500
Li-ion	150–250	500–2000	90–98	0.1–0.3	1,000–10,000
VRFB	10–30	166	75–80	0–10	>16,000
HFC	800–10,000	5–800	20–50	Almost zero	>1,000
SMES	0.5–5	500–2000	94–97	10–15	>100,000

In ESTS operation, ESS is the key to providing renewable energy to the propulsion system in the case of external power system failure via a third rail. The energy stored in the ESS is supplied to the propulsion system through a DC/DC converter controlled by the ESTS control system and vehicle control unit (VCU) mounted on the electric train. In order to supply energy from the ESS to the appropriate voltage for the system, ESS charging will only occur while the electric train is braking or parked at a station when the external power supply is working normally.

III. ENERGY STORAGE SYSTEM

The selection of ESS is also very important to the operation of ESTS. Nowadays ESS is used in a wide variety of electric train applications such as electric double-layer capacitors (EDLC), batteries, and superconducting magnetic energy storage (SMES), etc. Each type of ESS has its advantages and disadvantages, working principles, and functions. Therefore, it is necessary to understand the basic ESS performance, as shown in the Table I. [10].

IV. THE TRAIN MOVEMENT MODEL

A. Train movement calculation

According to the above information, for any type of ESS installed in the electric train, the first thing to know is the energy that electric trains use to move during a power outage or disruption. Calculating this energy is based on Newton's second law, as in equation (1), when considering the various forces acting on the electric train, there are main forces such as rolling resistance force, aerodynamic drag force, and gradient force, as equation (2). Figure 3 shows the free body diagram of the electric train on the inclined path including the mentioned forces exerting on it [11].

$$TE - F_R = Meff\alpha \quad (1)$$

$$F_R = F_{RR} - F_D - F_G \quad (2)$$

where TE is tractive effort (N)
F_R is resistance forces (N)
F_{RR} is rolling resistance forces (N)
F_D is aerodynamic drag forces (N)
F_G is gradient forces (N)
a is the vehicle acceleration (m/s^2)
M_{eff} is effective mass (ton)

Based on the TE force obtained, it is possible to calculate the required power P and energy E as in equation (3) and (4), respectively [12].

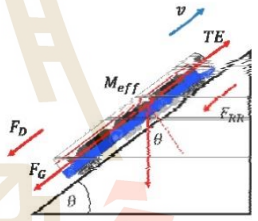


Fig. 3. free body diagram of the electric train

$$P = \frac{TE \times v}{\eta} \quad (3)$$

$$E = P \times t \quad (4)$$

where P is power consumed (kW)
v is train's speed (m/s)
η is over all transmission efficiency
E is energy consumed (kWh)
t is time (s)

The simulation requires improvements in the speed v and position s of the electric train as it moves in a time step Δt, which are calculated from equation (5) and (6).

$$v_t = v_i + \alpha\Delta t \quad (5)$$

$$s_t = s_i + v_i\Delta t + \frac{1}{2}\alpha\Delta t^2 \quad (6)$$

where v_t is terminal speed (m/s)
v_i is initial speed (m/s)

s_t is terminal position (m)
v_i is initial position (m)
Δt is difference between two time (s)

However, the calculation in equation (1) - (6) are based on the train's motion that consists of four modes: accelerating mode, constant speed mode, coasting mode, and braking mode [13] as shown in Figure 4. Train operation mode depends on the technology and model used to control electric train.

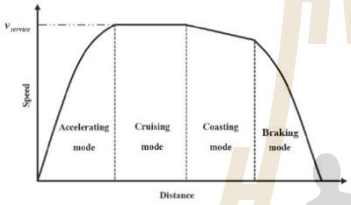


Fig. 4. The electric train's speed control modes

Normally, the electric train's movement starts from acceleration mode to increase its speed from the initial speed to the specified maximum speed ($v_{service}$) with the acceleration $\alpha > 0$. When the speed is equal to the maximum speed the electric train will operate in constant speed or cruising speed mode to maintain the speed within the maximum speed range with acceleration $\alpha = 0$. The train enter coasting mode when it reaches the specified coasting position. In coating mode, the train movement solely relies on the inertia force $TE = 0$. Finally the system switches to braking mode when approaching the passenger station with acceleration $\alpha < 0$.

B. Battery calculation

The battery ESS is now widely used in electric train systems around the world due to its high energy storage efficiency, compact size, relevant parameters control, and it is secured through the Battery manage system (BMS). The ESS study here chose a simplified model of the battery in a case study, which is calculated from equation (7) - (11). [14]

$$I_d = \frac{P}{V_{B,i}} \quad (7)$$

$$V_{B,i} = R_{B,i} \times (I_{B,i} - I_d) \quad (8)$$

$$E_{B,t} = E_{B,i} - (V_{B,t} \times I_d \times \Delta t) \quad (9)$$

$$I_{B,t} = \frac{E_{B,t}}{V_{B,t} \times \Delta t} \quad (10)$$

$$R_{B,t} = \frac{V_{B,t}}{I_{B,t}} \quad (11)$$

where I_d is battery current rate (A)
$I_{B,i}$ is initial battery current (A)
$I_{B,t}$ is terminal battery current (A)
$R_{B,i}$ is initial battery resistance (Ω)
$R_{B,t}$ is terminal battery resistance (Ω)
$V_{B,i}$ is initial battery voltage (V)
$V_{B,t}$ is terminal battery voltage (V)
$E_{B,i}$ is initial battery energy (kWh)
$E_{B,t}$ is terminal battery energy (kWh)

The two parts of the calculation are taken to create a combined model. Thus, it is possible to find various parameters that occur during the train movement of the system.

V. SIMULATION RESULT

The train movement simulation in the case of a power outage was done to solve the energy consumption (E) needed for the propulsion system. E will be used for analysis of the system operation and to select the size of the ESS in ESTS installed on the electric train. The conditions used to simulate the movement of electric trains are defined in Table II.

TABLE II. PARAMETERS OF ELECTRIC TRAINS USED IN THE SIMULATION

Specific data	Information
Movement features	
- max. speed	80 km/h
- max. acceleration	0.5 m/s^2
- max. deceleration	0.5 m/s^2
- route distance	1200 m
Electricity	
- battery capacity	180 kWh
- voltage level	750 VDC
- max. traction effort	80 kN
- aux. power	270 kW
Weight	
- tare weight	100 ton
- passenger mass factor	1.3
Efficiencies	70 %
Station	2 stations

The simulation used MATLAB/M-file to solve the motion of the electric train that runs between 2 stations with a distance of 1200 meters. The test cases are divided into 5 levels of service speed: 15 - 55 km/h without bringing all resistances into the calculation. For comparison, the energy consumption results of the simulation are shown in Table III.

TABLE III. COMPARISON OF THE SOLUTION

No.	Service speed (km/h)	Remain E (kWh)	t (min)
1	15	166.67	4.95
2	25	169.71	3.09
3	35	171.35	2.39
4	45	172.82	1.96
5	55	174.27	1.75

From the above table, the remaining energy of the 180 kWh battery during the travelling on the determined route at different speeds is shown in Figure 5. It was found that energy consumption increased with speed in first 200 m. On the contrary, after 200 m energy consumed by the electric train decreased with speed. Therefore, when the electric train runs at lower speed, the system consumes less energy in a short distance. But if the running route

has a longer distance, the electric train running at higher speed consumes less energy than running at lower as shown in Figure 6. The difference of energy consumption in a short distance may not be noticeable; however the difference is clearly seen when the travelling time is longer as shown Figure 7.

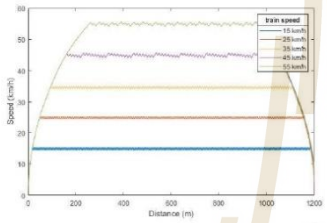


Fig. 5. The electric train's speed - distance

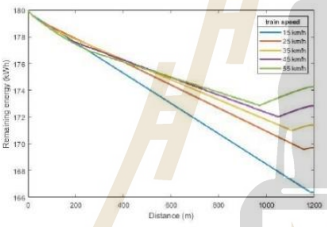


Fig. 6. The battery's remaining energy

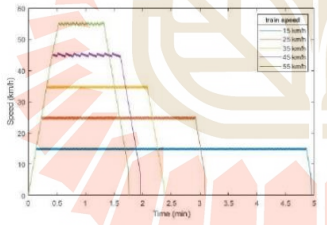


Fig. 7. The electric train's speed - time

VI. CONCLUSION

This paper used the electric train movement and basic battery calculation to help estimate the energy consumption for the battery of ESS used in ESTS design, it was found that the simulation could calculate the energy required for electric trains to travel at different service speed condition from 15 - 55 km/h effectively. It was found that the amount of energy used increases with speed in the case of the train travelling in a short distance. On the contrary, the train consumes more energy at a lower speed for long-distance travelling. From the results above, it can be concluded that the battery installed in this ETSE must have a size of at least 20 kWh in size. In addition, it can simulate battery charging with a regenerative braking system.

In the future, other relevant condition such as add more longer distance, add more station, gradient etc. will be used to make the calculated energy value more accurate and closer to the actual system.

REFERENCES

[1] S. Tripyakaisorn, "How did Thailand develop the public transportation systems?," Executive Journal., vol.31, No. 4, pp. 55-58, 2011.

[2] D. Yuan, S. Gu, J. Liu, Y. Zhang, and C. Lv, "Design and analysis of emergency self-traction system for urban rail transit vehicles," International Conference on Electrical and Control Engineering 2012, vol.16, p. 585–591, 2012.

[3] N. Chovančíkováa and Z. Dvořáka, "Effect of a power failure on rail transport," 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport (TRANSCOM 2019), vol.40, p. 1289–1296, May 2019.

[4] H. H. Alhelou, M. E. H. Golshan, T. C. Njenda, and S. Pierluigi, "A Survey on Power System Blackout and Cascading Events Research Motivations and Challenges," Energies., vol.12, No. 4, pp. 1-28, 2019.

[5] Exclusive experience "BTS power outage" without explanation!: PPTVHD36, 24 November 2017. Available online: https://www.pptvhd36.com/news/padenron/70276 (accessed on 3 June 2021).

[6] Airport link power outage on middle route, no light - no air!: Kapook hilight, 22 December 2017. Available online: https://hilight.kapook.com/view/165617 (accessed on 3 June 2021).

[7] People flooded at the Bang Yai-Tao Poon train station, lost 1 hour after power outage.: Khaosod online, 3 September 2018. Available online: https://www.khaosod.co.th/breaking-news/news_1527328 (accessed on 3 June 2021).

[8] Green line train today!: Infoquest, 9 June 2021. Available online: https://www.infoquest.co.th/tag/Green line train (accessed on 10 June 2021).

[9] G. Rechard and R. Gouttefangeas, "Recovering energy from train braking for traction and grid use," World Engineers Summit – Applied Energy Symposium & Forum: Low Carbon Cities & Urban Energy Joint Conference (WES-CUE 2017), p.61-66, 19–21 July 2017, .

[10] X. Liu and K. Li, "Energy storage devices in electrified railway systems: A review," Transportation Safety and Environment 2020, Vol. 2, No. 3, p. 183–201, 2020.

[11] T. Kulworawanichpong, "Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method," Journal of Modern Transportation. pp 1-11. doi:10.1007/s40534-015-0086-y, September 2015.

[12] M. Miyoshi, T. Takeba, and M. Miyatake, "Development of an Energy Efficient Train Traffic Control System for saving Electricity," Computers in Railways (COMPRAIL 2012), vol. XIII, pp. 499-510, Sept 2012.

[13] T. Kulworawanichpong, "Optimising AC electric railway power flow with power electronic control", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, November 2003.

[14] J. Bauman and M. Kazerani, "A Comparative Study of Fuel-Cell–Battery, Fuel-Cell–Ultracapacitor, and Fuel-Cell–Battery–Ultracapacitor Vehicles," IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY., vol.57, No. 2, pp. 760-769, 2008.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่

การขับเคลื่อนตัวเองและการแบ่งปันพลังงานในกรณีฉุกเฉินของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

Emergency Self-Traction and Energy Sharing of Mass Rapid Transit System

บัณริ เข็มกลัดมุกด์[1,2] และ ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์[1]*

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี banrikhem1937@gmail.com thanath@usut.ac.th*
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม banri.k@msu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวคิดการแบ่งปันพลังงานสำหรับระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน วัตถุประสงค์หลักคือการลดจำนวนหน่วยระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินที่จำเป็น โดยเปิดใช้งานการแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถที่ติดตั้งระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินกับขบวนรถที่ไม่มีการติดตั้ง ขณะเดียวกันยังต้องมั่นใจได้ว่าขบวนรถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถนำส่งผู้โดยสารไปยังสถานีหรือจุดจอดรถไฟที่ใกล้ที่สุดได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพระหว่างเกิดไฟฟ้าดับ การศึกษานี้ใช้รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลมในประเทศไทยเป็นกรณีศึกษา เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของแนวคิดนี้ โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ระยะทางระหว่างขบวนรถและสถานี รายละเอียดจำเพาะของขบวนรถ และปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสามารถให้พลังงานสำรองแก่ขบวนรถที่ติดตั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพและแบ่งปันพลังงานส่วนเกินให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่นๆ ที่ไม่มีการติดตั้งในรัศมีการแบ่งปันด้วยอัตราความสำเร็จที่มากถึง 72.41% ซึ่งเน้นย้ำถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ระบบนี้และสนับสนุนการพัฒนาระบบขนส่งที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพมากขึ้น แม้ว่าจะมีข้อจำกัดบางประการก็ตาม

คำสำคัญ: ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน, ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน, ไฟฟ้าดับ, การแบ่งปันพลังงาน

Abstract

This paper introduces the concept of energy sharing for Emergency Self-Traction Systems (ESTS) in mass rapid transit systems. The main objective is to reduce the number of ESTS units required by enabling energy sharing between trains equipped with ESTS and trains without equipped, while ensuring that all electric trains can safely and efficiently evacuate passengers to the nearest station or train stop during power outages. This study examines the BTS Silom Line in Thailand to evaluate the feasibility of this concept, considering various factors including the number of trains equipped with ESTS, distances between trains and stations, specific train characteristics, and other relevant parameters. The results demonstrate that ESTS can effectively provide backup power to equipped trains and share surplus energy with other non-equipped trains within the sharing radius, achieving a success rate of 72.41%. This emphasizes the feasibility of implementing this system and contributes to the development of more sustainable and efficient mass rapid transit systems.

Keywords: Mass Rapid Transit Systems, Emergency Self-Traction Systems, Power Outage, Energy-Sharing

1. บทนำ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Mass Rapid Transit Systems – MRTS) ได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนในเมืองใหญ่ ด้วยประสิทธิภาพในการขนส่งผู้โดยสารจำนวนมากได้อย่างตรงเวลา ปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [1] อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่ยังคงเป็นความท้าทายคือการรับมือกับสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยเฉพาะเหตุการณ์ไฟฟ้าดับที่เกิดจากอุปกรณ์ชำรุดหรือการบำรุงรักษาที่ไม่เพียงพอ ซึ่งส่งผลให้เกิดการหยุดรถไฟกลางทาง อันนำไปสู่การเกิดความมืด ความแออัด และการระบายอากาศที่ไม่เพียงพอภายในขบวนรถ โดยสภาวะการณ์เหล่านี้ล้วนสร้างความไม่พอใจและความไม่มั่นใจให้กับผู้โดยสาร [2]

บทความนี้ได้นำเสนอแนวคิดการนำระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน (Emergency Self-Traction System – ESTS) มาติดตั้งบนขบวนรถ เพื่ออาศัยพลังงานจากระบบนี้ในการจ่ายไฟให้กับระบบสำคัญบนขบวนรถ เช่น ไฟส่องสว่าง เครื่องปรับอากาศ ระบบสื่อสาร เป็นต้น รวมถึงสามารถขับเคลื่อนขบวนรถไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดได้ในระดับความเร็วที่จำกัด [3] อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดด้านต้นทุน การบำรุงรักษา และน้ำหนักของอุปกรณ์ยังเป็นอุปสรรคต่อการติดตั้งระบบนี้ในรถไฟทุกขบวน ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีข้อเสนอให้ใช้แนวคิดการแบ่งปันพลังงานจากขบวนที่มีการติดตั้ง ESTS ไปยังขบวนที่ไม่มี เพื่อให้ทั้งระบบสามารถรับมือกับสถานการณ์ฉุกเฉินได้โดยไม่ต้องติดตั้งระบบในทุกขบวน ทั้งนี้ บทความได้จำลองสถานการณ์หลายรอบเพื่อประเมินความเป็นไปได้ของแนวทางนี้และเสนอข้อคิดเห็นสำหรับการวิจัยและพัฒนาต่อไป

2. การแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถไฟด้วย ESTS

ความปลอดภัยและความต่อเนื่องของการให้บริการเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่แหล่งจ่ายไฟขัดข้องขณะที่ขบวนรถไฟกำลังวิ่งอยู่บนเส้นทาง ซึ่งอาจทำให้

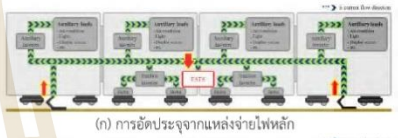
*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

เกิดความไม่สะดวกและความเสี่ยงต่อความปลอดภัยของผู้โดยสารจากการหยุดนิ่งกลางทางของขบวนรถ ประเด็นการพัฒนาระบบสำรองพลังงานสำหรับป้องกันปัญหาดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพื้นที่ข้างทางในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ไม่ว่าจะเป็นบนทางยกระดับหรือในอุโมงค์ใต้ดิน มีพื้นที่จำกัดและคับแคบ การติดตั้งระบบสำรองพลังงานจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานบนขบวนรถไฟ (On-board Energy Storage Devices – ESD) จึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความสนใจ ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน (Emergency Self-Traction System – ESTS) ถือเป็นระบบที่ตอบโจทย์ในแง่ของพื้นที่ติดตั้งและความสามารถในการขับเคลื่อนตัวเองด้วยพลังงานสำรองแม้ในกรณีไฟฟ้าดับ

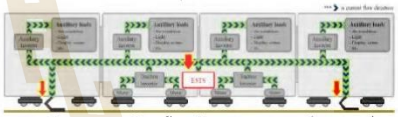
อย่างไรก็ตาม เนื่องจากต้นทุนอุปกรณ์ใน ESTS ที่สูง ทำให้การติดตั้งระบบนี้ให้กับรถไฟทุกขบวนจึงเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ บทความนี้จึงนำเสนอแนวคิดการแบ่งปันพลังงาน (Energy Sharing) จากขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS ไปยังขบวนที่ไม่มีการติดตั้งผ่านรางตัวนำหรือสายส่งเหนือศีรษะที่ถูกตัดไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟหลักขณะเกิดไฟดับ เพื่อลดจำนวนอุปกรณ์ ESTS ที่จำเป็นในระบบในขณะที่รถไฟทุกขบวนยังสามารถรับพลังงานจากขบวนอื่นที่ติดตั้ง ESTS เพื่อเคลื่อนที่นำส่งผู้โดยสารไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดได้อย่างปลอดภัย แม้จะไม่มี ESTS ติดตั้งในขบวนรถของตนเองก็ตาม แนวคิดดังกล่าวได้รับการประเมินผ่านการจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลองทางไฟฟ้าและเงื่อนไขจริงของระบบรถไฟฟ้า

ESTS ที่ถูกนำมาใช้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมีองค์ประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (ESD) ตัวแปลงพลังงานสองทิศทาง และหน่วยควบคุม [4] ระบบจะเริ่มการทำงานเมื่อถูกสั่งการด้วยมือจากเจ้าหน้าที่ขับรถไฟบนขบวนหรือทำงานแบบอัตโนมัติหลังจากที่หน่วยควบคุมตรวจจับได้ว่าขาดการรับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟหลัก จากนั้นหน่วยนี้จะประมวลผลและส่งคำสั่งไปยังตัวแปลงพลังงานสองทิศทาง เพื่อดึงพลังงานที่กักเก็บไว้ใน ESD โดยอิงตามสภาพการทำงานของขบวนรถในขณะนั้น [3 – 4] โดยปกติ ESD มักออกแบบให้มีความจุที่เพียงพอสำหรับสำรองไฟเฉพาะระบบไฟฟ้าบางประเภทให้ยังคงทำงานต่อไปได้ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในขณะที่รอการช่วยเหลือเท่านั้น เช่น แสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ ประตู เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ด้วยเทคโนโลยี ESD ที่พัฒนาขึ้นอย่างมากในปัจจุบัน บางระบบอาจถูกออกแบบให้มีความสามารถในการเก็บพลังงานได้มากพอที่จะขับเคลื่อนรถไฟให้สามารถอพยพผู้โดยสารไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดก่อนที่ระบบจะหยุดทำงานโดยสมบูรณ์ได้

ภาพประกอบต่อไปนี้นำเสนอภาพรวมการทำงานของ ESTS และแนวทางการแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถไฟในกรณีไฟฟ้าขัดข้อง [5] โดยเริ่มจาก รูปที่ 1 แสดงการอัดประจุ ESTS ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟหลักทำงานภายใต้สภาวะปกติ ซึ่งสามารถอัดประจุได้จากสองแหล่ง ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟหลักและพลังงานย้อนกลับจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Braking) รูปที่ 2 แสดงการคายประจุ ESTS ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟหลักทำงานใต้สภาวะปกติ เพื่อการช่วยประหยัดพลังงานที่จำเป็นต้องจ่ายจากแหล่งจ่ายไฟหลัก รูปที่ 3 แสดงการคายประจุ ESTS ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟหลักเกิดขัดข้อง โดย ESTS จะจ่ายพลังงานสำรองให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ บนขบวนรถ รวมถึงขับเคลื่อนรถไฟให้เคลื่อนที่ไปยังสถานีที่ปลอดภัย รูปที่ 4 แสดงการคายประจุที่เหลือใน ESTS ไปยังรถไฟขบวนอื่น ๆ ขณะที่แหล่งจ่ายไฟหลักยังทำงานทำงานขัดข้องตามแนวคิดที่เสนอในบทความนี้ และ รูปที่ 5 อธิบายแนวคิดการทำงานของ ESTS สำหรับจ่ายพลังงานสำรองให้กับตนเองและการแบ่งปันพลังงานที่เหลือไปยังรถไฟขบวนอื่นผ่านรางตัวนำหรือสายส่งเหนือศีรษะ เพื่อให้สามารถขับเคลื่อนรถไฟขบวนอื่นให้เคลื่อนที่ไปยังสถานีที่ปลอดภัย



(ก) การอัดประจุจากแหล่งจ่ายไฟหลัก



(ข) การอัดประจุจากพลังงานย้อนกลับจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ

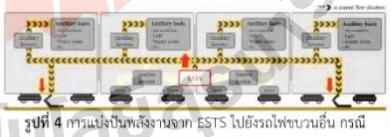
รูปที่ 1 การอัดประจุ ESTS กรณีแหล่งจ่ายไฟหลักทำงานปกติ



รูปที่ 2 การอัดประจุ ESTS กรณีแหล่งจ่ายไฟหลักทำงานปกติ



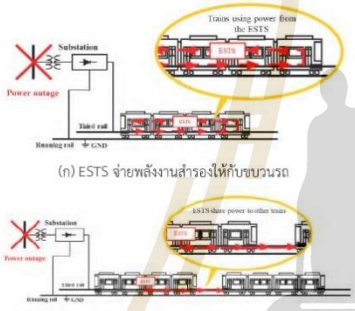
รูปที่ 3 การจ่ายพลังงานสำรองให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ บนขบวนรถที่ติดตั้ง ESTS กรณีแหล่งจ่ายไฟหลักเกิดขัดข้อง



รูปที่ 4 การแบ่งปันพลังงานจาก ESTS ไปยังรถไฟขบวนอื่น กรณีแหล่งจ่ายไฟหลักเกิดขัดข้อง

การแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถไฟในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นแนวคิดที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการพลังงาน โดยเฉพาะ

อย่างยิ่งในกรณีฉุกเฉินที่เกิดไฟฟ้าขัดข้อง รถไฟที่ติดตั้ง ESTS จะจ่ายพลังงานสำรองให้กับตนเองเพื่อเคลื่อนย้ายผู้โดยสารไปยังสถานีใกล้ที่สุด จากนั้นจึงเข้าสู่การแบ่งพลังงานเพื่อจ่ายไฟให้รถไฟขบวนอื่นที่ไม่มี ESTS ผ่านรางตัวนำหรือสายส่งเหนือศีรษะ จนกระทั่งรถไฟทุกขบวนสามารถเคลื่อนถึงสถานีและอพยพผู้โดยสารทุกคนอย่างปลอดภัย ระบบจะหยุดทำงานเพื่อรอคำสั่งใหม่หรือการกู้คืนระบบจ่ายไฟหลักให้กลับมาเป็นปกติ ทั้งนี้การแบ่งปันพลังงานต้องอาศัยระยะห่างระหว่างรถไฟที่เหมาะสมและพลังงานสำรองที่เพียงพอ เพื่อให้การแบ่งพลังงานมีประสิทธิภาพและเกิดผลสำริดสูงสุด



(ก) ESTS จ่ายพลังงานสำรองให้กับขบวนรถ

(ข) ETST แบ่งปันพลังงานให้กับรถขบวนอื่น

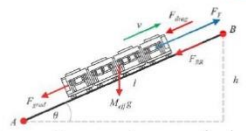
รูปที่ 5 หลักการแบ่งปันพลังงานโดยใช้ ESTS

3. แบบจำลองการแบ่งปันพลังงานของ ESTS

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการใช้แนวคิดการแบ่งปันพลังงานโดยใช้ ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จะใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แบบจำลองนี้ประกอบด้วยการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน การทำงานของระบบจ่ายไฟ และการคำนวณ ESTS อย่างง่าย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ

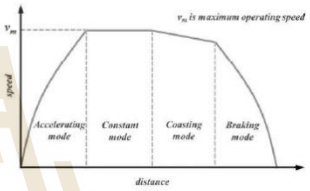
การคำนวณการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟต้องพิจารณาแรงต่าง ๆ ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน ดังสมการที่ (1) โดยใช้แผนภาพอิสระของแรงลัพธ์ (Free-Body Diagram) ในการอธิบาย ดังรูปที่ 6 ขบวนรถไฟที่มีค่าประสิทธิผลของน้ำหนัก (M_{eff}) จะเริ่มเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง (α) เมื่อแรงฉุด (F_T) มีค่ามากกว่าแรงต้าน (F_R) ประกอบด้วยแรงเกรเดียนต์ (F_{grad}) แรงต้านอากาศ (F_{drag}) และแรงเสียดทานจากการหมุนกลิ้งบนรางเหล็ก (F_{RR}) โดยทั่วไปแรงเหล่านี้จะคำนวณจากค่าทดสอบของผู้ผลิตขบวนรถไฟ และใช้สมการความเร็วของรถไฟ (v) ร่วมกับสัมประสิทธิ์เดวิส คือ A B และ C ซึ่งมีหน่วยเป็น kN kNh/km และ kNh²/km² ตามลำดับ จะเรียกสมการนี้ว่าสมการเดวิส์ (Davis Equation) ดังสมการที่ (2) [6 – 7]



รูปที่ 6 แผนภาพอิสระของการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟ

$$F_T - T_R = M_{eff}\alpha \quad (1)$$

$$T_R = A + Bv + Cv^2 \quad (2)$$



รูปที่ 7 โหมดการทำงานของขบวนรถไฟ

แรงที่กระทำต่อขบวนรถไฟมีผลโดยตรงต่อการควบคุมลักษณะการเคลื่อนที่และความเร็วของรถไฟ ดังนั้นการจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟจึงต้องรวมแรงเหล่านี้ไว้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด โดยทั่วไป การเคลื่อนที่ของรถไฟสามารถแบ่งออกเป็น 4 โหมดหลัก ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว (Accelerating Mode) โหมดความเร็วคงที่ (Cruising Mode) โหมดไหลเฉื่อยหรือการแล่น (Coasting Mode) และโหมดเบรก (Braking Mode) ดังรูปที่ 7 ตลอดช่วงการเคลื่อนที่ ความเร็วและตำแหน่งของรถไฟจะถูกอัปเดต ดังสมการที่ (3 – 4) โดยที่ v_i และ v_f แทนค่าความเร็วของรถไฟก่อนและหลังการอัปเดต ขณะที่ s_i และ s_f แทนตำแหน่งของรถไฟก่อนและหลังการอัปเดต โดยมี Δt เป็นช่วงเวลาแต่ละรอบการคำนวณ ในงานการศึกษานี้กำหนดให้ใช้ค่า Δt เท่ากับ 0.01 วินาที

$$v_f = v_i + \alpha\Delta t \quad (3)$$

$$s_f = s_i + v_i\Delta t + \frac{1}{2}\alpha\Delta t^2 \quad (4)$$

ประเด็นหลักของการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟเพื่อวิเคราะห์การแบ่งปันพลังงานโดยใช้ ESTS คือการคำนวณพลังงานที่ใช้ไปของรถไฟ (E_T) โดยที่ $E_{T,i}$ และ $E_{T,f}$ แสดงถึงการใช้พลังงานก่อนและหลังการอัปเดตตามลำดับ การอัปเดตนี้ต้องอาศัยค่ากำลังของรถไฟ (P_T) ที่ประกอบด้วยกำลังขับเคลื่อน (P_{tr}) กำลังงานเสริม (P_{aux}) และกำลังย้อนกลับจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ (P_{reg}) โดยที่ P_{tr} ขึ้นอยู่ F_T v และประสิทธิภาพ (η) ของรถไฟในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลของมอเตอร์ขับเคลื่อน ส่วน P_{aux} ขึ้นอยู่กับโหลดต่างๆ บนขบวนรถ เช่น ไฟส่องสว่าง เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5 – 7)

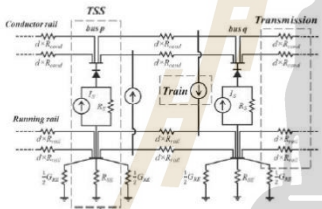
$$E_T = E_T + P_T \Delta t \quad (5)$$

$$P_T = P_m + P_{aux} + P_{reg} \quad (6)$$

$$P_T = \begin{cases} P_m = \frac{F_T}{\eta} \times v, \quad P_{reg} = 0 & ;\text{if } F_T \geq 0 \\ P_m = 0, \quad P_{reg} = F_T \eta \times v & ;\text{if } F_T < 0 \end{cases} \quad (7)$$

3.2 แบบจำลองการทำงานของระบบจ่ายไฟ

สถานีจ่ายไฟย่อยจะถูกจำลองในรูปของแบบจำลองวงจรสมมูลนอร์ตัน (Norton's Equivalent Circuit) ที่มีแหล่งจ่ายกระแสลัดวงจร I_S และความต้านทานลัดวงจร R_S โดยสถานีจ่ายไฟย่อยนี้จะเชื่อมต่อกับรางตัวนำผ่านไดโอดอุดมคติและเชื่อมต่อกับรางวิ่งที่ที่มีความต้านทานลงดิน R_{SE} แบบจำลองดังกล่าวช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการจ่ายไฟของสถานีจ่ายไฟย่อยได้อย่างแม่นยำ [7] ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แบบจำลองระบบจ่ายไฟ

เนื่องจากระบบจ่ายไฟกระแสตรงในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีความซับซ้อนสูง การวิเคราะห์การไหลพลังงานจึงต้องใช้เทคนิคการคำนวณที่เหมาะสม บทความนี้เลือกใช้วิธีการฉีดกระแส (Current Injection Method - CIM) ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของบัสต่างๆ ภายในระบบ กระบวนการวิเคราะห์เริ่มจากการกำหนดแรงดันเริ่มต้นที่แต่ละบัสเป็นค่าพิกัดและจัดทำสมการการวิเคราะห์โนดด้วยเมตริกซ์การนำไฟฟ้า $[G]$ และเมตริกซ์กระแส $[I]$ ดังสมการ (8) ในขั้นตอนนี้จะมีการรวมกระแสจากสถานีจ่ายไฟย่อยกับกระแสรถไฟ (I_T) ที่คำนวณมาจากผลหารของ P_T ต่อแรงดัน (V_T) ที่ตกคร่อมตัวนำกับรางวิ่ง ณ ตำแหน่งบัสที่รถไฟกำลังวิ่งอยู่ จากพารามิเตอร์ข้างต้น แบบจำลองจะดำเนินการแก้สมการเพื่อหาค่าผลเฉลยของเมตริกซ์แรงดัน $[V]$ ในแต่ละบัสของระบบ การคำนวณจะทำซ้ำจนกว่าค่าคลาดเคลื่อนของแรงดันในแต่ละบัสจะมีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้

$$[I] = [G][V] \quad (8)$$

3.3 แบบจำลองการคำนวณ ESTS อย่างง่าย

การจำลอง ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟสามารถดำเนินการได้โดยใช้แบบจำลองแบตเตอรี่แบบง่ายที่มีการอ้างอิงหลักการของวงจรสมมูลนอร์ตัน (Norton Equivalent Circuit) โดยพารามิเตอร์หลักของแบบจำลองประกอบด้วย I_{ESTS} คือ กระแสของ ESTS R_{ESTS} คือ ความต้านทานภายใน ESTS V_{ESTS} คือ แรงดันของ ESTS P_{ESTS} คือ กำลังของ ESTS E_{ESTS} คือ พลังงานที่สามารถใช้ได้จาก ESTS I_d คือ กระแสโหลด η คือ ประสิทธิภาพของโหลด และ SOC คือ ค่าสถานะการชาร์จแทนสัดส่วนพลังงานคงเหลือของ ESTS ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ตามสมการ (9 – 15) แบบจำลองนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์การทำงานของระบบ ESTS เพื่อประเมินความสามารถในการจ่ายพลังงานเบื้องต้นได้อย่างแม่นยำและเป็นระบบ [8]

$$I_{ESTS} = \frac{E_{ESTS}}{V_{ESTS} \times 3600} \quad (9)$$

$$R_{ESTS} = \frac{V_{ESTS}}{I_{ESTS}} \quad (10)$$

$$I_d = \frac{P_T}{V_{ESTS}} \quad (11)$$

$$V_{ESTS} = R_{ESTS} \times (I_{ESTS} - I_d) \quad (12)$$

$$P_{ESTS} = V_{ESTS} \times I_d \quad (13)$$

$$E_{ESTS} = \frac{P_{ESTS} \times I_{ESTS}}{\eta} \quad (14)$$

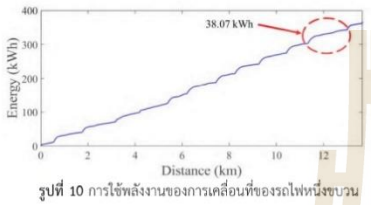
$$SOC = \frac{E_{ESTS}}{E_{Rate}} \times 100 \quad (15)$$

4. แบบจำลองการแบ่งปันพลังงานของ ESTS

แนวคิดการแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถไฟด้วย ESTS ได้รับการวิเคราะห์ผ่านกรณีศึกษาของรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม ประเทศไทย โดยระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายนี้มีระยะทางการให้บริการรวมทั้งหมด 13.65 กิโลเมตร ประกอบด้วยสถานีผู้โดยสารจำนวน 14 แห่งและสถานีจ่ายไฟย่อยจำนวน 7 แห่งที่กระจายตัวตลอดเส้นทาง ดังรูปที่ 9 การจำลองระบบได้ถูกดำเนินการด้วยโซฟต์แวร์ MATLAB/m-file เพื่อคำนวณลักษณะการเคลื่อนที่และการใช้พลังงานของรถไฟแต่ละ ดังรูปที่ 10 ข้อมูลพลังงานที่ได้จากการจำลองมีความสำคัญต่อการประเมินความจุของ ESTS ที่เหมาะสมกับระบบ เพื่อให้การเลือกใช้ ESTS มีขนาดที่เพียงพอสำหรับการสำรองไฟให้กับขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS และรถไฟขบวนอื่นที่ไม่ติดตั้งอย่างน้อยหนึ่งขบวนเมื่อเกิดสถานการณ์ไฟดับ ดังนั้น การทดสอบนี้จะนำไปสู่การพิสูจน์ความเป็นไปได้ของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถไฟด้วย ESTS ตามที่ได้นำเสนอข้างต้น



รูปที่ 9 สถานีตลอดเส้นทางการให้บริการรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม

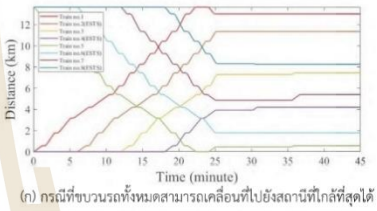


รูปที่ 10 การใช้พลังงานของการเคลื่อนที่ของรถไฟหนึ่งขบวน

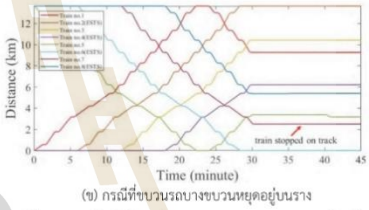
จากผลการจำลองในรูปที่ 10 พบว่าการใช้พลังงานของรถไฟในแต่ละช่วงเส้นทางมีผลต่อการออกแบบความจุของ ESTS โดยช่วงที่ใช้พลังงานสูงสุดคือระหว่างสถานี S10 กับ S11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้องและรถไฟหยุดกลางเส้นทางระหว่างสถานีดังกล่าว ESTS จะต้องสำรองไฟให้กับรถไฟมากที่สุดเท่ากับ 19 kWh ต่อขบวน ดังนั้น การออกแบบ ESTS หนึ่งระบบต้องมีความสามารถในการสำรองพลังงานทั้งหมด 38 kWh เพื่อรองรับการขับเคลื่อนรถไฟ 2 ขบวน ทั้งที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบ เมื่อกำหนดให้จำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีรถไฟ 8 ขบวน วิ่งบริการด้วยช่วงเวลาห่างกันทุก 6 นาที และจอดพักที่สถานีละ 20 วินาที สำหรับ ESTS จะเริ่มจ่ายพลังงานหลังเกิดไฟดับ 5 นาที และสามารถแบ่งปันพลังงานให้รถไฟขบวนอื่นได้ในรัศมีไม่เกิน 3.5 กม. หากระยะเกินกำหนดหรือพลังงานไม่เพียงพอ จะมีการสลับให้ ESTS จากขบวนอื่นมารับหน้าที่แทนเพื่อให้การบริการมีความต่อเนื่อง

จากผลการสุ่มจำลองสถานการณ์ไฟดับโดยทุก ๆ 1 นาทีหลังจากรถไฟทั้งหมดเข้าสู่เส้นทางบริการทั้งหมด 29 ครั้ง พบว่า รถไฟทุกขบวนสามารถอพยพไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ 21 ครั้ง และยังมีรถไฟบางขบวนตกค้าง 8 ครั้ง ซึ่งคิดเป็นอัตราความสำเร็จทั้งหมด 72.41% ผลลัพธ์นี้สนับสนุนว่าแนวคิดการแบ่งปันพลังงานสามารถลดความเสี่ยงการหยุดชะงักในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนได้อย่างมีนัยสำคัญ แม้จะไม่ได้มีการติดตั้ง ESTS ให้กับรถไฟทุกขบวนก็ตาม ตัวอย่างผลการทดสอบแสดงได้ดังต่อไปนี้

รูปที่ 11 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ไฟดับ โดยในกรณี (a) ไฟดับนาทีที่ 25 ESTS ช่วยให้ขบวน 4 และ 8 เคลื่อนที่ จากนั้นแบ่งพลังงานให้ขบวน 3, 5 และ 7 ส่วนในกรณี (b) ไฟดับนาทีที่ 30 ESTS ขบวน 8 เคลื่อนที่และแบ่งพลังงานให้ขบวน 5 แต่ขบวน 7 ต้องหยุดเนื่องจากไม่มี ESTS ในระยะใกล้ ต่อมารูปที่ 12 แสดงการวิเคราะห์การใช้พลังงานสำรองจาก ESTS ที่ติดตั้งในรถไฟฟ้าแต่ละขบวนภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกัน ในส่วน (a) เป็นกรณีที่รถไฟทุกขบวนสามารถเคลื่อนที่ไปจอดที่สถานีใกล้เคียงได้สำเร็จ ระบบแสดงการทำงานของการแบ่งปันพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดย ESTS บนรถไฟฟ้าขบวน 4 ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานให้กับขบวน 7 ESTS บนขบวน 6 แบ่งปันพลังงานแก่ขบวน 5 และ ESTS บนขบวน 8 แบ่งปันพลังงานแก่ขบวน 3 ซึ่งยืนยันว่าระบบสามารถดำเนินการตามวัตถุประสงค์ที่ออกแบบไว้ได้ ในทางตรงกันข้าม ส่วน (b) เป็นกรณีที่ยังมีรถไฟบางขบวนต้องหยุดนิ่งบนเส้นทางการให้บริการ ซึ่งแสดงให้เห็นข้อจำกัดการแบ่งปันพลังงานของ ESTS โดยมีเพียง ESTS บนรถไฟฟ้าขบวน 8 เท่านั้นที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานให้กับขบวน 5 ขณะที่ ESTS บนขบวนอื่นไม่ได้มีการใช้พลังงานสำรองแต่อย่างใด การวิเคราะห์ทั้งสองกรณีเผยให้เห็นข้อมูลสำคัญว่า ESTS ของรถไฟแต่ละขบวนมีการใช้พลังงานภายในระบบไม่ถึงครึ่งหนึ่งของความจุทั้งหมด

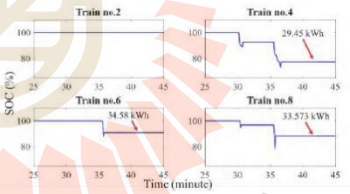


(ก) กรณีที่ขบวนรถทั้งหมดสามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดได้

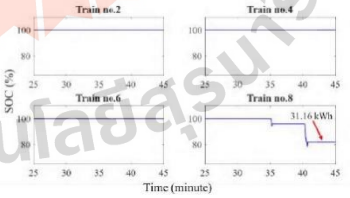


(ข) กรณีที่ขบวนรถบางขบวนหยุดอยู่บนราง

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและเวลาของการเคลื่อนที่ของขบวนรถในระหว่างที่ไฟฟ้าดับ



(ก) กรณีที่ขบวนรถทั้งหมดสามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดได้



(ข) กรณีที่ขบวนรถบางขบวนหยุดอยู่บนราง

รูปที่ 12 การใช้พลังงานของแต่ละ ESTS

5. สรุป

การศึกษานี้นำเสนอแนวคิดการแบ่งปันพลังงานด้วย ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เพื่อลดจำนวนจำนวนหน่วยติดตั้ง ESTS ที่จำเป็นผ่านกลไกการแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถที่ติดตั้ง ESTS กับขบวนรถที่ไม่มีการติดตั้งระหว่างเกิดสถานการณ์ไฟฟ้าดับ แทนการติดตั้ง ESTS ให้กับรถไฟทุกขบวน ผลการทดสอบจากกรณีศึกษารถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลมแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถบรรลุอัตราความสำเร็จในการแบ่งปันพลังงาน 72.41% ซึ่งทำให้รถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถเดินทางไปถึงสถานีได้หลังเกิดเหตุการณ์ไฟดับ ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพเชิงปฏิบัติของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานในการเสริมสร้างความมั่นคงและลดความเสี่ยงด้านการหยุดชะงักของระบบขนส่งมวลชนอย่างมีนัยสำคัญ อันนำไปสู่การสร้างแนวทางใหม่สำหรับการพัฒนาระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพและความยั่งยืนในระยะยาว นอกจากนี้ การศึกษาในบทความนี้ยังสามารถต่อยอดได้หลากหลายมิติ เช่น ศึกษาการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานต่อสมรรถนะของระบบ การประยุกต์ใช้อุปกรณ์กักเก็บพลังงานแบบไฮบริดในระบบ เป็นต้น ทั้งหมดนี้มุ่งสนับสนุนการนำ ESTS ไปประยุกต์ใช้จริงในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

เอกสารอ้างอิง

[1] E. Ratnawati, "MRT as an alternative transportation solution which is environmentally friendly and traffic jam free in Jakarta," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 819, no. 1, July 2021, Article no. 012040, doi:10.1088/1755-1315/819/1/012040.

[2] M. Eltved, N. Breyer, J. B. Ingvardson, and O. A. Nielsen, "Impacts of long-term service disruptions on passenger travel behaviour: A smart card analysis from the Greater Copenhagen area," in Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University 2021, Aalborg, Denmark, 2021, pp. 1–6.

[3] X. Xu, X. Sun, Q. Zhou, X. Jiang, D. Hu, and R. He, "Design and research on the function of lithium-ion batteries emergency traction system for rail vehicles," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 12, December 2018, Article no. 1687814018812296, doi:10.1177/16878140188-12296.

[4] D. Yuan, S. Gu, J. Liu, Y. Zhang, and C. Lv, "Design and analysis of emergency self-traction system for urban rail transit vehicles," *Energy Procedia*, vol. 16, pp. 585–591, 2012, doi:10.1016/j.egypro.2012.01.094.

[5] Y. Nagaura, R. Oishi, M. Shimada, and T. Kaneko, "Battery-powered drive systems: Latest technologies and outlook," *Hitachi Review*, vol. 66, no. 2, pp. 138–144, 2017.

[6] T. Kulworawanichpong, "Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton–Raphson method," *Journal of Modern Transportation*, vol. 23, pp. 241–251, 2015, doi:10.1007/s40534-015-0086-y.

[7] K. Mongkoldee, U. Leeton, and T. Kulworawanichpong, "Single train movement modelling and simulation with rail potential consideration," in Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Sapporo, Japan, October 11–13, 2016, pp. 7–12, doi:10.1109/SII.2016.7843967.

[8] M. F. Robbins, *Ultimate Electronics: Practical Circuit Design and Analysis*, CircuitLab, Inc., 2019. [Online]. Available: https://ultimateelectronicsbook.com/. Accessed: June 29, 2024.



บัณริ เข็มกลัดมุกต์ ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เกิดเมื่อวันที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2537 ณ จังหวัดคานางาวะ ประเทศญี่ปุ่น สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2563 ตามลำดับ ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก ณ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ความสนใจในการวิจัยของเขาครอบคลุมด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ระบบขนส่งทางราง ยานยนต์ไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงาน และพลังงานหมุนเวียน



ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา มีความเชี่ยวชาญด้านระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ระบบการอาณัติสัญญาณรถไฟ และการวิเคราะห์คุณภาพพลังงานในระบบขนส่งทางราง เคยมีประสบการณ์ในการวิจัยร่วมกับหน่วยงานภาครัฐและเอกชนทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ มีผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและระบบรางอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาหลักสูตรระดับบัณฑิตศึกษา และให้คำปรึกษาโครงการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบขนส่งมวลชนอีกด้วย

IET Energy Systems Integration

WILEY

天津大学 Tianjin University | IET The Institution of Engineering and Technology

ORIGINAL RESEARCH OPEN ACCESS

Emergency Power Sharing by Using a Self-Traction System in a Mass Rapid Transit Railway

Banri Khemkladmuk[1] | Chanchai Techawatcharapaikul[2] | Thanatchai Kulworawanichpong[1]

[1]School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand | [2]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

Correspondence: Thanatchai Kulworawanichpong (thanatchai@gmail.com)

Received: 24 March 2025 | **Revised:** 24 February 2026 | **Accepted:** 8 March 2026

Keywords: energy consumption | energy management systems | load flow

ABSTRACT

Systemwide traction power outages in mass rapid transit systems (MRTSs) can cause trains to stop between stations, leading to service disruption and urgent passenger evacuation requirements. Onboard emergency self-traction systems (ESTSs) can mitigate this risk by enabling a stranded train to reach the nearest station at low speed. However, installing and maintaining ESTS on every train can increase implementation and lifecycle costs, motivating approaches that can ensure evacuation with partial ESTS deployment. This article introduces a power-sharing framework for ESTS in an MRTS. The primary aim is to reduce the number of ESTS units needed by facilitating power sharing between trains equipped with ESTS and those without it, while guaranteeing that all trains can safely and quickly evacuate passengers to the nearest station during a systemwide power outage. This study examines the Bangkok Mass Transit System (BTS) Skytrain Silom Line (dark green line) in Thailand, through computer simulation parameterised by real-world line and operational data, to evaluate the viability of this concept. It analyses variables such as the quantity of trains outfitted with ESTS, the distance from the train to the station where it halted, particular train specifications and additional pertinent aspects. The results reveal that ESTS can efficiently provide backup power to equipped trains and share surplus energy with other trains within the sharing radius with a success rate of 72.41%. This underscores the viability of ESTS operations and aids in the advancement of a more sustainable and efficient MRTS, despite the inherent constraints of ESTS.

1 | Introduction

Over the past decades, mass rapid transit systems (MRTSs) have demonstrated their intrinsic value through exceptionally operational performance [1]. The systems can transport many passengers quickly and efficiently, ensuring punctuality, safety through reliable control and monitoring systems, environmental friendliness by producing zero emissions and more. These performances make MRTS a crucial mechanism that contributes significantly to urban development and enhances the quality of life for individuals in society, especially in large metropolitan areas that face severe traffic congestion issues [2]. However, although the implementation of MRTS appears to primarily yield positive impacts, resolving and protecting emergency scenarios remains a significant challenge in providing MRTS services [3]. Particularly, inadequate maintenance or malfunctioning equipment can lead to power outages in the system. Power outages frequently lead to mid-route train halts, which can cause passenger discomfort due to darkness, overcrowding and poor ventilation [4, 5]. These have cascading effects on passenger safety, satisfaction and confidence in the reliability of MRTS [6]. Although most modern MRTS use various strategies to manage external factors, they may not be sufficient to ensure the system's safety during large-scale power outages. Therefore,

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

© 2026 The Author(s). *IET Energy Systems Integration* published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of The Institution of Engineering and Technology and Tianjin University.

a long-term solution to this problem requires investment in improving the electrical infrastructure, regular preventive maintenance and training of employees to effectively handle emergency situations [7, 8].

The emergency self-traction system (ESTS) has been proposed as a promising concept to address this challenge in MRTS. In general terms, ESTS equips trains with onboard high-capacity energy storage devices (ESDs), such as batteries or other energy storage technologies, to store reserve energy during normal operation. When the main power supply fails, the stored energy can be used to provide emergency traction so that the train can continue moving at a reduced speed until it reaches the nearest station, while also supporting essential onboard services such as lighting, ventilation and communication systems. As reported in previous studies, ESTS and related emergency traction schemes can significantly enhance passenger safety and service continuity by avoiding train stops in the middle of the track and by enabling controlled evacuation at platforms [9–15]. At the same time, practical implementation of onboard emergency systems faces several obstacles, including additional investment costs, vehicle space constraints, integration with existing traction equipment and the need for appropriate operational strategies and staff training [16]. Consequently, many existing MRTS lines either lack ESTS entirely or deploy it only on a limited number of trains, which may lead to situations where trains without ESTS remain stranded during a power outage, even though some ESTS-equipped trains still possess unused backup power.

Motivated by the above discussion, the main contributions of this article are threefold. Firstly, this article builds upon previous research on individual-train emergency self-traction systems [9–15], energy-efficiency enhancement through ESS [16–20] and multi-train coordination for energy conservation [21, 22]. This work proposes a network-level ESTS power-sharing concept whereby ESTS-equipped trains serve as a shared backup energy resource to assist nonequipped trains. The concept aims to reduce the requirement for ESTS installation while preserving the ability of all trains to reach the nearest stations for passenger evacuation during a systemwide power outage. Secondly, the feasibility of this proposed concept is studied using an integrated simulation that combines multi-train dynamics, a power network model and a simplified ESTS model representation to quantify evacuation outcomes and backup energy utilisation under network constraints. Thirdly, a BTS Skytrain Silom Line case study is used to demonstrate evacuation performance and system-level utilisation of installed backup energy. Overall, this study consolidates and extends existing directions towards evacuation-oriented, coordinated ESTS operation at the network level, as summarised in Table 1.

Based on the above discussion, this paper is organised as follows: Section 1 provides the introduction and background to the problem, including a review of existing ESTS and ESS applications in MRTS. Section 2 explains the fundamental operating principles of ESTS and the concept of power sharing between trains. Section 3 presents the modelling framework. Section 4 describes the simulation setup and the case study based on the BTS Skytrain Silom Line and reports the numerical results for various power-outage scenarios with and without power sharing. Section 5 concludes the main findings of this research, discusses the practical implications for MRTS operators and gives directions for future work.

2 | ESTS Power-Sharing Concept

Comprehending the fundamental concepts of the ESTS and the notion of power sharing among trains is crucial for facilitating the transfer of stored energy from one train's ESTS to others, so enabling them to go to the nearest station during emergencies, such as widespread power outages. The detailed explanation is as follows.

2.1 | Emergency Self-Traction System

The ESTS is implemented to prevent sudden shutdowns of trains during systemwide power outages. This system provides backup power to specific electrical systems such as lighting, air conditioning and doors, allowing them to continue operating for a short period, ensuring passenger safety by providing air to breathe and preventing passengers from being trapped inside the train while waiting for rescue. Additionally, some systems have the capacity to store sufficient or excess energy to safely propel trains for passenger evacuation to the nearest station before the MRTS completely shuts down [13, 14]. The operation of the ESTS consists of three main components: the ESD, the bidirectional power converter and the control unit [15]. The ESTS initiates operation when the main control system of the MRTS sends a command to the ESTS controller unit. This device subsequently processes and transmits a command to the bidirectional power converter on board the trains, instructing it to either charge or discharge energy into or from the ESD according to the current operating conditions of the MRTS.

The ESTS is designed to support MRTS operation under both normal mains power-supply conditions and systemwide power-outage conditions, and it performs different functions under each condition [23]. Under normal conditions, the bidirectional converter charges the onboard ESD either from the main traction power supply or from regenerative braking, as illustrated in Figure 1a–1b. In addition, some ESTS configurations can dispatch the stored energy during train departure/acceleration to reduce net energy drawn from the supply, operating on a similar principle to conventional ESS-based regenerative-energy utilisation for energy saving, as illustrated in Figure 2 [16–20]. Under power-outage conditions, the ESTS discharges the ESD to provide low-speed self-traction so that the train can reach the nearest station; during this process, the ESD may be partially recharged via regenerative braking, although the recovered energy is relatively limited due to the low operating speed, as illustrated in Figure 3. Furthermore, the ESTS configuration considered in this study is designed to share power with nearby

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040, By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

TABLE 1 | Summary of related work on ESTS and ESS applications in MRTS.

References	Main contribution
[9]	Proposes a highly reliable propulsion architecture with an onboard UPS for ride-through of power disturbances, including topology and control.
[10]	Provides a comprehensive survey of emergency self-running power supply schemes for rail transit vehicles.
[11]	Models and estimates train traction characteristics under emergency traction considering onboard energy storage devices.
[12]	Designs and investigates lithium-ion-battery-based emergency traction functions for rail vehicles.
[13]	Develops functional operation for emergency train running using battery application within traction power supply systems.
[14]	Provides design and analysis of an emergency self-traction system for urban rail transit vehicles.
[15]	Analyses and optimises control strategies for battery-based emergency traction in urban rail vehicles.
[16]	Compares stationary versus onboard ESS for reducing energy consumption in metro networks.
[17]	Proposes energy-efficient train control with onboard ESS considering stochastic regenerative braking energy (RBE).
[18]	Optimises capacity configuration of regenerative braking energy utilisation systems based on power sharing and energy storage.
[19]	Proposes an ESS approach for regulating maximum demand of traction substations.
[20]	Develops a hybrid ESS to improve regenerative braking utilisation and reduce peak traction power in 3 kV DC railways.
[21]	Optimises metro timetables to improve regenerative braking energy utilisation efficiency.
[22]	Develops energy-efficient multi-train scheduling considering passenger flows and station-side utilisation of regenerative energy.
Proposed study	Proposes a network-level ESTS power-sharing concept in which ESTS-equipped trains act as a shared backup resource for nonequipped trains to enable evacuation to the nearest stations during a systemwide power outage.

nonequipped trains through the traction supply network (overhead catenary lines or conductor rails), enabling those trains to continue moving to the nearest stations and thereby facilitating network-level evacuation with partial ESTS deployment, as illustrated in Figure 4.

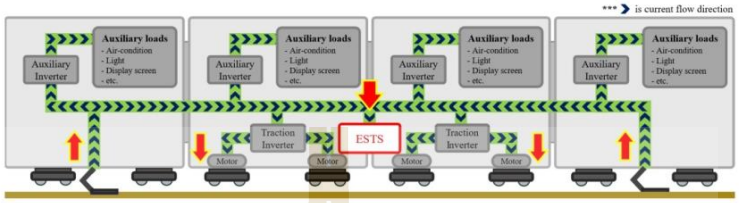
The operation of the ESTS may vary depending on the specific application in different MRTSs. Nevertheless, the core concept of ESTS operation lies in storing energy to enable train propulsion during emergencies.

2.2 | Principles of Power Sharing Using ESTS

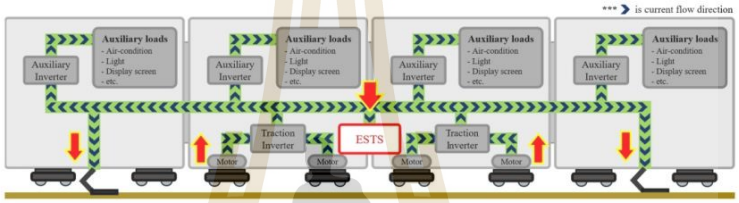
Power sharing between trains is one of the concepts that has been used to manage energy in the MRTS more efficiently and reduce some of the power consumed from the main power supply [17–20]. Two or more trains operating on the same power supply network can carry out this sharing by closely aligning their headway times in their operating schedules [21, 22, 24, 25]. Because of the various components that ensure effective power sharing of the ESTS, it must have stored backup power in the ESTS greater than its operational needs in emergencies, and the trains involved in power sharing must be within an appropriate proximity distance from the ESTS [26].

Traditional train energy-sharing concepts can be adapted to the ESTS power-sharing mechanism due to their similar structural configurations and operational principles [18, 24]. There are two main stages in the overall sequence of ESTS operation. In Stage 1, the ESTS can be turned on manually or automatically when the main power supply fails. The ESTS then operates in self-traction mode to propel the ESTS-equipped train to the nearest station for passenger evacuation, as illustrated in Figure 5a. When the passengers on this train have been safely evacuated and sufficient backup power remains, the system transitions to Stage 2, as shown in Figure 5b. In this stage, the ESTS switches to power-sharing mode and injects power via conductor rails or overhead

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040. By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License



(a) Charging from the main power supply



(b) Charging from regenerative braking

FIGURE 1 | The charging ESD of the ESTS operates under normal mains power supply conditions.

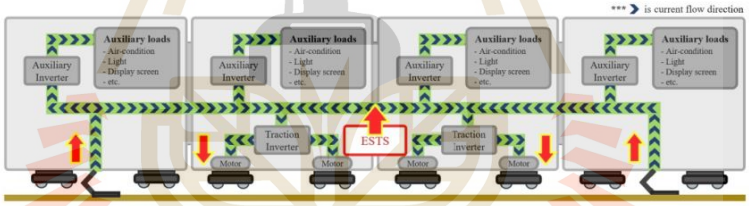


FIGURE 2 | The discharging ESD to the propulsion system of the ESTS operates under normal mains power supply conditions.

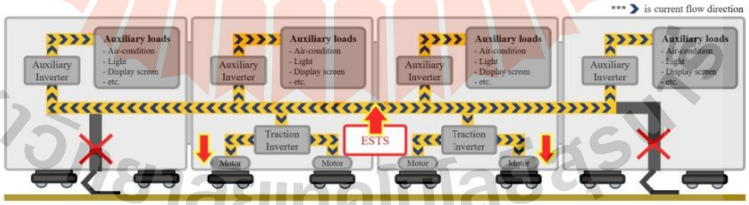


FIGURE 3 | Using energy from the ESTS to propel the train during a power outage.

transmission wires to support other stopped trains within the permitted sharing distance so that they can reach the next station and safely evacuate passengers. After all trains have arrived at stations and no passengers remain onboard, the ESTS power-sharing process is terminated and the system is shut down until new control commands are issued or the main power supply is restored. This two-stage power-sharing sequence is summarised in the flowchart in Figure 6.

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040, By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

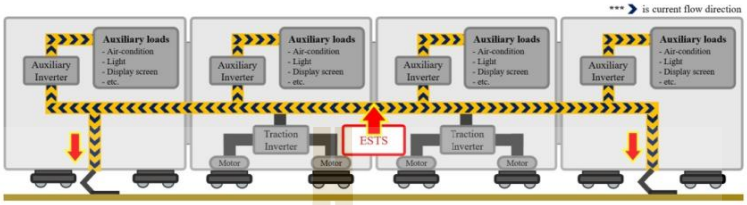


FIGURE 4 | Energy sharing from the ESTS during a power outage.

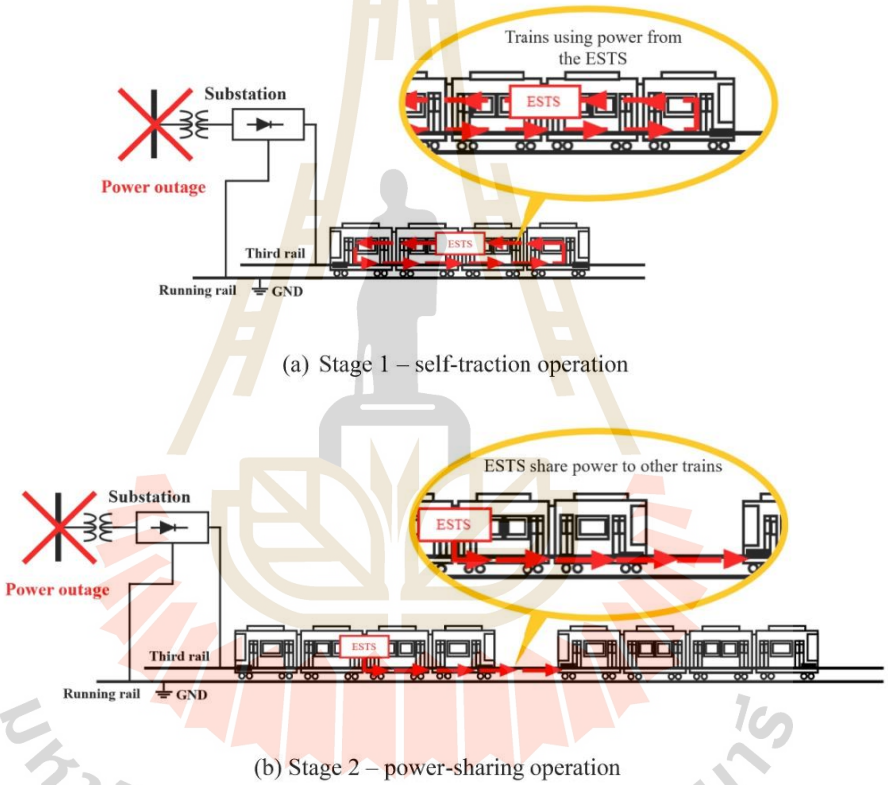


FIGURE 5 | Principles of power sharing using ESTS.

3 | Train Movement Calculation in MRTS

The feasibility analysis of applying the concept of power sharing using the ESTS in MRTS will be based on a model developed through mathematical equations implemented in computer programming. This model incorporates the movement of MRTS, the operation of the power supply system and simplified ESTS calculations. The model is parameterised using real-world line and operational data from the BTS Skytrain Silom Line case study, and the proposed concept is assessed through computer simulation as follows.

3.1 | The Movement of MRTS Model

The calculation of train movement involves several forces that need to be considered. These forces can be described using a free-body diagram of the train's motion, according to Newton's second law

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040, By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

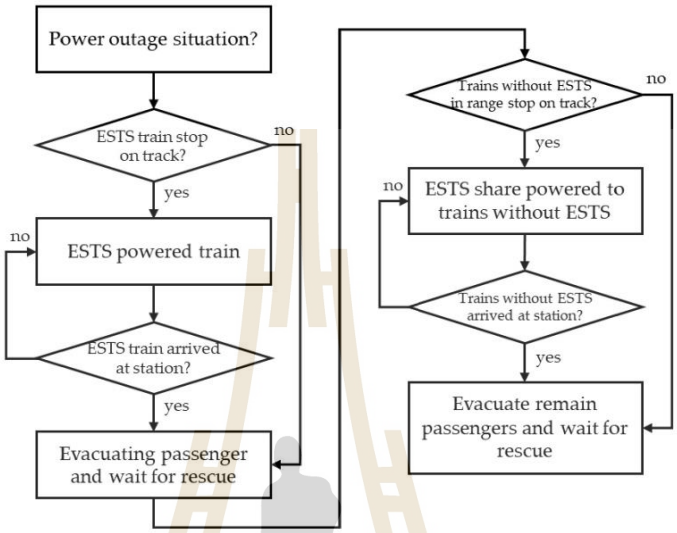


FIGURE 6 | Process of power sharing using ESTS.

of motion, as illustrated in Figure 7 [27] and shown in Equation (1). The train with an effective vehicle mass (M_{eff}, kg) will start moving by acceleration (α, m/s^2) when the pulling force (F_T, N) is strong enough to overcome the resistance (F_R, N). The T_R comprises three main resistance forces: the gravity or gradient forces (F_{grad}, N), the air resistance or dynamic drag forces (F_{drag}, N) and the rolling resistance or frictional forces (F_{RR}, N). However, usually, these forces are calculated using the testing factor provided by the MRTS manufacturer in Equation (2), which is named the Davis equation here. v represents the train speed (km/h), whereas A (kN), B (kNh/km) and C (kNh^2/km^2) are the Davis coefficients, whose equations are explained in detail in Refs. [27–30].

$$F_T - T_R = M_{\text{eff}}\alpha. \tag{1}$$

$$T_R = A + Bv + Cv^2. \tag{2}$$

Forces exerted on a train directly influence the control of its movement characteristics and speed. Consequently, train motion simulations must incorporate these forces to obtain results that closely approximate true values with the highest possible accuracy. Generally, train movement consists of four operational modes: accelerating mode, constant speed mode, coasting mode and braking mode, as illustrated in Figure 8 [29, 31].

Throughout the movement of the train, the speed and position of the train will be updated according to Equations (3) and (4), respectively. Here, v_i and v_t represent the train's speed before and after the update, s_i and s_t represent the train's position before and after the update, and Δt is the time step (set to 0.01 s in this study).

$$v_t = v_i + \alpha\Delta t. \tag{3}$$

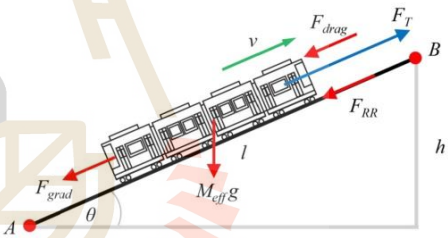


FIGURE 7 | Free-body diagram of train motion calculation.

$$s_t = s_i + v_i\Delta t + \frac{1}{2}\alpha\Delta t^2. \tag{4}$$

The main aspect of train movement simulation for analysing power sharing using the ESTS is the calculation of power and energy consumption for each train. The train power consumption (P_T, W) consists of tractive power (P_{ta}, W), auxiliary power (P_{aux}, W) and regenerative braking power (P_{reg}, W), as in Equation (5). Equation (6) shows that P_{ta} depends on the train's F_T, v and efficiency (η) of converting electrical energy to mechanical energy by the traction motor. P_{aux} is consumed by the train's lighting, air conditioning and signalling equipment. Additionally, the train energy consumption (E_T, Wh) can be calculated using Equation (7), where $E_{T,i}$ and $E_{T,t}$ represent the energy consumption before and after the update, respectively [27].

$$P_T = P_{ta} + P_{\text{aux}} + P_{\text{reg}} \tag{5}$$

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040. By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

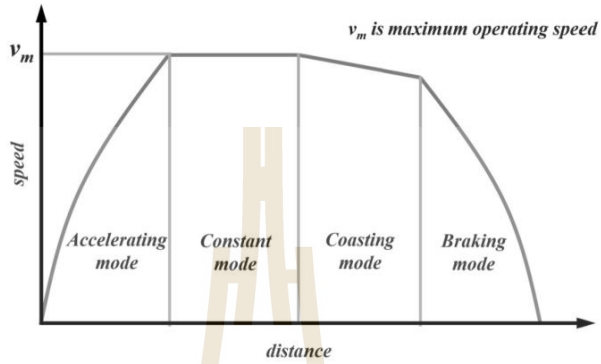


FIGURE 8 | Operational modes of train.

$$P_T = \begin{cases} P_{ta} = \dfrac{F_T}{\eta} \times v, & P_{\text{reg}} = 0 \quad ;\text{if } F_T \geq 0 \\ P_{ta} = 0, & P_{\text{reg}} = F_T \eta \times v \quad ;\text{if } F_T < 0 \end{cases} \tag{6}$$

$$E_{T,t} = E_{T,i} + P_T \Delta t. \tag{7}$$

All Equations (1–4) in this subsection are not only fundamental for reproducing realistic train motion in the simulations but are also used to derive the traction power demand and energy consumption of each train. Specifically, the simulated speed and position are combined with the traction and auxiliary power models in Equations (5–7) under different operating modes. The resulting power and energy profiles determine how much backup power is required from the ESTS for each train to reach the nearest station under a power-outage scenario, and they are subsequently used in Sections 3.2 and 3.3.

3.2 | The DC Power Supply System in the MRTS Model

The MRTS in urban areas typically operate using DC voltage levels of 600 V or 750 V for train propulsion. Modelling such systems requires incorporating the operational characteristics and structural components of the DC power supply infrastructure. These components include (1) traction substations equipped with diode rectifiers to prevent reverse current flow back into the substation, (2) conductor rails used to supply current from the substation to trains and, in this ESTS, to provide a path for energy sharing to other trains, (3) running rails that serve as the return path for the current and (4) insulation installed to electrically isolate the running rails from the ground [28]. Considering these elements is essential for developing a simulation model that accurately and realistically replicates system performance [29].

The traction substation is represented in the model using Norton equivalent source, which includes a short-circuit current source (I_S, A) and a resistance (R_S, Ω) that characterise the substation. The substation is connected to the conductor rail (C)

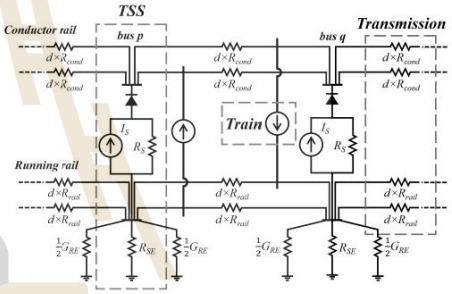


FIGURE 9 | Modelling of DC power supply system in MRTS.

through an ideal diode and to the running rail (R), which has a resistance to ground (R_{SE}, Ω). This configuration is in the TSS section, as illustrated in Figure 9 [27, 28].

The analysis of power flow issues in a highly complex DC power supply system necessitates the use of appropriate computational techniques. This study adopts the current injection method (CIM) to analyse the parameters at various system buses. The process begins by determining the initial voltage at each bus to be zero and formulating the nodal analysis equations. The authors in Refs. [27, 28] provide a detailed explanation of the conductance matrix [G].

$$[I] = [G][V]. \tag{8}$$

The current matrix [I] in Equation (8) is determined by combining the currents from the traction substations and the train current (I_T, A). The I_T is calculated as the ratio of the train's power demand (P_T, W) to the voltage (V_T, V) at the bus where the train is located. From the above parameters, the equations will be solved to determine the voltage matrix [V] for the system buses, which will be processed iteratively until the voltage deviation at each bus is less than the defined tolerance.

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040, By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

3.3 | The Emergency Self-Traction System Model

The simulation that examines the power supply of the ESTS installed on trains, as shown in Figure 2 of Ref. [32], can be run with a simplified battery model that is based on the Norton equivalent circuit in Refs. [32, 33]. The model parameters are interrelated according to Equations (9–12), where I_{ESTS} is the ESTS current (A), E_{ESTS} is the energy available from the ESTS for utilisation (kWh), R_{ESTS} is the internal resistance of the ESTS (Ω), V_{ESTS} is the ESTS voltage (V), and I_d is the load current (A).

$$I_{ESTS} = \frac{E_{ESTS}}{V_{ESTS} \times 3600}. \tag{9}$$

$$R_{ESTS} = \frac{V_{ESTS}}{I_{ESTS}}. \tag{10}$$

$$I_d = \frac{P_T}{V_{ESTS}}. \tag{11}$$

$$V_{ESTS} = R_{ESTS} \times (I_{ESTS} - I_d). \tag{12}$$

4 | Simulation and Results

This simulation is divided into two parts: the simulation of train movement to design a suitable ESTS for the system and the simulation of power sharing of the ESTS during a power outage, as detailed below.

4.1 | The Simulation of Train Movement to Design Suitable ESTS for the System

The simulation of power sharing between trains using the ESTS in this article selects the Bangkok Mass Transit System (BTS) Skytrain Silom Line (dark green line) in Thailand as a case study, as specifically listed in Table 1 of Ref. [34]. This MRTS has a total service distance of 13.65 km, comprising 14 stations (W1–S12) and 7 substations with a 750-V supply, as illustrated in Figure 10 [27, 34]. The train dispatch timetables consist of two patterns: During peak hours, trains are dispatched every 3 min, and during regular operating hours, trains are dispatched every 6 min. This simulation is based on typical operating hours, where each train stops at each station for 20 s. When averaging the number of trains running in the up-track direction (from Station W1 to S12) and the down-track direction (from Station S12 to W1), there will be a total of 4 trains in each direction.

When simulating the movement of the MRTS using the model developed in MATLAB/m-file, the train's movement characteristics and energy consumption during operation on each section of the service route are determined. Figure 11 shows the train speed profile in service, where the red line represents the speed limit for each section and the blue line represents the actual speed achieved by the train. Figure 12 shows the energy consumed while the train moves between stations, where circular markers indicate the maximum energy consumption points. The maximum energy consumption occurs between Stations S10 and S11 (between distances 11.346–13.009 km) and is calculated as 38.07 kWh from the difference between initial and final energy. These energy consumption data are critical for determining the required capacity of the ESTS, which must provide sufficient backup power for both the train equipped with it and at least one additional train requiring power sharing during an outage, demonstrating the feasibility and effectiveness of the proposed power-sharing principle using the ESTS, as detailed in this article.

Based on the maximum energy consumption calculated above, the optimal ESTS capacity is found by multiplying the number of trains that need power from the ESTS (two trains, one with ESTS and one without) by half of the energy needed for a train to travel the longest route, which in the worst case of a power outage is 19 kWh (half of 38 kWh). Consequently, the ESTS is designed to have a minimum capacity of 38 kWh to ensure sufficient energy storage for MRTS operations under the specified conditions, considering the worst-case scenario in which a train equipped with the ESTS and another train requiring power sharing simultaneously stop at the midpoint of the longest section of the route.

After the determination of optimal capacity and the specifications of the lithium titanium oxide (LTO) battery (i.e., popularly used for train propulsion [35, 36]), the ESTS was designed to achieve feasible parameters and refers to specifications specified by Toshiba's product example data [37]. The chosen ESTS has a 52-kWh structure with a total of 981 battery modules in the system (3 in parallel/327 in series). The installation of the ESTS on the train resulted in an increased load of 539.55 kg, leading to higher energy consumption during the train's operation. However, the

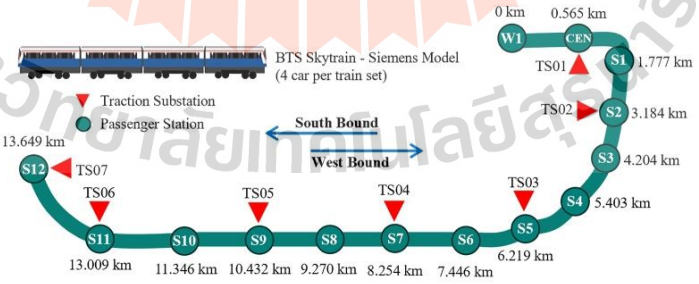


FIGURE 10 | List of passenger stations.

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040, By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

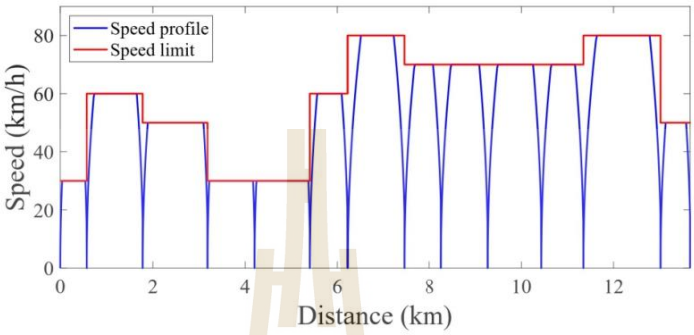


FIGURE 11 | The train speed profile in service.

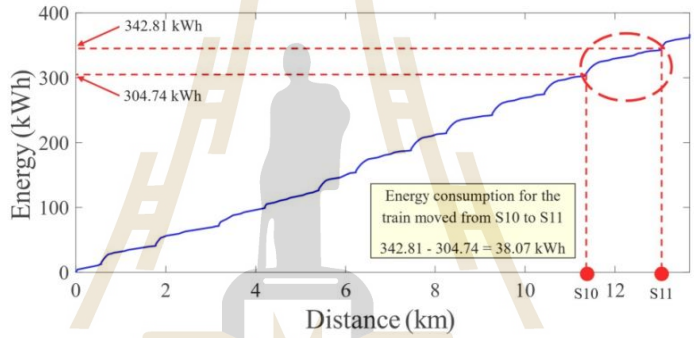


FIGURE 12 | Energy consumption of train movement.

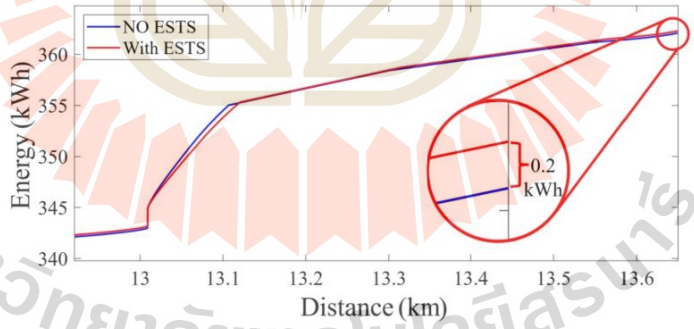


FIGURE 13 | Comparison of energy consumption before and after ESTS installation.

increase in energy consumption is only 0.2 kWh above normal. Therefore, the implementation of the ESTS has a small impact on energy efficiency, as illustrated in Figure 13.

Furthermore, a comparison of train propulsion energy consumption at different speeds while incorporating the regenerative braking function reveals that higher speeds lead to greater energy recovery from braking. Therefore, the operation of the train powered by the ESTS is constrained to the maximum service speed specified, as illustrated in Figure 11. However, within the speed range of 40–60 km/h, energy consumption remains relatively consistent, as illustrated in Figure 14.

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040, By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

4.2 | Simulation of Power Sharing Using ESTS

This simulation samples power-outage scenarios at one-minute intervals, starting when all trains enter the service route and ending when the first train completes a round trip between the departure and destination stations. This time window represents a balanced proportion of trains equipped with ESTS and those without. Subsequently, the ESTS begins supplying backup power to the equipped trains 5 min after the occurrence of a power outage. Once these trains have completely moved to the nearest

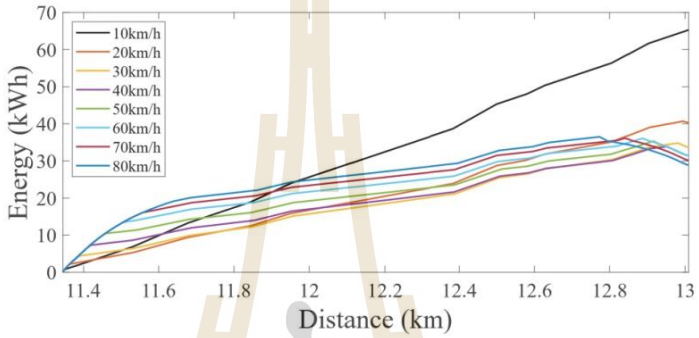
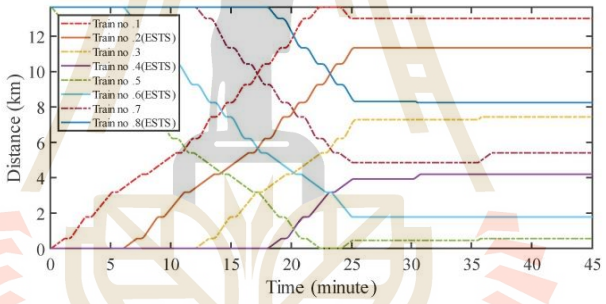
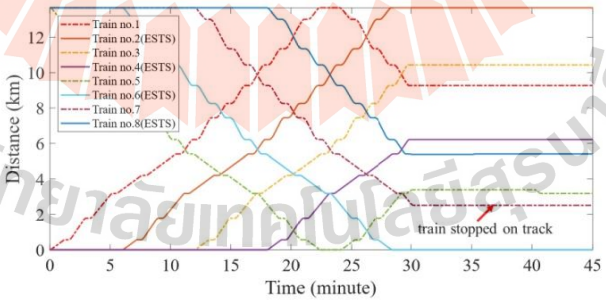


FIGURE 14 | Energy consumption of trains at different speeds.



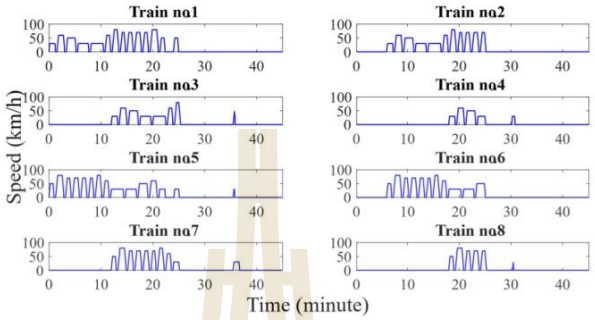
(a) Case where all trains can move to the nearest stations



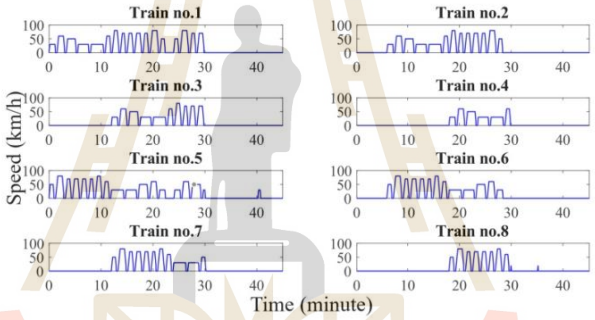
(b) Case where some trains stopped staying on the track

FIGURE 15 | Position–time relationship of train movement during a power outage.

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040, By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License



(a) Case where all trains can move to the nearest stations



(b) Case where some trains stopped staying on the track

FIGURE 16 | Speed–time relationship of train movement during a power outage.

station, the ESTS switches to power-sharing mode and allocates the remaining energy to other trains in need of assistance. The maximum service distance for power sharing is set to 3.5 km along the track between an ESTS-equipped train and another train, due to the limitations of DC power transmission [26]. If the backup power capacity of an ESTS is insufficient or the service distance for power sharing exceeds this range, the responsibility for power sharing is transferred to other ESTS units within the same MRTS network.

Figures 15 and 16 illustrate the operation details of the MRTS with ESTS during a power outage using graphical representations of the position–time and speed–time relationships of each train along the service route, which provide a comprehensive understanding of the situation. In Case (a), all trains successfully move to the nearest stations. This is observed from changes in train positions and the various velocities during movement. After a power outage, Trains 4 and 8 initially move to the nearest stations, drawing backup power from their onboard ESTS at around minute 30, whereas Train 6 is already stopped at a station. Subsequently, the ESTS on Train 4 shares power with Train 7, the ESTS on Train 6 shares power with Train 5, and the ESTS on Train 8 shares power with Train 3 at around minute 35. The remaining trains are already stationary at stations and therefore do not require additional energy. In Case (b), some trains remain stopped on the track. Train 8 first moves to the nearest station at around minute 35 using its own ESTS and then shares its remaining energy with Train 5 at around minute 40. However, Train 7 remains on the track because it is outside the permitted range for power sharing using ESTS. The result can be seen from the position of Train 7, which stays almost unchanged throughout the power-outage period.

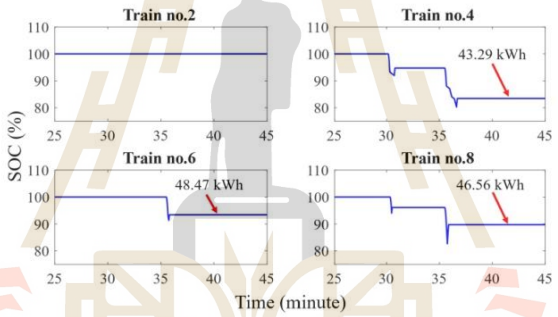
The utilisation of backup power in each ESTS-equipped train differs between the two power-outage cases. In Case (a), the ESTS units on Trains 4 and 8 are used for both self-traction and power sharing, whereas the ESTS on train six operates only in power-sharing mode. In Case (b), only the ESTS on train eight is used for self-traction and power-sharing modes. In both cases, the energy drawn from each ESTS remains below 50% of its

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040. By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

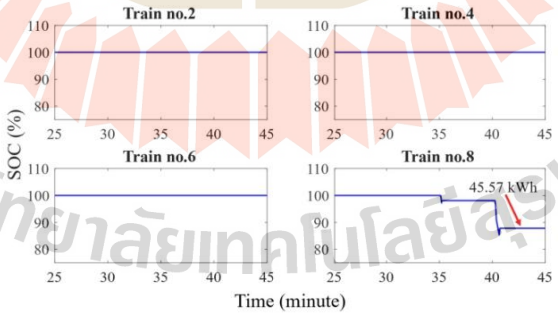
installed capacity, suggesting that some reduction in ESTS capacity may be feasible in future implementations, as illustrated in Figure 17.

The simulation of ESTS operation at various points during one round-trip cycle with all trains in service shows clear differences between cases with and without power sharing. In a normal ESTS installation where each unit supplies only its host train, ESTS-equipped trains generally reach the nearest stations, whereas several nonequipped trains remain stranded between stations until the power supply is restored. Applying the proposed ESTS power-sharing strategy significantly reduces the number of stranded trains. The overall operational success rate, defined as the proportion of power-outage situations in which all trains can reach the nearest stations, reaches 72.41%, as illustrated in Figure 18. These results demonstrate that ESTS power sharing can substantially mitigate the problem of passengers being trapped inside trains or facing other adverse conditions during main power supply outages. However, nonequipped trains may remain on the track due to their location outside the permissible range for receiving power from any ESTS-equipped train. This limitation suggests that further research is needed on the placement of ESTS units and train movement control strategies in MRTS operations to enhance the effectiveness of ESTS power sharing in the future. To support the further application of the findings of this article in existing MRTS operations, Table 2 compares the proposed method with previous studies on ESTS and ESS for emergency traction in MRTS [9–16].

As summarised in Table 2, most related studies focus on single-train emergency operations or ESS designs for energy savings in normal service [38]. Although several studies consider power-outage scenarios, none of them implement onboard power sharing between multiple trains in an MRTS network. In contrast, the proposed study considers power-outage scenarios involving both ESTS-equipped and nonequipped trains on a real MRTS line and introduces an ESTS power-sharing concept in which equipped trains support other trains within a defined distance. This study fills a gap by quantifying backup-energy usage and network-level evacuation performance.



(a) Case where all trains can move to the nearest stations



(b) Case where some trains stopped staying on the track

FIGURE 17 | Energy usage of each ESTS.

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040, By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

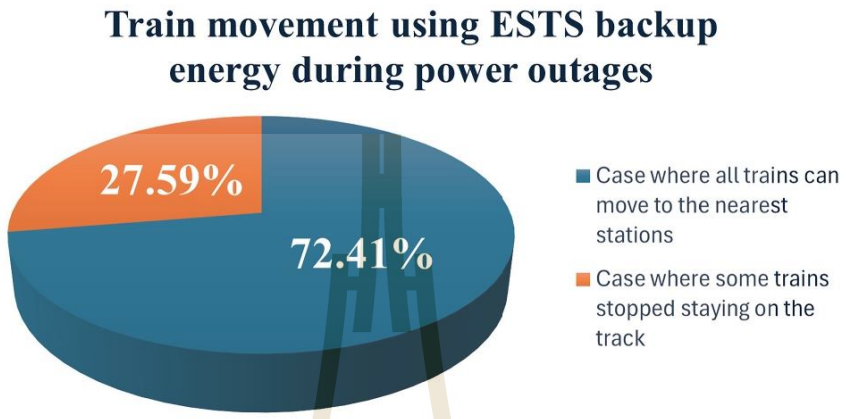


FIGURE 18 | Operational success rate of ESTS power sharing.

TABLE 2 | Comparison of the proposed study with related studies.

References	Article focus	Power outage	System	Method	Power sharing
[9]	Onboard UPS/propulsion ride-through for a single train	Yes	Single-train	Laboratory	No
[10]	Survey of emergency self-running power supply schemes	Yes	Single-train	Review	No
[11]	Emergency traction modelling considering onboard ESD	Yes	Single-train	Simulation	No
[12]	Li-ion battery emergency traction system function (design study)	Yes	Single-train	Simulation	No
[13]	Battery application for emergency train running within traction power supply	Yes	Single-train	Field test	No
[14]	ESTS design and analysis	Yes	Single-train	Simulation	No
[15]	Optimised control of emergency traction using storage battery	Yes	Single-train	Simulation	No
[16]	Stationary versus onboard ESS for metro energy-consumption reduction	No	Network-level	Simulation	No
[17]	Energy-efficient train control with onboard ESS	No	Single-train	Simulation	No
[18]	Regenerative braking energy utilisation system sizing based on power sharing and energy storage	No	Network-level	Simulation	Yes
[19]	ESS for regulating maximum demand of traction substations	No	Network-level	Simulation	No
[20]	Hybrid ESS for regenerative braking utilisation and peak power decrease	No	Network-level	Simulation	No
[21]	Metro timetable optimisation for improving regenerative braking energy utilisation	No	Network-level	Simulation	Indirect (coordination via scheduling)
[22]	Energy-efficient multi-train scheduling with passenger flows and station-side utilisation of regenerative energy	No	Network-level	Simulation	Indirect (coordination via scheduling)
This work	Network-level ESTS power sharing in MRTS	Yes	Network-level	Simulation	Yes (ESTS power sharing between trains)

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040, By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

5 | Conclusion

The concept of power sharing between trains using ESTS has been presented in this article with the aim of minimising the number of ESTS installations in MRTS while preserving the capability to evacuate passengers to the nearest stations during power outages. The analysis and simulations show that ESTS units can effectively share power through the existing conductor rail system with other trains located within the permitted service distance and can provide sufficient backup power for equipped trains, yielding an overall operational success rate of 72.41% in the studied scenarios. Although the current scheme is constrained by the limited power-sharing distance and by the fact that each ESTS can support only one additional train at a time, the results indicate that the proposed approach can substantially alleviate the problem of stranded trains and trapped passengers during outages. Overall, power sharing through the ESTS can reduce installation and maintenance costs while also increasing the flexibility of energy management within the system by utilising power recovered through regenerative braking. Promoting the use of ESTS in MRTS therefore has the potential to enhance safety, reliability and affordability and to contribute to the development of more sustainable MRTS.

Despite these benefits, this study has several limitations that point to directions for future research. First, the ESTS is modelled using a simplified equivalent-circuit representation without explicitly considering detailed aspects such as protection coordination, converter dynamics, control features etc. Second, the train movement and energy models do not account for variations in passenger loads, degraded track conditions and detailed auxiliary load profiles. Finally, all results are obtained through simulation, and hardware-in-the-loop experiments, as well as field tests, will be required to validate the proposed framework and address practical issues such as communication delays, protection settings and safety constraints before deploying ESTS power sharing in real MRTS networks.

Funding

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT), Thailand (Research and Development Fund) (Grant IRD7-711-68-12-61) and Thailand Science Research and Innovation (TSRI), and National Science, Research and Innovation Fund (NSRF) (Grant FRB660073/0164).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available upon request from the corresponding author. The data are not publicly available due to privacy or ethical restrictions.

References

1. C. Wu, S. Lu, F. Xue, L. Jiang, M. Chen, and J. Yang, "A Two-Step Method for Energy-Efficient Train Operation, Timetabling, and Onboard Energy Storage Device Management," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 7, no. 3 (September 2021): 1822–1833, https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3059111.

2. C. Wu, S. Lu, F. Xue, L. Jiang, and M. Chen, "Optimal Sizing of Onboard Energy Storage Devices for Electrified Railway Systems," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 6, no. 3 (September 2020): 1301–1311, https://doi.org/10.1109/TTE.2020.2996362.

3. Y. Jiang, R. Zhang, and B. Wang, "Scenario-Based Approach for Emergency Operational Response: Implications for Reservoir Management Decisions," *International Journal of Disaster Risk Reduction* 80, no. 1 (October 2022): 103192, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103192.

4. S. Lin, X. Sun, Q. Yu, D. Feng, and Z. He, "Risk Assessment for Traction Power Supply System Considering the Influence of Multiple Meteorological Factors," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 9, no. 2 (June 2023): 2645–2658, https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3212054.

5. Y. Ying, Z. Tian, M. Wu, Q. Liu, and P. Tricoli, "Capacity Configuration Method of Flexible Smart Traction Power Supply System Based on double-layer Optimization," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 9, no. 3 (Sept. 2023): 4571–4582, https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3244551.

6. N. Chovančíková and Z. Dvořák, "Effect of a Power Failure on Rail Transport," *Transportation Research Procedia* 40 (July 2019): 1289–1296, https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.179.

7. C. Wang, C. Zhang, L. Luo, X. Qi, and J. Kong, "Optimal Resilience and Risk-Driven Strategies for Pre-Disaster Protection of Electric Power Systems Against Uncertain Disaster Scenarios," *Energies* 17, no. 15 (June 2024): 3619, https://doi.org/10.3390/en17153619.

8. J. Luo, S. Gao, X. Wei, Z. Tian, and X. Wang, "Parallel-Reinforcement-Learning-Based Online Energy Management Strategy for Energy Storage Traction Substations in Electrified Railroad," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 10, no. 1 (March 2024): 2112–2123, https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3288639.

9. H. Mohammadi Pirouz and A. Hajizadeh, "A Highly Reliable Propulsion System With Onboard Uninterruptible Power Supply for Train Application: Topology and Control," *Sustainability* 12, no. 10 (May 2020): 3943, https://doi.org/10.3390/su12103943.

10. Y. Zhu, T. Qiu, J. Gao, S. Li, and L. Diao, "A Survey of Emergency Self-Running Power Supply Schemes for Rail Transit Vehicles," in *Proceedings of the 9th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering Lecture Notes in Electrical Engineering*, (2021), 185–202.

11. J. Wang, Y. Hu, D. Huang, Y. Zhang, and J. Fang, "Modeling and Estimation of Train Traction Characteristics Under Emergency Traction Considering On-Board Energy Storage Devices," in *2023 IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)*, (2023), 350–355.

12. X. Xu, X. Sun, Q. Zhou, X. Jiang, D. Hu, and R. He, "Design and Research on the Function of Lithium-Ion Batteries Emergency Traction System for Rail Vehicles," *Advances in Mechanical Engineering* 10, no. 12 (December 2018): 1687814018812296, https://doi.org/10.1177/1687814018812296.

13. H. Takahashi, Y. Kume, K. Honda, H. Kawatsu, J. Kaminishi, and Y. Shimizu, "The Function Development for Emergency Train Running by Battery Application in Traction Power Supply System," in *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, (2016), 1137–1140.

14. D. Yuan, S. Gu, J. Liu, Y. Zhang, and C. Lv, "Design and Analysis of Emergency Self-Traction System for Urban Rail Transit Vehicles," *Energy Procedia* 16, no. Part A (2012): 585–591, https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.094.

15. K. Wang, Q. Ge, and Y. Li, "Analysis and Optimized Control of Emergency Traction by Storage Battery for Urban Rail Transit Vehicle," in *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, (2014), 175–179.

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040. By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

16. R. Barrero, X. Tackoen, and J. van Mierlo, "Stationary or Onboard Energy Storage Systems for Energy Consumption Reduction in a Metro Network," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit* 224, no. 3 (April 2010): 207–225, https://doi.org/10.1243/09544097JRRT322.

17. C. Wu, S. Lu, Z. Tian, F. Xue, and L. Jiang, "Energy-Efficient Train Control With Onboard Energy Storage Systems Considering Stochastic Regenerative Braking Energy," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 11, no. 1 (2025): 257–274, https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3389960.

18. F. Zhou, Z. Tang, D. Tan, and Y. Xie, "Capacity Configuration Optimization of Regenerative Braking Energy Utilization System for Electrified Railways Based on Power Sharing and Energy Storage," *Electric Power Systems Research* 239 (2025): 111275, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111275.

19. F. Zhou, Z. Tang, X. Zhang, L. Chou, and D. Tan, "An Energy Storage System for Regulating the Maximum Demand of Traction Substations," *Energies* 18, no. 1 (2025): 131, https://doi.org/10.3390/en18010131.

20. A. Szeląg, W. Jefimowski, T. Maciołek, A. Nikitenko, M. Wieczorek, and M. Lewandowski, "Hybrid Energy Storage System for Regenerative Braking Utilization and Peak Power Decrease in 3 kV DC Railway Electrification System," *Electronics* 14, no. 9 (2025): 1752, https://doi.org/10.3390/electronics14091752.

21. Z. Zhang, H. Zhao, X. Yao, Z. Xing, and X. Liu, "Metro Timetable Optimization for Improving Regenerative Braking Energy Utilization Efficiency," *Journal of Cleaner Production* 450 (2024): 141970, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141970.

22. Q. Xu, W. Liu, X. Zhang, Z. Tian, and H. Geng, "Energy-Efficient Multi-Train Scheduling Considering Dynamic Passenger Flows and Station-Side Utilization of Regenerative Energy," *Energy* 340 (2025): 139301, https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139301.

23. Y. Nagaura, R. Oishi, M. Shimada, and T. Kaneko, "Battery-Powered Drive Systems: Latest Technologies and Outlook," *Hitachi Review* (2017): 138–144.

24. X. Sun, H. Lu, and H. Dong, "Energy-Efficient Train Control by Multi-Train Dynamic Cooperation," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 18, no. 11 (November 2017): 3114–3121, https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2682270.

25. J. Chen, Y. Zhao, M. Wang, K. Wang, Y. Huang, and Z. Xu, "Power Sharing and Storage-Based Regenerative Braking Energy Utilization for Sectioning Post in Electrified Railways," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 10, no. 2 (2024): 2677–2688, https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3295089.

26. M. S. Elbelkasi, E. Badran, and M. Abdel-Rahman, "Overview of DC and AC Electric Railway Systems Considering Energy Efficiency Enhancement Methods," *Port-Said Engineering Research Journal* 24, no. 1 (March 2019): 128–140, https://doi.org/10.21608/pserj.2019.18206.1012.

27. C. Sumpavakup, S. Suwannakijborihan, T. Ratniyomchai, and T. Kulworawanichpong, "Peak Demand Cutting Strategy With an On-Board Energy Storage System in Mass Rapid Transit," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering* 42, no. 1 (February 2018): 49–62, https://doi.org/10.1007/s40998-018-0048-6.

28. T. Kulworawanichpong, "Multi-Train Modeling and Simulation Integrated With Traction Power Supply Solver Using Simplified Newton–Raphson Method," *Journal of Modern Transportation* 5, no. 6 (October 2015): 241–251, https://doi.org/10.1007/s40534-015-0086-y.

29. M. Chymera and C. J. Goodman, "The Calculation of Train Performance," in *IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems*, (2014), 1–13.

30. X. Li and Y. Liu, "A Hybrid Data and Mechanism Model-Driven Digital Twin Modelling Approach for Novel Traction Power Systems," *Urban Rail Transit* 11, no. 2 (2025): 221–233, https://doi.org/10.1007/s40864-024-00236-2.

31. S. Watanabe and T. Koseki, "Train Group Control for Energy-Saving DC-Electric Railway Operation," in *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)*, (2014), 1334–1341.

32. C. Jobsoongnern, T. Ratniyomchai, and T. Kulworawanichpong, "Energy Consumption Study of Rapid Charging of Catenary Free Light Rail Transit," in *2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, (2020), 13–16.

33. G. Cipolletta, A. Delle Femine, D. Gallo, M. Luiso, and C. Landi, "Design of a Stationary Energy Recovery System in Rail Transport," *Energies* 14, no. 9 (May 2021): 2560, https://doi.org/10.3390/en14092560.

34. W. Kampeerawat and T. Koseki, "A Strategy for Utilization of Regenerative Energy in Urban Railway System by Application of Smart Train Scheduling and Wayside Energy Storage System," *Energy Procedia* 138 (October 2017): 795–800, https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.070.

35. J. Olmos, I. Gandiaga, D. Lopez, X. Larrea, T. Nieva, and I. Aizpuru, "Li-Ion Battery-Based Hybrid Diesel-Electric Railway Vehicle: In-Depth Life Cycle Cost Analysis," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 71, no. 6 (June 2022): 5715–5726, https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3128754.

36. M. Saeed, F. Briz, J. M. Guerrero, et al., "Onboard Energy Storage Systems for Railway: Present and Trends," *IEEE Open Journal of Industry Applications* 4 (2023): 238–259, https://doi.org/10.1109/OJIA.2023.3293059.

37. *Toshiba, SCiB™ Rechargeable Lithium-ion Battery Catalog*, Toshiba Corporation, 2023. Accessed: Jan. 27, 2025, https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib.html.

38. J. Yuan, L. Peng, H. Zhou, D. Gan, and K. Qu, "Recent Research Progress and Application of Energy Storage System in Electrified Railway," *Electric Power Systems Research* 226 (2024): 109893, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109893.

25168401, 2026, 1, Downloaded from https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/esi2.70040, By SEA ORCHID (Thailand), Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

ประวัติผู้เขียน

นายบัณริ เข็มกลัดมุกต์ เกิดเมื่อวันที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2537 ณ จังหวัดคานากาวะ ประเทศญี่ปุ่น สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง และระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2560 และ 2563 ตามลำดับ ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนกิตติบัณฑิต และปฏิบัติงานเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2567 โดยมีความสนใจในงานวิจัยด้านระบบไฟฟ้าสำหรับระบบขนส่งทางราง ระบบกักเก็บพลังงาน ยานยนต์ไฟฟ้า และระบบไฟฟ้ากำลัง ทั้งนี้ มีผลงานวิชาการตีพิมพ์เผยแพร่ทั้งในวารสารและการประชุมวิชาการทั้งภายในและภายนอกประเทศ ดังรายละเอียดที่ปรากฏในภาคผนวก ง.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี