

บทที่ 4

แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

4.1 บทนำ

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

4.2 แบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

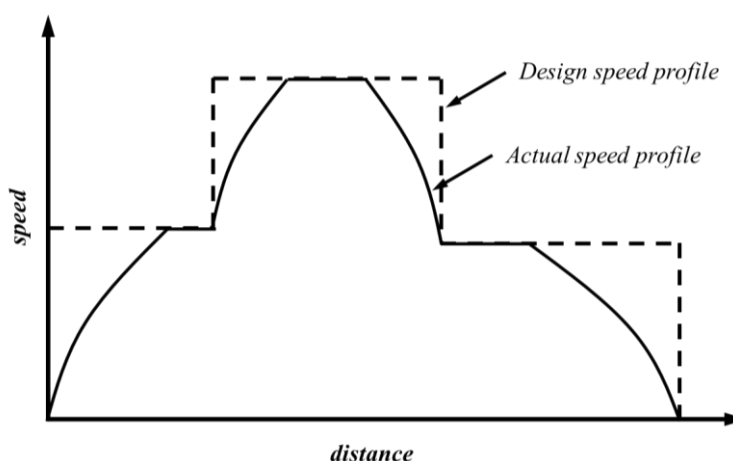
แบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนถือเป็นหัวใจหลักของการศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งต้องอาศัยการออกแบบและสร้างแบบจำลองโดยจะคำนึงถึงการทำงานของขบวนรถไฟฟ้าและระบบส่วนอื่น ๆ ที่มีความสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีและข้อมูลเชิงเทคนิค เพื่อเป็นการวางรากฐานสู่การทดสอบแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS

4.2.1 การพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การพัฒนาแบบจำลองประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า และส่วนโครงข่ายระบบจ่ายไฟ เพื่อให้แบบจำลองมีความสมจริงและมีความแม่นยำสูงสุด โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนแสดงไว้ดังต่อไปนี้

4.2.1.1 ส่วนการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ

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



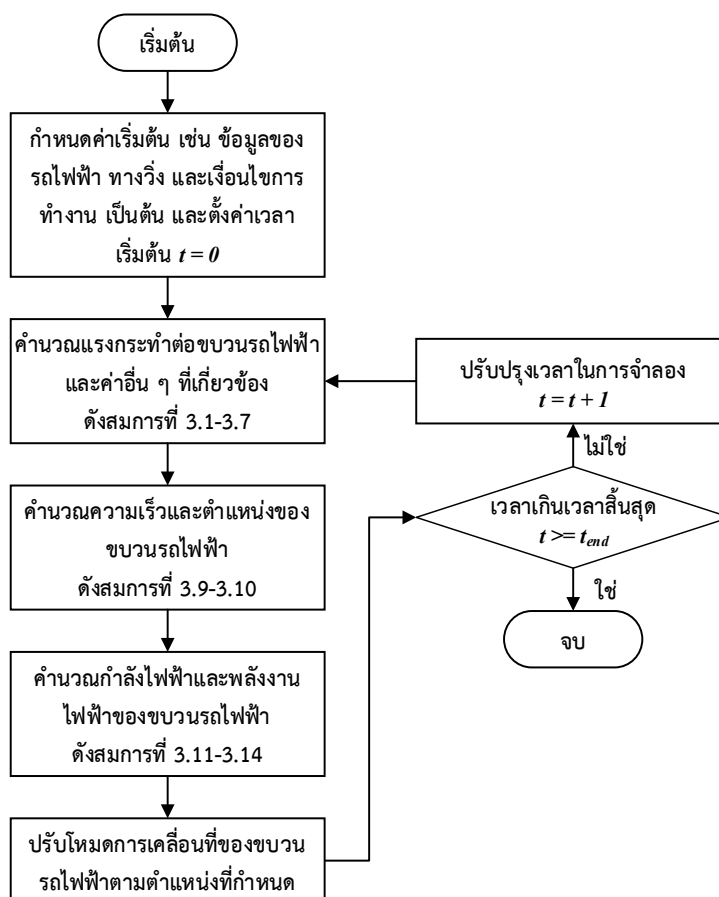
รูปที่ 4.1 ลักษณะเส้นโครงร่างความเร็วของขบวนรถไฟที่ควบคุมเชิงสัดส่วน

1) โหมดวิ่ง ทำหน้าที่คำนวณและควบคุมความเร็วตลอดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามวลชน โดยการควบคุมความเร็วในโหมดนี้จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 เงื่อนไข ได้แก่ เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจริงต่ำกว่าความเร็วอ้างอิงที่ได้ออกแบบไว้ จะมีการควบคุมให้รถไฟเข้าสู่โหมดเร่งความเร็ว แต่เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจริงสูงกว่าความเร็วอ้างอิงที่ได้ออกแบบไว้ จะมีการควบคุมให้รถไฟเข้าสู่โหมดความเร็วคงที่

2) โหมดเบรก ทำหน้าที่ลดความเร็วของรถไฟเมื่อเคลื่อนที่ถึงระยะวิกฤตการเบรกเพื่อเตรียมเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร

3) โหมดหยุดที่สถานี ทำหน้าที่จับเวลาที่จอดอยู่ที่สถานีนี้ผู้โดยสารตามเวลาที่กำหนด (dwell time) ก่อนรถไฟฟ้าจะกลับไปทำงานในโหมดวิ่งอีกครั้งกรณีมีหลายสถานีผู้โดยสาร

โดยระหว่างการศึกษาการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าในโหมดต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น แบบจำลองคำนวณแรงที่กระทำต่อขบวนรถ (รวมถึงแรงขับ แรงต้าน และแรงเบรก) อัปเดตสถานะความเร็วและระยะทางที่เคลื่อนที่ และประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตามสมการที่นำเสนอในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งสามารถรวบรวมและสังเคราะห์ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองเป็นแผนผังการทำงาน (flowchart) แสดงดังรูปที่ 4.2

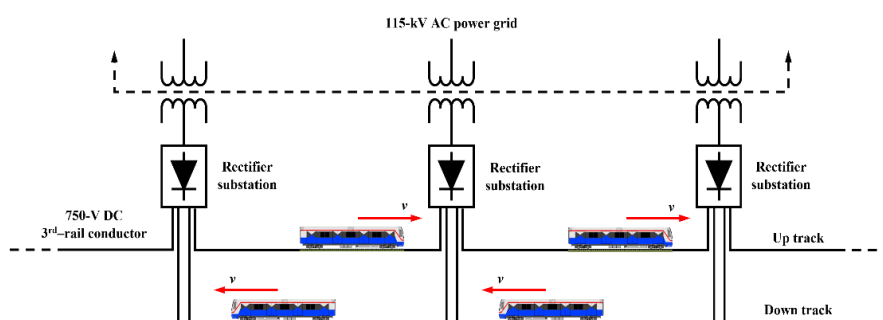


รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองส่วนการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า

4.2.1.2 ส่วนโครงข่ายระบบจ่ายไฟ

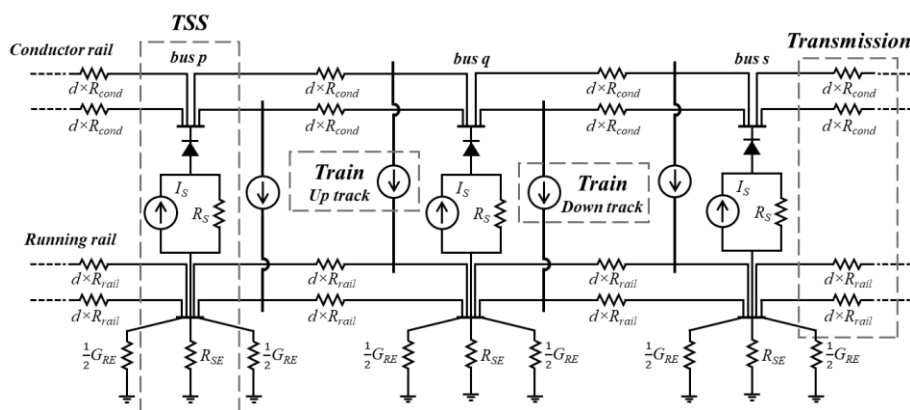
ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ให้บริการในเขตเมืองมักใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 600 หรือ 750 โวลต์ ในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า การสร้างแบบจำลองส่วน

โครงข่ายจ่ายไฟจึงต้องพิจารณาคุณสมบัติและโครงสร้างของระบบจ่ายไฟกระแสตรงที่ประกอบด้วย สถานีไฟฟ้าย่อยแบบวงจรเรียงกระแสที่ป้องกันการย้อนกลับของกระแสด้วยไดโอด ร่างตัวนำที่จ่ายกระแสให้ขบวนรถไฟฟ้า ร่างวิ่งซึ่งเป็นทางกลับของกระแส และฉนวนคั่นระหว่างร่างวิ่งกับพื้นดิน เพื่อให้การจำลองผลการทำงานของระบบมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.3 (Mongkoldee, Leeton, and Kulworawanichpong, 2016) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



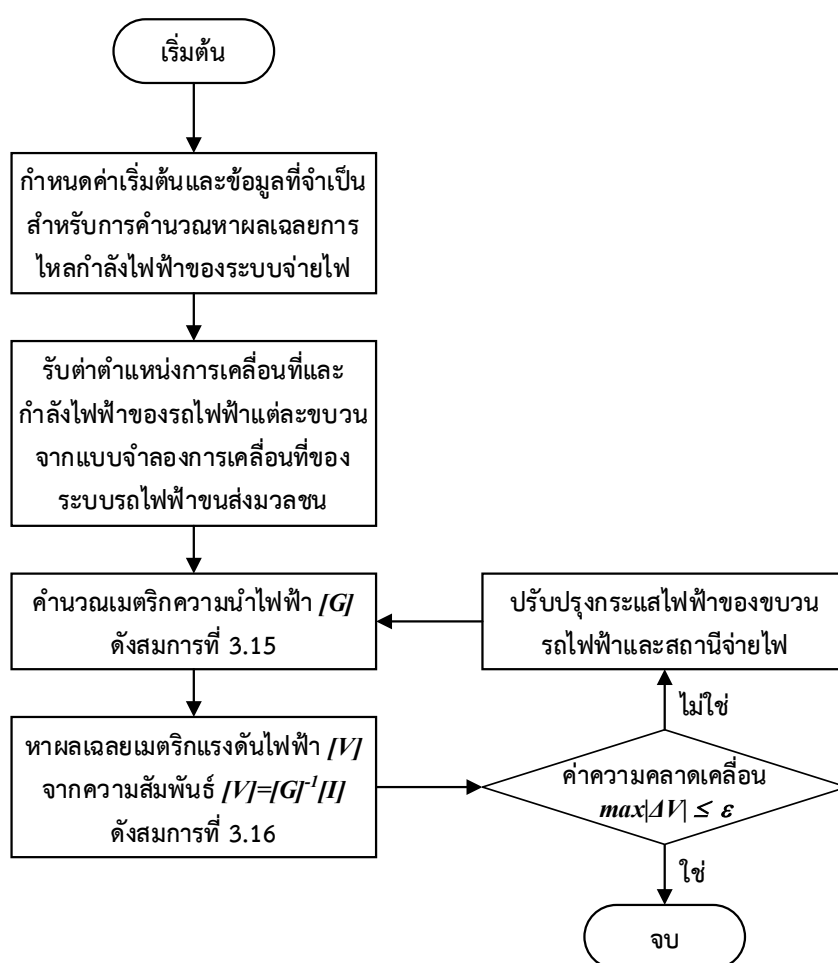
รูปที่ 4.3 ระบบจ่ายไฟกระแสตรงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

จากรูปที่ 4.3 สามารถวิเคราะห์โครงข่ายระบบจ่ายไฟกระแสตรงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนให้อยู่ในรูปแบบจำลองพาย ซึ่งแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ สถานีจ่ายไฟ ขบวนรถไฟฟ้า และชุดสายป้อนที่ประกอบด้วยร่างตัวนำ ร่างวิ่ง และฉนวนระหว่างร่างกับพื้นดิน แสดงดังรูปที่ 4.4 การสร้างแบบจำลองในลักษณะนี้ช่วยลดความซับซ้อนของการคำนวณให้สามารถวิเคราะห์ระบบได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.4 แบบจำลองพายของระบบจ่ายไฟกระแสตรง

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



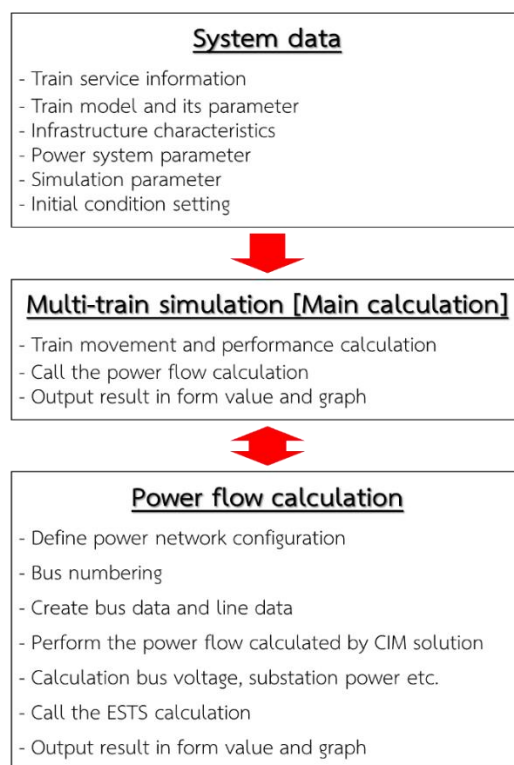
รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองในส่วนโครงข่ายระบบจ่ายไฟ

จากรูปที่ 4.5 กระบวนการหาผลเฉลยค่าทางไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแสของแบบจำลองโครงข่ายระบบจ่ายไฟกระแสตรงจะมีจำนวนโนด เท่ากับ ผลรวมของจำนวนสถานีจ่ายไฟและขบวนรถไฟฟ้าที่กำลังเคลื่อนที่บนรางวิ่ง โดยสถานีผู้โดยสารจะไม่ถูกนำมาพิจารณาเป็น

โนดด้วย ทั้งนี้ ตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าและสถานีจ่ายไฟจะต้องไม่อยู่ในตำแหน่งที่ซ้อนทับกัน การกำหนดจำนวนโนดจึงขึ้นอยู่กับเพียงจำนวนสถานีจ่ายไฟและขบวนรถไฟฟ้าเท่านั้น การทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะเป็นพลวัตที่มีค่าแปรผันไปตามเวลาและตำแหน่งที่รถไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่อยู่บนรางตามตารางการให้บริการ (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 เพื่อจำลองและหาผลเฉลยการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าร่วมกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีฉีดกระแสในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งจะทำได้ผลเฉลยในรูปของค่าความเร็ว ตำแหน่งการเคลื่อนที่ แรงฉุดลาก แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า เป็นต้น ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรอบการคำนวณตามโหมดการทำงาน และตำแหน่งของรถไฟฟ้าบนรางวิ่ง 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 การวิ่งในทิศทางขึ้น (up-track) จากสถานี W01 ไป S12 และการวิ่งในทิศทางลง (down-track) จาก S12 ไป W01 โดยมีโครงร่างความเร็วของขบวนรถไฟฟ้าแต่ละขบวน แสดงดังรูปที่ 4.9 และความเร็วในการเดินขบวนรถจะมีรอบแตกต่างกันระหว่างวันทำการปกติและวันหยุด แสดงดังตารางที่ 4.3 และเมื่อถึงแต่ละสถานีผู้โดยสารขบวนรถไฟฟ้าจะหยุดรับ-ส่งผู้โดยสารประมาณ 20–

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



รูปที่ 4.7 ระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม

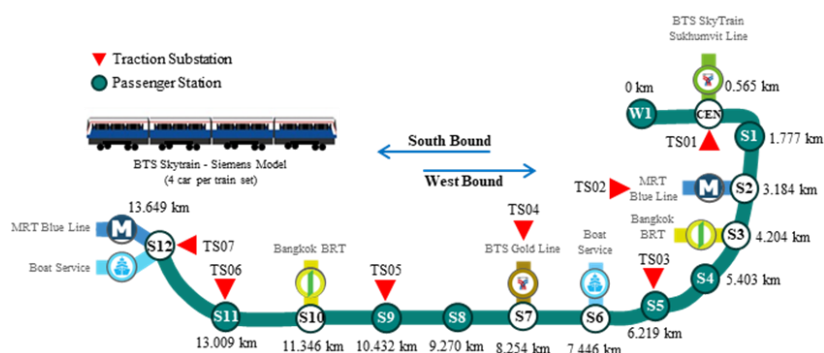
(ที่มาภาพ: <https://www.prachachat.net/general/news-1710173> [เข้าถึงเมื่อ 24 พฤษภาคม 2568])

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

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจำเพาะระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม (ต่อ)

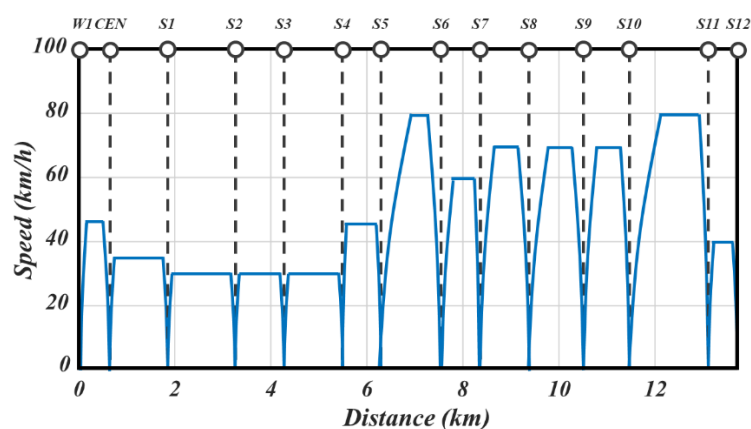
พารามิเตอร์	ค่า (หน่วย)
สัมประสิทธิ์ความต้านทานของเดวิส	$A = 4,025$, $B = 118.67$, and $C = 0.8710$
ประสิทธิภาพ	
- เกียร์	98 %
- มอเตอร์	88 %
- อินเวอร์เตอร์	98 %
กำลังไฟฟ้าโหลดอื่น ๆ	270 กิโลวัตต์
กราฟแรงฉุดลากและแรงเบรก	รูปที่ 4.10
พารามิเตอร์ระบบจ่ายไฟ	
สถานีจ่ายไฟย่อย	7 สถานี
- แรงดันไฟฟ้าไร้โหลด	790 โวลต์
- กำลังไฟฟ้า	2,550 กิโลวัตต์แอมป์ (CEN, S02, S05, S07)
	3,300 กิโลวัตต์แอมป์ (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)
อื่น ๆ	
- ความลาดชันสูงสุด	6 %



รูปที่ 4.8 รายการสถานีผู้โดยสารบนเส้นทางระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลตำแหน่งสถานีผู้โดยสารและสถานีจ่ายไฟในระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม

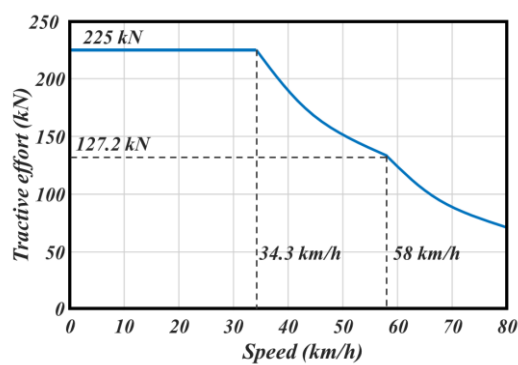
สถานีผู้โดยสาร	รหัสสถานีผู้โดยสาร	ตำแหน่ง (กิโลเมตร)	สถานีจ่ายไฟ
สนามกีฬาแห่งชาติ (National Stadium)	W1	0	-
สยาม (Siam)	CEN	0.565	TS01
ราชดำริ (Ratchadamri)	S1	1.777	-
ศาลาแดง (Sala Daeng)	S2	3.184	TS02
ช่องนนทรี (Chong Nonsi)	S3	4.204	-
เซนต์หลุยส์ (Saint Louis)	S4	5.403	-
สุรศักดิ์ (Surasak)	S5	6.219	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	-
วุดมาการศ (Wutthakat)	S11	13.009	TS06
บางหว้า (Bang Wa)	S12	13.649	TS07
สรุป	14 สถานี	13.649 กิโลเมตร	7 สถานี



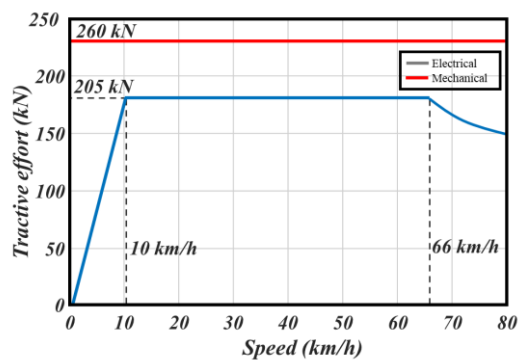
รูปที่ 4.9 โครงร่างความเร็วของขบวนรถไฟฟ้า

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



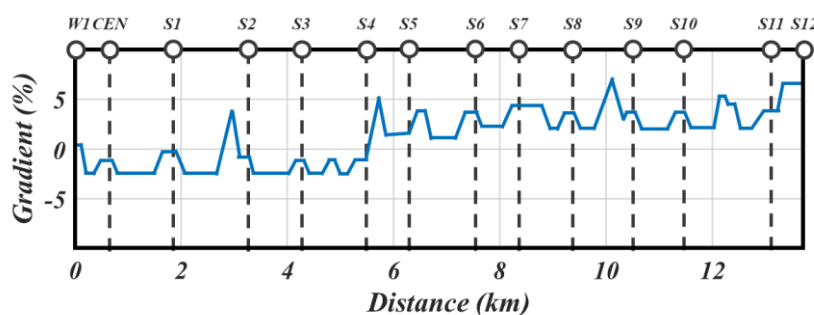
(ก) แรงฉุดลาก



(ข) แรงเบรก

รูปที่ 4.10 คุณลักษณะแรงฉุดลากและแรงเบรกของขบวนรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม

(ที่มาภาพ: ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ (2560))



รูปที่ 4.11 โครงร่างความชันของทางวิ่ง

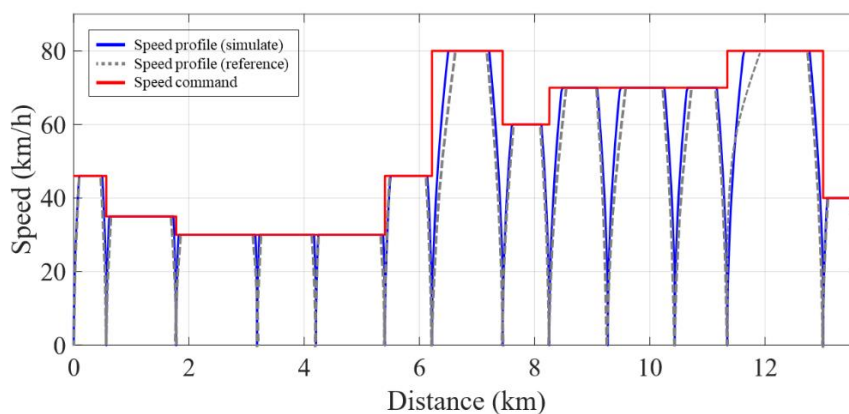
จากข้อมูลคุณลักษณะแรงฉุดลากและแรงเบรกของขบวนรถไฟฟ้าและระดับผลความชันเส้นทางวิ่ง แสดงดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าแรงฉุดลากสูงสุดของขบวนรถไฟฟ้าที่สามารถใช้ในการขับเคลื่อนมีค่า 225 กิโลนิวตัน ในขณะที่แรงเบรกสูงสุดของขบวนรถไฟฟ้ามีค่าอยู่ที่ 205 กิโลนิวตัน โดยตลอดเส้นทางการให้บริการจะมีค่าความชันของทางวิ่งอยู่ในช่วง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

4.2.4 การทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

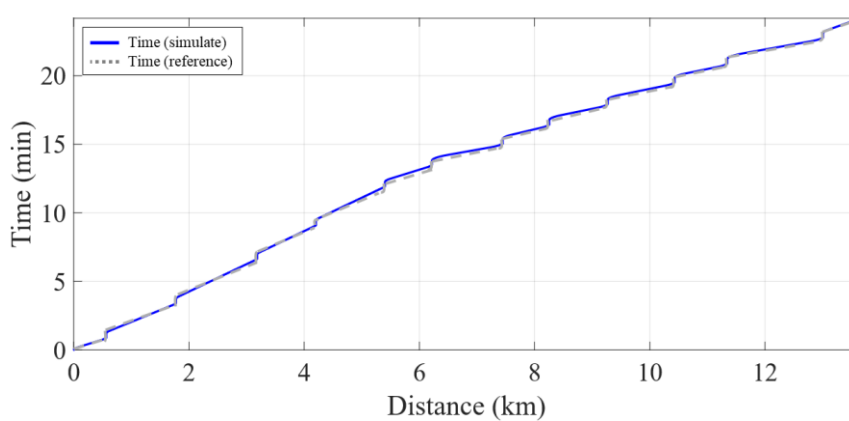
การทดสอบเพื่อตรวจสอบและประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการโดยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ การทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหนึ่งขบวน และการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวน รายละเอียดของการทดสอบในแต่ละส่วนได้นำเสนอไว้ดังต่อไปนี้

4.2.4.1 การทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหนึ่งขบวน

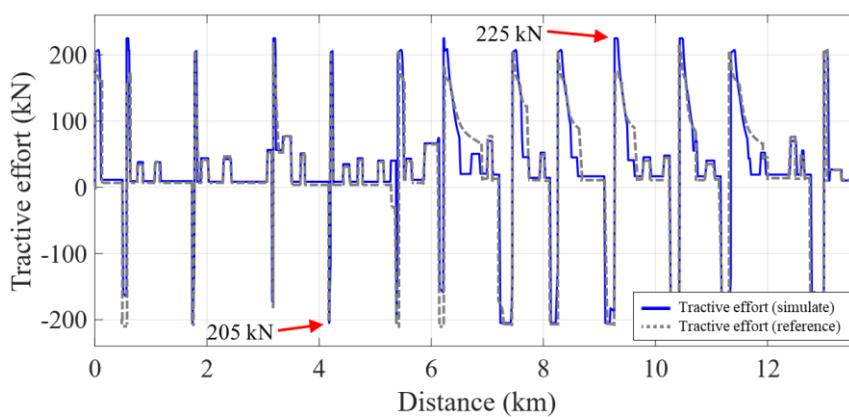
การทดสอบและประเมินผลจะกำหนดให้โครงร่างความเร็วที่ได้จากแบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสดรขขนส่งมวลชนมีลักษณะที่สอดคล้องกับโครงร่างความเร็วและข้อมูลจำเพาะอื่น ๆ ของขบวนรถไฟฟ้าที่เลือกใช้ในการจำลองจากงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องและได้รับการยอมรับในวงการวิชาการ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่พัฒนา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



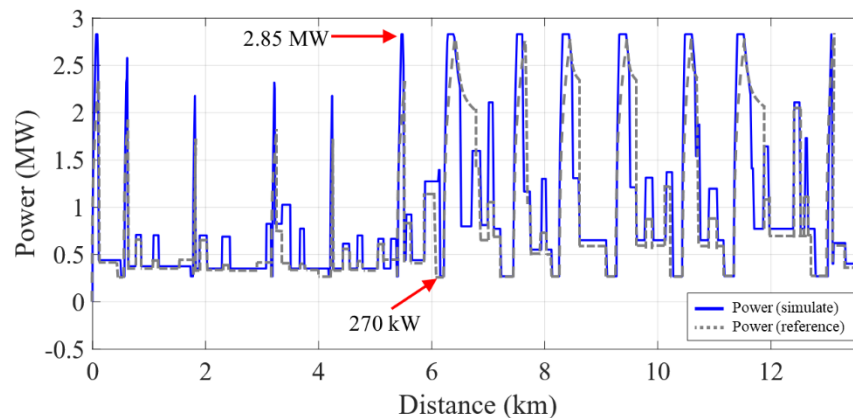
รูปที่ 4.12 ความเร็ว-ระยะทางของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน



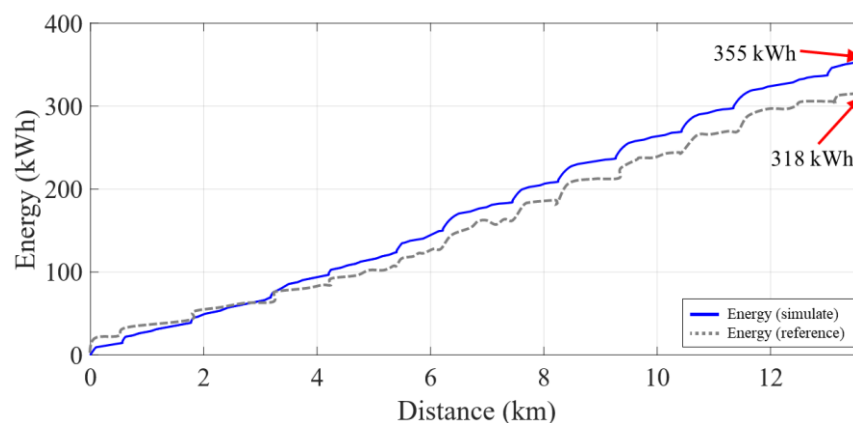
รูปที่ 4.13 เวลา-ระยะทางของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน



รูปที่ 4.14 แรงฉุดลากรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน



รูปที่ 4.15 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน

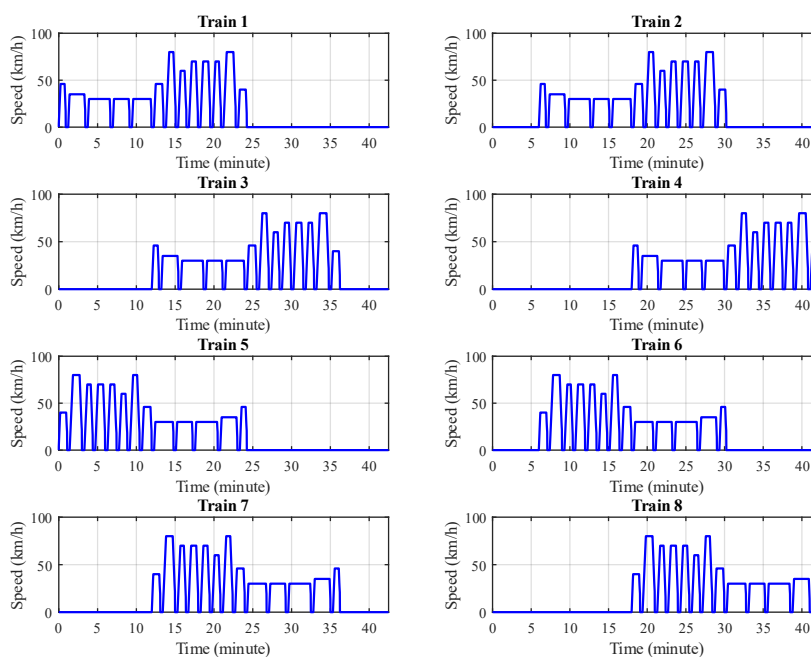


รูปที่ 4.16 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน

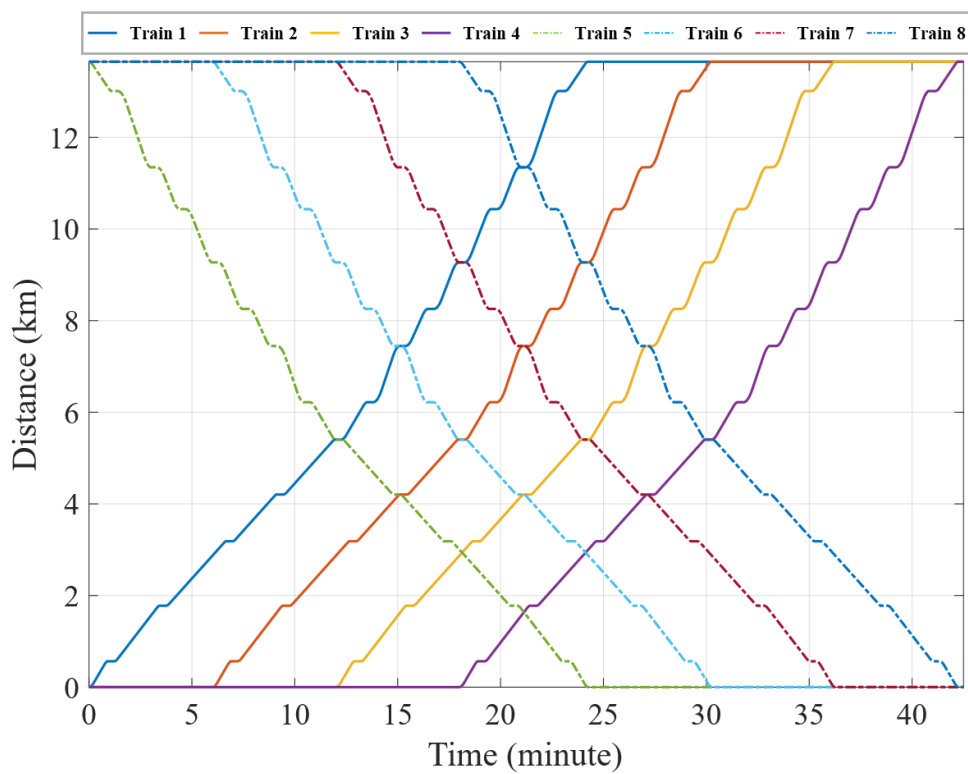
จากผลการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหนึ่งขบวน ดังรูปที่ 4.12-4.16 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถหาผลเฉลยในรูปแบบกราฟของความเร็ว ระยะทาง แรงฉุดลาก กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนหนึ่งใช้ในการเคลื่อนที่ได้ อย่างมีประสิทธิภาพและครอบคลุมในทุกมิติของการวิเคราะห์ การตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยแต่ละกราฟพบว่าผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลอ้างอิงจากงานวิจัยในอดีตเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการ ตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบและวิธีการพัฒนาแบบจำลองที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม แนวโน้ม ลักษณะของผลที่ได้และความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการประยุกต์ใช้ ในเชิงการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ นอกจากนี้ ผลการตรวจสอบนี้ยืนยันความน่าเชื่อถือและความเหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาต่อยอดแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวน

4.2.4.2 การทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวน

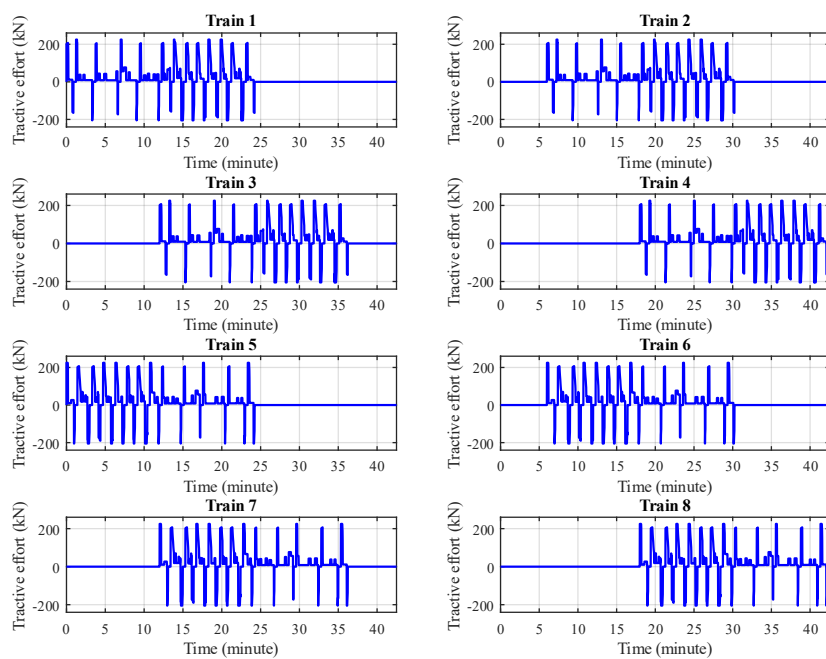
การทดสอบและประเมินผลในส่วนนี้เป็นการต่อยอดจากการจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนหนึ่งขบวนที่ได้ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือเรียบร้อยแล้ว การศึกษาในขั้นตอนนี้จะดำเนินการจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าจำนวน 8 ขบวน ภายใต้เงื่อนไขตารางเดินรถช่วงวันทำการปกติที่ทำการปล่อยขบวนรถไฟฟ้าด้วยความถี่ 6 นาที เพื่อทดสอบความสามารถของแบบจำลองในสภาวะการทำงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะกำหนดให้เส้นทางวิ่งของรถไฟฟ้าขบวนที่ 1-4 วิ่งในทิศทางขาขึ้นจากสถานีสนามกีฬาแห่งชาติ (W1) ไปยังสถานีบางหว้า (S12) และรถไฟฟ้าขบวนที่ 5-8 เคลื่อนที่ในทิศทางขาลงหรือส่วนทางกลับจากเส้นทางขาขึ้นจนกว่ารถไฟฟ้าทุกขบวนจะทำการวิ่งครบหนึ่งรอบ สมบูรณ์ด้วยโครงร่างความเร็วที่มีลักษณะเหมือนกันทุกขบวน วัตถุประสงค์ของการทดสอบคือการประเมินความสามารถของแบบจำลองในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวนพร้อมกันได้ อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ การทดสอบจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของแบบจำลองในการจัดการกับความซับซ้อนของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีการปฏิบัติการหลายขบวนในเวลาเดียวกัน รวมถึงการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างขบวนรถและการใช้พลังงานรวมของระบบ ผลการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหลายขบวน แสดงดังรูปที่ 4.17-4.21



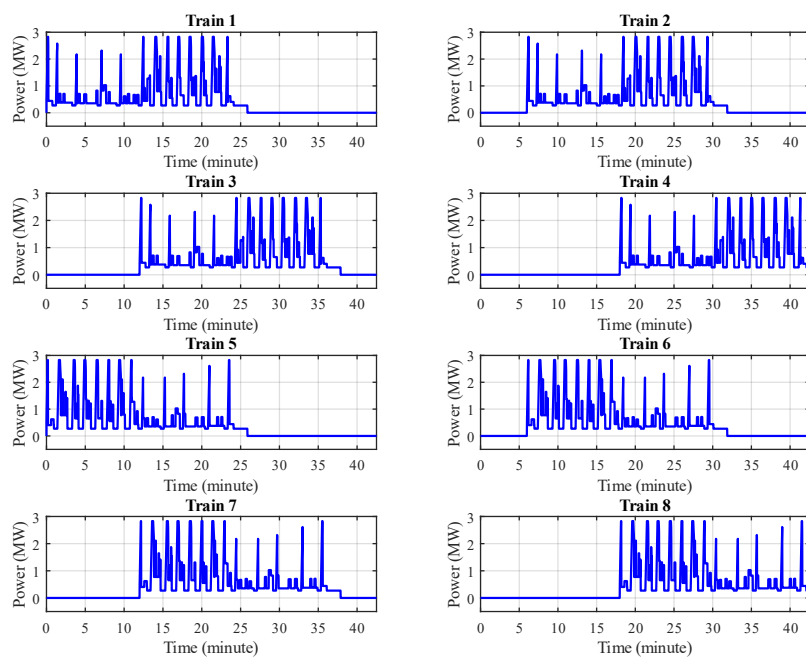
รูปที่ 4.17 ความเร็ว-ระยะทางของรถไฟฟ้าหลายขบวน



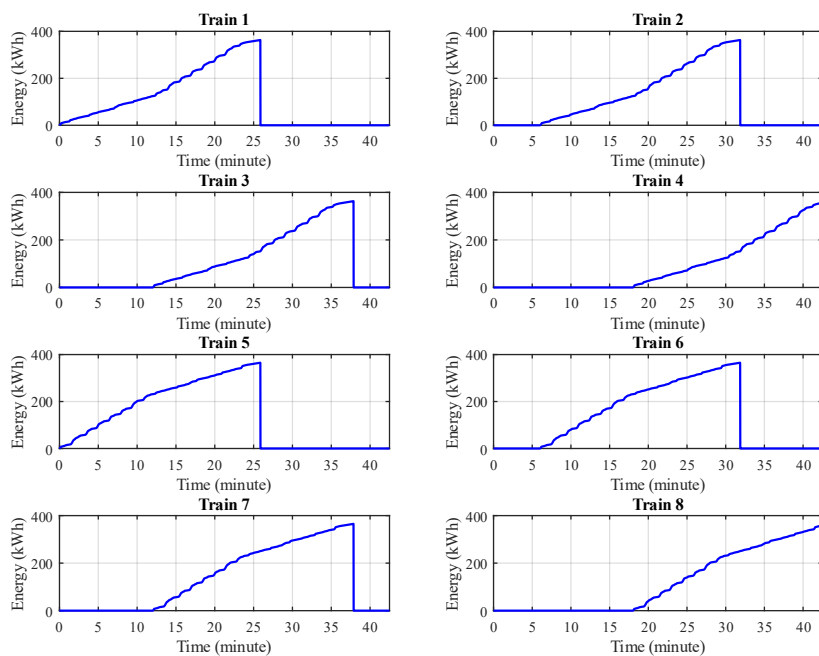
รูปที่ 4.18 ระยะทาง-เวลาของรถไฟฟ้าหลายขบวน



รูปที่ 4.19 แรงฉุดลากรถไฟฟ้าหลายขบวน



รูปที่ 4.20 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวน



รูปที่ 4.21 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวน

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

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

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ลำดับ	การเคลื่อนที่ของ ขบวนรถไฟฟ้า (ระหว่างสถานี ผู้โดยสาร)	ผลการทดสอบ				
		ระยะทาง (km)	ความเร็ว สูงสุด (km/h)	เวลา เคลื่อนที่ (min)	กำลัง ไฟฟ้า เฉลี่ย (MW)	พลังงาน ไฟฟ้า สะสม (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

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (ต่อ)

ลำดับ	การเคลื่อนที่ของ ขบวนรถไฟฟ้า (ระหว่างสถานี ผู้โดยสาร)	ผลการทดสอบ				
		ระยะทาง (km)	ความเร็ว สูงสุด (km/h)	เวลา เคลื่อนที่ (min)	กำลัง ไฟฟ้า เฉลี่ย (MW)	พลังงาน ไฟฟ้า สะสม (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-กรุง ธนบุรี	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

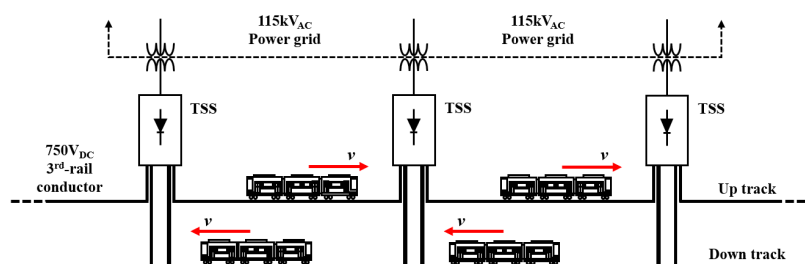
หมายเหตุ ข้อมูลในส่วนนี้ไม่ได้รวมกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับโหลดต่าง ๆ ระหว่างจอดที่สถานีผู้โดยสาร ซึ่งการจอดแต่ละสถานีผู้โดยสารจะใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยและพลังงานไฟฟ้ารวม เท่ากับ 0.27 เมกะวัตต์ และ 1.51 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ

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

4.3 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

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

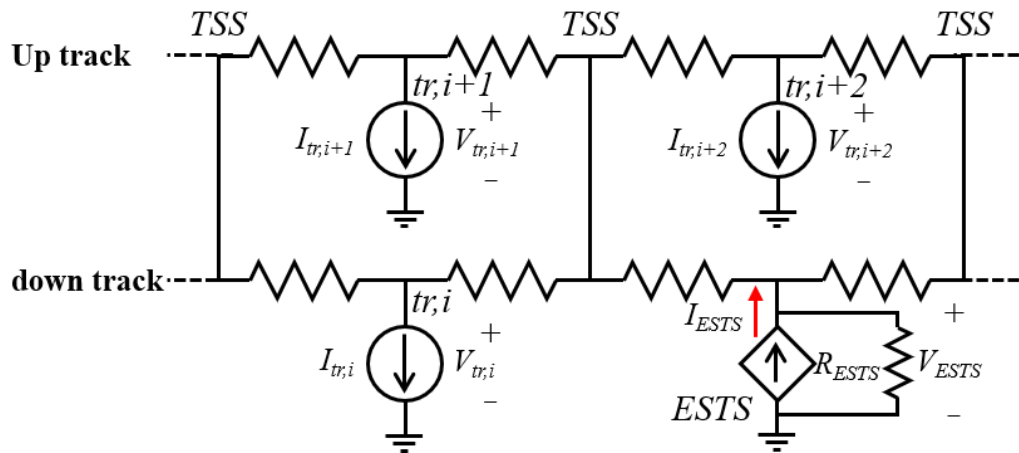
4.3.1 การพัฒนาแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน



รูปที่ 4.22 โครงสร้างสำหรับพัฒนาแบบจำลองการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

แบบจำลอง ESTS ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟสำรองที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าในช่วงเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง โดยแบบจำลองถูกพัฒนาในรูปของวงจรสมมูลอันดับของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (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 การกำหนดโหนดกริดไฟฟ้า การคำนวณเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า การสร้างสมการโหนด 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} ใช้แทนผลของความต้านทานภายในของแบตเตอรี่และวงจรประกอบที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกขณะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหนดของ ESTS และ I_d คือกระแสไฟฟ้ารวมที่ ESTS จ่ายไปยังขบวนรถไฟที่ติดตั้งระบบและขบวนรถไฟอื่น ทั้งนี้ ค่าเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับแรงดันเปิดวงจรที่ขั้วของ ESTS (ESTS open-circuit voltage: V_{OC}) ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ ESTS (ESTS voltage: V_{ESTS}) ในสถานะที่ไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหนด ($I_d = 0$) แสดงดังสมการที่ 4.1

$$I_{eq} = \frac{V_{OC}}{R_{ESTS}} \quad (4.1)$$

เมื่อ ESTS จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหนด จะเกิดกระแสไหลรวมที่ไหลออกจากโหนด V_{ESTS} เท่ากับ I_{ESTS} ดังนั้น จากกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่โหนดดังกล่าว แสดงดังสมการที่ 4.2

$$I_{ESTS} = I_{eq} - \frac{V_{ESTS}}{R_{ESTS}} \quad (4.2)$$

เมื่อแทนสมการที่ 4.1 ลงในสมการที่ 4.2 จะได้ความสัมพันธ์ในรูปวงจรสมมูลเทเวนิน แสดงดังสมการที่ 4.3

$$V_{ESTS} = V_{OC} - I_{ESTS} R_{ESTS} \quad (4.3)$$

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

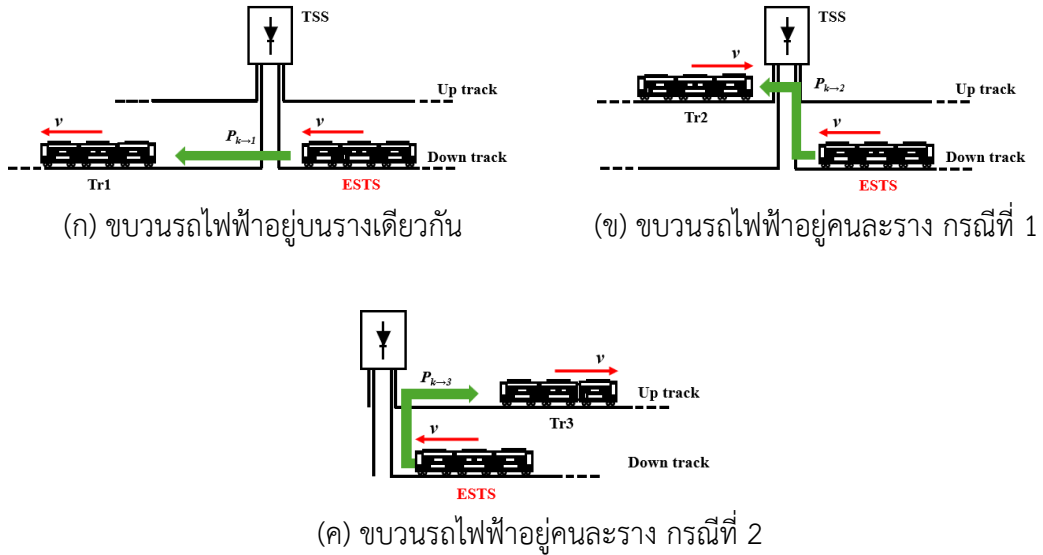
$$R_{tr,i} = \frac{V_{ref}^2}{P_{ESTS \rightarrow tr,i}} \quad (4.4)$$

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

$$V_{tr,self} = V_{ESTS} \quad (4.5)$$

สำหรับกรณีที่ ESTS แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไปยังขบวนรถไฟฟ้าอื่น จำเป็นต้องพิจารณาระยะทางไฟฟ้าระหว่าง ESTS และขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า โดยการคำนวณระยะทางให้สอดคล้องกับโครงสร้างจริงของระบบทางวิ่งรางคู่ ซึ่งหาก ESTS กับขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าอยู่บนรางเดียวกัน ระยะทางจะถูกคำนวณจากระยะทางโดยตรงระหว่าง

ตำแหน่งของขบวนทั้งสอง แต่หาก ESTS กับขบวนรถไฟที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าอยู่คนละราง กระแสไฟฟ้าต้องไหลผ่านจุดเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าที่ให้ผลรวมระยะทางน้อยที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.24 ซึ่งสามารถสรุปเป็นสมการคำนวณระยะทาง แสดงดังสมการที่ 4.6



รูปที่ 4.24 ระยะทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจากระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินไปยังขบวนรถไฟ

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

โดยที่ x_{ESTS} คือตำแหน่งของ ESTS $x_{tr,i}$ คือตำแหน่งของรถไฟขบวนที่ i และ x_{TSS} คือตำแหน่งของสถานีไฟฟ้า ระยะทางดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นความต้านทานของเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของรถไฟขบวนที่ i แสดงดังสมการที่ 4.7 การใช้ครั้งหนึ่งของความต้านทานรางวิ่งเป็นการลดรูปผลของเส้นทางกลับกระแสไฟฟ้าให้เหมาะกับแบบจำลองในระดับระบบ ทั้งนี้ ระยะทางสูงสุดสำหรับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ากำหนดจากข้อจำกัดแรงดันไฟฟ้าตกและกระแสไฟฟ้าสูงสุด แสดงดังสมการที่ 4.8 โดยขบวนรถไฟที่จะถูกนำเข้ามาเป็นโหนดในวงจรย่อยของ ESTS ต้องมีระยะทางจาก ESTS ไปยังขบวนรถไฟที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเป็นไปตามเงื่อนไข แสดงดังสมการที่ 4.9 โดยเงื่อนไขดังกล่าวใช้เป็นเกณฑ์คัดกรองเบื้องต้นเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าภายใต้ข้อจำกัดด้านแรงดันไฟฟ้าตก ทั้งนี้ เงื่อนไขดังกล่าวเป็นการแทนกลไกการทำงานของขบวนรถไฟ กล่าวคือ แม้ขบวนรถไฟจะได้รับแรงดันไฟฟ้าจาก ESTS แต่หาก

แรงดันไฟฟ้าที่ได้รับมีค่าต่ำกว่าระดับมาตรฐาน ขบวนรถไฟฟ้าจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ อย่างไรก็ตาม หลังจากผ่านเงื่อนไขด้านระยะทางแล้ว แบบจำลองจะยังคงตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าจริงของขบวนรถไฟฟ้าจากผลการแก้สมการโนดอีกครั้ง เพื่อยืนยันว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับไม่ต่ำกว่าค่าขั้นต่ำที่กำหนด

$$R_{line/km} = R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2} \quad (4.7)$$

$$R_{m,n} = d_{m,n} \times R_{line/km} \quad (4.8)$$

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

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

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

เมทริกซ์ความนำไฟฟ้าของวงจรย่อยมีรูปทั่วไปดังสมการที่ 4.11 โดยสมาชิกในแนวทแยงหลักเป็นผลรวมของความนำไฟฟ้าทุกแบบที่ต่อกับโนดนั้น และสมาชิกนอกแนวทแยงมีค่าเป็นลบของความนำไฟฟ้าระหว่างโนดที่เชื่อมกัน

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

เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าชนิดมีเพียงโนด ESTS ที่รับกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายวงจร สมมูลนอร์ตัน แสดงดังสมการที่ 4.12

$$I = \begin{bmatrix} I_{eq} & 0 & \cdots & 0 & I_{tr,1} & \cdots & I_{tr,N_r} \end{bmatrix}^T \quad (4.12)$$

จากกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่ทุกโนดของวงจร สามารถจัดรูปเป็นระบบสมการเชิงเส้นในรูปเมทริกซ์ แสดงดังสมการที่ 4.13

$$G V = I \quad (4.13)$$

สำหรับการหาผลเฉลยของแบบจำลองจะทำการหาค่าแรงดันไฟฟ้าของทุกโนดในวงจรย่อยโดยการแก้ระบบสมการเชิงเส้นโดยตรง แสดงดังสมการที่ 4.14

$$V = G^{-1} I \quad (4.14)$$

จากสมการนี้ต้องการหาผลเฉลยร่วมกันหลายค่า โดยคำนวณแบบวนซ้ำจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของ V_i ที่มีผลต่างมากที่สุดระหว่างรอบที่ k และ $k + 1$ จะต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

$$\mathcal{E}_V^{(k)} = \max |V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}| < 0.001V \quad (4.15)$$

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

$$I_{m,n} = \frac{V_m - V_n}{R_{m,n}} \quad (4.16)$$

กระแสไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าได้รับจริง แรงดันไฟฟ้าตกในเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในเส้นทางคำนวณได้ดังสมการที่ 4.17 – 4.18

$$I_{tr,i} = \frac{P_{tr,i}}{V_{tr,i}} \quad (4.17)$$

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

เมื่อ ESTS จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้โหลดต่าง ๆ จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าของ ESTS (ESTS power: P_{ESTS}) มีค่าเท่ากับผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ชั่ว ESTS ที่จ่ายออกสู่โหลดภายนอกกับ กำลังไฟฟ้าสูญเสียภายใน ESTS ค่าพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ใน ESTS (ESTS energy: E_{ESTS}) และค่า สถานะการชาร์จของระบบ (State of Charge: %SOC) ที่คำนวณได้ในแต่ละรอบ ซึ่งมีการรวมผล ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเข้าไปด้วย เมื่อ Δt คือ ช่วงเวลาของการคำนวณ

$$P_{ESTS} = V_{ESTS} I_{ESTS} + I_{ESTS}^2 R_{ESTS} \quad (4.19)$$

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

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

นอกจากนี้ พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS ใช้ในหนึ่งช่วงเวลาและการลดลงของสถานะการ ชาร์จสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 4.22–4.23

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

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

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

$$P_{ESTS} \leq P_{ESTS,max} \quad (4.24)$$

$$I_{ESTS} \leq I_{ESTS,max} \quad (4.25)$$

$$V_{tr,i} \geq V_{min} \quad (4.26)$$

$$\%SOC \geq \%SOC_{min} \quad (4.27)$$

$$\sum_{i \in S_k} P_{k \rightarrow i} \leq P_{tr,i} \quad (4.28)$$

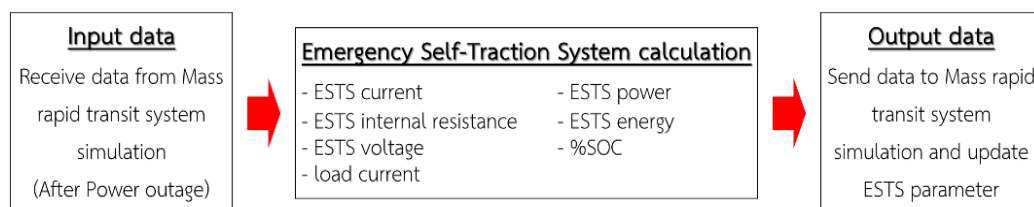
โดยที่ S_k คือ เซตของ ESTS ที่สามารถจ่ายไฟให้กับรถไฟฟ้าขบวนที่ k และ $P_{k \rightarrow i}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ ESTS ขบวนที่ k จ่ายให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ i

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

4.3.2 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

โครงสร้างการทำงานของแบบจำลอง ESTS ที่พัฒนาขึ้นมีกระบวนการคำนวณแบบต่อเนื่องตามเวลาที่กำหนด โดยแบบจำลองจะรับข้อมูลจากแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เช่น ตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้า รางที่ขบวนรถไฟฟ้าอยู่ ความเร็ว โหมดการเคลื่อนที่

กำลังไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับการขับเคลื่อน สถานะของขบวนรถไฟฟ้า สถานะของระบบจ่ายไฟหลัก รวมถึงพลังงานไฟฟ้าคงเหลือ สถานะการชาร์จของ ESTS ในแต่ละขบวน เป็นต้น จากนั้นแบบจำลองจะตรวจสอบสถานะของระบบจ่ายไฟหลักเป็นลำดับแรก หากระบบจ่ายไฟยังทำงานปกติ แบบจำลองจะใช้ผลการคำนวณจากส่วนโครงข่ายระบบจ่ายไฟกระแสตรงตามปกติ แต่เมื่อเกิดสถานการณ์ไฟดับ และผ่านช่วงเวลารอคอยตามเงื่อนไขที่กำหนด แบบจำลองจะตรวจสอบว่าขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองหรือไม่ หากขบวนรถไฟฟ้าง่ายังหยุดอยู่ระหว่างสถานี ผู้โดยสารและต้องการกำลังไฟฟ้าสำหรับการเคลื่อนที่ ESTS ของขบวนนั้นจะเข้าสู่โหมดจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเองก่อน โดยโหนดของขบวนรถไฟฟ้าง่ายังจะถูกพิจารณาเป็นโหนดที่ต่ออยู่ที่โหนดเดียวกับขั้ว ESTS สามารถสรุปการทำงานของแบบจำลองได้ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

หลังจากพิจารณาการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS แล้ว แบบจำลองจะตรวจสอบขบวนรถไฟฟ้าอื่นที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS และยังคงค้างอยู่ระหว่างสถานี ผู้โดยสาร เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการรับพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS แต่ละชุดภายในระบบ การพิจารณาดังกล่าวอาศัยระยะทางไฟฟ้าตามโครงสร้างจริงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน กล่าวคือ หาก ESTS และขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้าอยู่บนรางเดียวกัน จะใช้ระยะทางระหว่างขบวนรถไฟฟ้าโดยตรง แต่หากอยู่คนละราง จะพิจารณาเส้นทางส่งพลังงานผ่านจุดเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าที่ให้ระยะทางรวมต่ำที่สุด 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 $GV = I$ 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	หากปกติคำนวณแบบสถานะไฟฟ้า แต่หากไฟดับใช้การคำนวณแบบ ESTS
4	ระบุ ESTS และรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า	เลือกขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS และขบวนรถไฟฟ้าที่หยุดค้าง
5	คำนวณระยะแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	คำนวณระยะทางของแต่ละโนดตามเงื่อนไขมาตรฐานที่กำหนด

ตารางที่ 4.5 ลำดับการทำงานของแบบจำลอง ESTS ในแต่ละช่วงเวลาการจำลอง (ต่อ)

ลำดับ	ขั้นตอน	รายละเอียด
6	ตรวจสอบเงื่อนไขระยะแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	ตัดขบวนรถไฟที่อยู่นอกขอบเขตการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า สมการที่ 4.9
7	จัดสรรกำลังไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้าตามความต้องการของโหลด สมการที่ 4.28
8	สร้างวงจรย่อย ESTS	อาศัยข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนลำดับที่ 5-6 มาสร้าง
9	แก้สมการ $G V = I$	หาแรงดันไฟฟ้าที่ชั่ว ESTS และขบวนรถไฟที่รับพลังงานไฟฟ้า 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	อัปเดตการเคลื่อนที่ของรถไฟและปรับรอบการคำนวณไป $t+\Delta t$

4.3.3 ตัวอย่างการคำนวณการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS

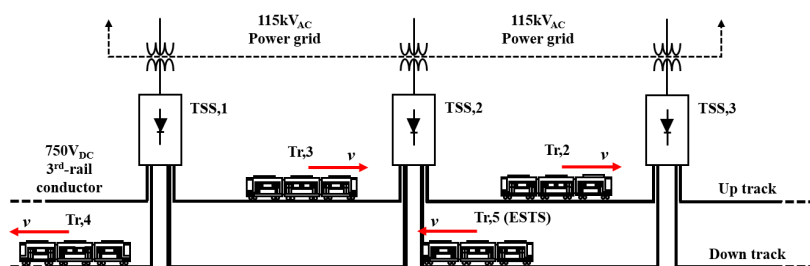
หัวข้อนี้นำเสนอตัวอย่างการคำนวณการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS ด้วยวิธีการผิกระแส เพื่อแสดงขั้นตอนการสร้างสมการโนด การกำหนดเมทริกซ์ความนำไฟฟ้า การแก้สมการแรงดันไฟฟ้า และการตรวจสอบข้อจำกัดของ ESTS อย่างเป็นระบบ ตัวอย่างนี้ใช้ข้อมูลจากผลการจำลอง กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$ ในช่วงรอบการทดสอบที่ 18 ณ เวลา 2,776 วินาที โดยในช่วงเวลาดังกล่าว ESTS ของรถไฟขบวนที่ 5 ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่รถไฟขบวนที่ 2 3 และ 4 โดยสำหรับกรณีตัวอย่างนี้ แบบจำลองพิจารณาวงจรย่อยเฉพาะบริเวณที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.26-4.27 โดยสถานีจ่ายไฟที่อยู่ในวงจรรย่อยประกอบด้วยโนดสถานีไฟฟ้า TSS,1 TSS,2 และ TSS,3 ทั้งนี้ TSS,2 อยู่ในตำแหน่งเดียวกับ ESTS ของรถไฟขบวนที่ 8 จึงสามารถรวมเป็นโนดเดียวกันได้ และกำหนดให้เป็นโนด TSS,2/ESTS นอกจากนี้ กรณีไฟฟ้าขัดข้องจะทำให้สถานีจ่ายไฟ TSS,1-TSS,3 ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟหลัก จึงไม่มีกระแสไฟฟ้าผิจากสถานีจ่ายไฟเข้าสู่วงจรรย่อย จะได้

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

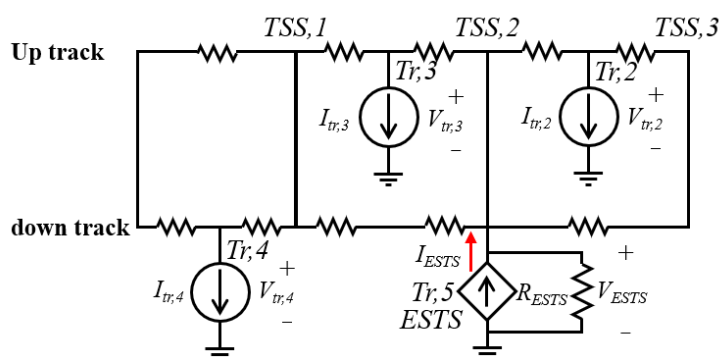
และ

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

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

$$\begin{aligned}
 I_{eq} &= V_{OC} \div R_{ESTS} \\
 &= 750 \div 0.0125 = 60,000A
 \end{aligned}$$

ทั้งนี้ I_{eq} ในสมการเป็นกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟในแบบจำลองสมมูลนอร์ตัน ไม่ใช่กระแสไฟฟ้าโหลดที่ ESTS จ่ายออกไปยังขบวนรถไฟโดยตรง กระแสไฟฟ้าโหลด I_{ESTS} ที่ ESTS จ่ายจริงจะหาได้จากการแก้สมการโนดของวงจรย่อยในขั้นตอนถัดไป โดยในสถานการณ์ที่พิจารณากำหนดให้ขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS ได้อพยพถึงสถานีผู้โดยสารแล้ว จึงไม่ต้องรับพลังงานไฟฟ้าสำหรับการขับเคลื่อนตนเองในช่วงเวลาที่พิจารณา นอกจากนี้ รถไฟฟ้าขบวนใดที่จะรับพลังงานไฟฟ้า จะต้องมีระยะทางสูงสุดไม่เกิน 3.47 กิโลเมตร จาก ESTS ขบวนไฟฟ้าขบวนที่ 5 ดังที่แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข. หากมีระยะทางไฟฟ้ามากกว่าค่านี้ แบบจำลองจะไม่นำรถไฟฟ้าขบวนนั้นเข้าสู่วงจรย่อยของ ESTS เนื่องจากมีความเสี่ยงที่แรงดันไฟฟ้าปลายทางจะต่ำกว่าค่าที่กำหนด

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

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

ของรถไฟฟ้าขบวนที่ 5 ตรงกับตำแหน่งของสถานีไฟฟ้างดงกล่าว 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/คนละคราง ผ่าน TSS
Tr,2	4.470	รับพลังงานไฟฟ้า/คนละคราง ผ่าน TSS

ความต้านทานสมมูลต่อระยะทางของเส้นทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานต่อหน่วยระยะทางของรางตัวนำและรางวิ่ง เท่ากับ 0.05 และ 0.02 โอห์มต่อกิโลเมตร ตามลำดับ โดยความต้านทานและความนำไฟฟ้าของแต่ละเส้นทางในวงจรย่อยคำนวณได้จากระยะทางระหว่างโนดที่เชื่อมต่อกัน แสดงดังตารางที่ 4.8

$$\begin{aligned}
 R_{line/km} &= R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2} \\
 &= 0.05 + (0.02 \div 2) = 0.06\Omega/km
 \end{aligned}$$

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

$$d_{TSS,2/ESTS,Tr,2} = 4.470 - 3.184 = 1.286\text{km}$$

$$R_{TSS,2/ESTS,Tr,2} = 1.286 \times 0.06 = 0.077\Omega$$

$$g_{TSS,2/ESTS,Tr,2} = 1 \div 0.077 = 12.960S$$

ความต้านทานและความนำไฟฟ้าของเส้นทาง Tr,2 - TSS,3

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

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

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

ตารางที่ 4.8 ความต้านทานของแต่ละเส้นทางในวงจรย่อย

เส้นทาง	ระยะทาง (km)	$R_{m,n} (\Omega)$	$g_{m,n} = 1/R_{m,n} (S)$
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

$$\begin{aligned}
 g_{ESTS} &= \frac{1}{R_{ESTS}} \\
 &= 1 \div 0.0125 = 80 S
 \end{aligned}$$

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

จะได้

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

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

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

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

จากค่าความนำไฟฟ้าที่ได้ทั้งหมดนำไปคำนวณพจน์ย่อยต่าง ๆ สำหรับสร้าง G ที่มีขนาด 6×6 ตามจำนวนบัส ดังต่อไปนี้

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

$$\begin{aligned} G_{2,2} &= g_{TSS,1,TSS,2/ESTS} + g_{TSS,2/ESTS,TSS,3} + g_{TSS,2,Tr,2} + \\ &\quad g_{TSS,2,Tr,3} + g_{ESTS} \\ &= 6.364 + 5.492 + 12.960 + 9.781 + 80 \\ &= 114.596 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{3,3} &= g_{TSS,2/ESTS,TSS,3} + g_{TSS,3,Tr,2} \\ &= 5.492 + 9.529 \\ &= 15.021 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{4,4} &= g_{TSS,1,Tr,4} + g_{Tr,4} \\ &= 38.314 + 0.167 \\ &= 38.481 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{5,5} &= g_{TSS,1,Tr,3} + g_{TSS,2,Tr,3} + g_{Tr,3} \\ &= 18.215 + 9.781 + 0.821 \\ &= 28.817 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{6,6} &= g_{TSS,2,Tr,2} + g_{TSS,3,Tr,2} + g_{Tr,2} \\ &= 12.960 + 9.529 + 0.612 \\ &= 23.101 \end{aligned}$$

ดังนั้น เมทริกซ์ G คือ

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

รอบที่ 0: 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

$$I_{tr,4}^{(0)} = P_{tr,4} \div V_{tr,4}^{(0)} = (93.779 \times 10^3) \div 750 = 125.039A$$

$$I_{tr,3}^{(0)} = P_{tr,3} \div V_{tr,3}^{(0)} = (461.690 \times 10^3) \div 750 = 615.587A$$

$$I_{tr,2}^{(0)} = P_{tr,2} \div V_{tr,2}^{(0)} = (344.531 \times 10^3) \div 750 = 459.375A$$

ดังนั้น

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

รอบที่1: เมื่อแก้ระบบสมการเชิงเส้นดังกล่าว จะได้

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

จะได้

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

ค่าความคลาดเคลื่อนแรงดันไฟฟ้ากำหนดเป็น

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

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

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

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

ดังนั้น

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

เนื่องจาก ค่าความคลาดเคลื่อนแรงดันไฟฟ้าเกินค่าที่กำหนด จึงต้องหาค่า $I^{(l)}$ สำหรับรอบการคำนวณถัดไปด้วยการนำค่า V เข้ามาช่วยปรับ I จนกว่าค่าตอบจะลู่เข้า

ตารางที่ 4.9 สรุปการหาผลเฉลี่ยในแต่ละรอบ

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 โดยค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเกิดขึ้นที่ทรานซิสเตอร์ไฟฟ้าขบวนที่ 3 ซึ่งเป็นขบวนที่อยู่คนละรางและมีระยะทางไฟฟ้ามากที่สุด หลังจากทราบค่าแรงดันไฟฟ้าแล้วหากระแสไฟฟ้าที่ไหลไปยังทรานซิสเตอร์ต่าง ๆ คำนวณจาก

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

จะได้

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

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

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

กระแสไฟฟ้าของ ESTS คำนวณจากความสัมพันธ์ของวงจรสมมูลนอร์ตัน

$$\begin{aligned} I_{ESTS} &= I_{eq} - \frac{V_{ESTS}}{R_{ESTS}} \\ &= 60,000 - (736.029 \div 0.0125) = 1,117.680A \end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าที่ชั่ว ESTS คำนวณจาก

$$\begin{aligned} P_{ESTS} &= V_{ESTS} I_{ESTS} + I_{ESTS}^2 R_{ESTS} \\ &= (736.029 \times 1,117.680) - \\ &\quad (1,117.680^2 \times 0.0125) \\ &= 807.030kW \end{aligned}$$

หากกำหนดให้ช่วงเวลาการคำนวณของแบบจำลองในกรณีนี้เท่ากับ $\Delta t = 1$ วินาที พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS จ่ายออกในช่วงเวลานี้คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \Delta E_{ESTS} &= \frac{P_{ESTS} \Delta t}{3,600} \\ &= (807.030 \times 1) \div 3,600 = 0.224kWh \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดความจุพลังงานไฟฟ้าพิกัดของ ESTS เท่ากับ $E_{rated} = 195$ กิโลวัตต์ชั่วโมง การลดลงของสถานะการชาร์จในช่วงเวลานี้คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \Delta SOC &= \frac{\Delta E_{ESTS}}{E_{rated}} \times 100 \\ &= (0.224 \div 195) \times 100 = 0.12\% \end{aligned}$$

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

พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS

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

$$807.03 \leq 2,700kW$$

กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ ESTS จ่ายออกได้

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

$$1,117.68 \leq 3,590A$$

แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ยอมรับได้ของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน

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

$$V_{tr,2} = 703.916 \geq 500V$$

$$V_{tr,3} = 679.833 \geq 500V$$

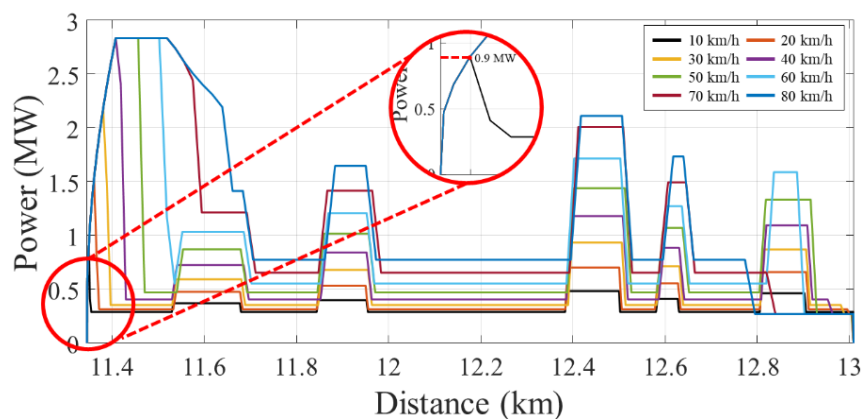
$$V_{tr,4} = 684.626 \geq 500V$$

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 กระแสไหลรวม ความต้านทานของเส้นทาง ข้อจำกัดด้านกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุด ตลอดจนสถานะการชาร์จของ ESTS ในแต่ละช่วงเวลาการจำลอง

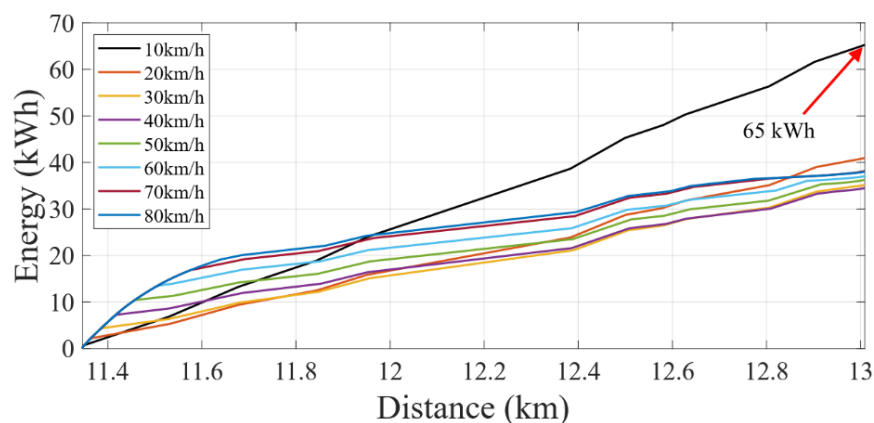
ซึ่งการใช้วิธี CIM ช่วยให้สามารถวิเคราะห์และตรวจสอบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของระบบแบ่งปันพลังงานได้อย่างเป็นระบบ

4.3.4 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

การกำหนดขนาดความจุของ ESTS อ้างอิงผลการจำลองจากหัวข้อที่ 4.2 โดยพิจารณากรณีที่ระบบต้องจ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อขบวนรถไฟฟ้าหยุดอยู่บริเวณกึ่งกลางระหว่างสถานีตลาดพลู-วุฒากาศที่มีระยะห่างมากที่สุด เท่ากับ 1.663 กิโลเมตร ทั้งนี้ การคำนวณอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้าแปรผันตามระยะทางแบบเชิงเส้น เพื่อให้สามารถประมาณพลังงานสำรองที่จำเป็นต่อการเคลื่อนที่ฉุกเฉินได้อย่างเป็นระบบ และสะท้อนกรณีวิกฤตที่ ESTS ต้องรองรับภายใต้เงื่อนไขการหยุดค้างระหว่างสถานีที่มีระยะห่างมากที่สุด



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องขับเคลื่อนรถไฟฟ้า



รูปที่ 4.29 การใช้พลังงานไฟฟ้าขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่าง ๆ

สำหรับการออกแบบ ESTS ต้องนำค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ครึ่งช่วงระยะทางของคู่สถานีผู้โดยสารดังกล่าวมาพิจารณา โดยคำนึงถึงขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบต้องรองรับด้วย เนื่องจากกำลังไฟฟ้าส่งผลโดยตรงต่อขนาดของ ESTS ที่ทำการออกแบบ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าต้องการ พบว่าการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าด้วยความเร็ว 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดของขบวนรถไฟฟ้าหนึ่งขบวนไม่เกิน 0.9 เมกะวัตต์ เป็นเวลาไม่เกิน 10 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.28 ขณะที่พลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้สำหรับการเคลื่อนที่ตลอดช่วงระหว่างสถานีผู้โดยสาร เท่ากับ 65 กิโลวัตต์ ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.29 ดังนั้น หากพิจารณาการอพยพไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดจากตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างสถานี พลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำสำหรับรถไฟฟ้าหนึ่งขบวนมีค่าประมาณ 32.5 กิโลวัตต์ ชั่วโมง 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

สัดส่วนการแบ่งปัน พลังงานไฟฟ้า	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 นำค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการสำรองในระบบมาพิจารณา ร่วมกับข้อมูลเซลล์แบตเตอรี่ชนิด LTO ตามที่แสดงในตารางที่ 3.9 เป็นกรณีศึกษา โดยแบตเตอรี่ LTO ที่เลือกใช้คือ Toshiba SCiB™ 23Ah ซึ่งเป็นที่นิยมในการใช้งานบนขบวนรถไฟฟ้าด้วยจุดเด่น ด้านความปลอดภัย ความทนทานต่อวัฏจักรการใช้งาน และความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูง เมื่อพิจารณาข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่มาประกอบการคำนวณตามหลักการออกแบบ แบตเตอรี่พื้นฐาน ดังแสดงในภาคผนวก ก จะได้โครงสร้างของ ESTS ที่สอดคล้องกับพิกัดกำลังไฟฟ้า สูงสุดและความต้องการพลังงานของกรณีศึกษาที่กำหนดไว้ 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
Weight	720	1,438	2,158	kg

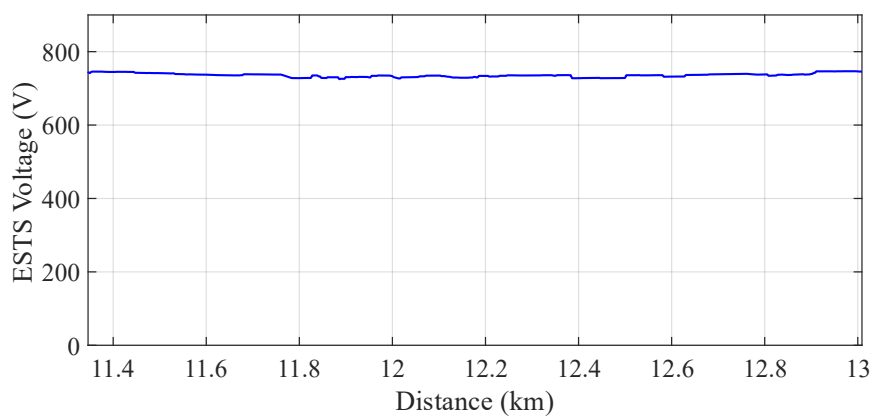
รูปที่ 4.30 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่แพ็ค Toshiba SCiB™ 23Ah

4.3.5 การทดสอบแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุดฉุด

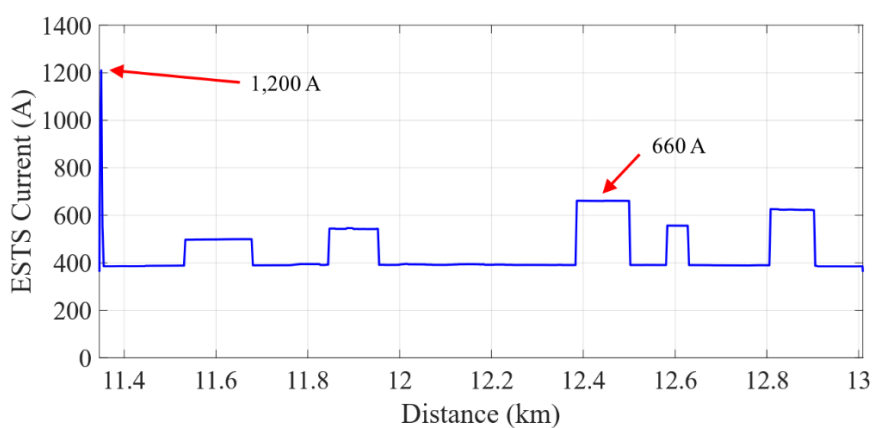
การทดสอบและประเมินสมรรถนะการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเอง ฉุดฉุดที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการโดยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ การทดสอบการทำงานทั่วไปของ แบบจำลอง และการทดสอบผลกระทบหลังจากนำระบบมาติดตั้ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.3.5.1 การทดสอบการทำงานทั่วไปของแบบจำลอง

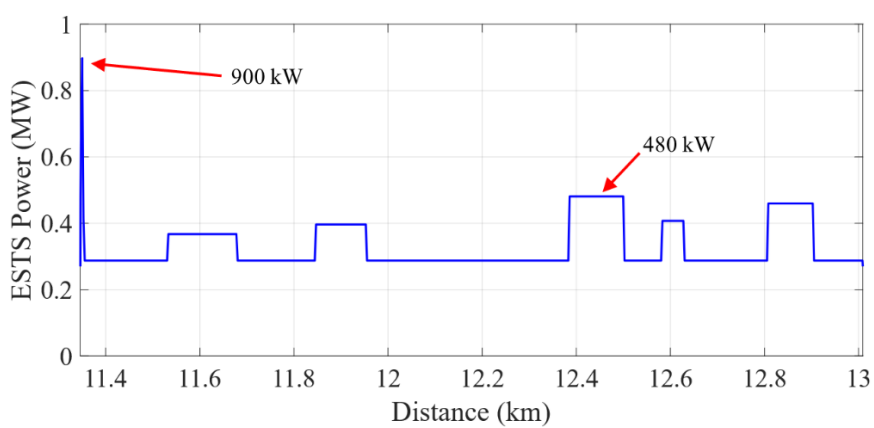
การทดสอบและประเมินผลในส่วนนี้ตรวจสอบพฤติกรรมการทำงานของ ระบบในแง่ผลตอบแทนของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และสถานะการชาร์จ การจำลองได้พิจารณาผลการทำงานของ ESTS ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าสำหรับการเคลื่อนที่ในบริเวณสถานีตลาด พลุ-วุฒากาศ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีระยะทางยาวที่สุดของเส้นทางที่ระบบให้บริการ โดยการจำลองนี้ช่วย ยืนยันสมรรถนะและความเหมาะสมของ ESTS ที่เพียงพอต่อการจ่ายไฟให้กับระบบแม่ขบวนรถไฟฟ้า จะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณอื่น ๆ ของเส้นทางให้บริการก็ตาม แสดงดังรูปที่ 4.31-4.35



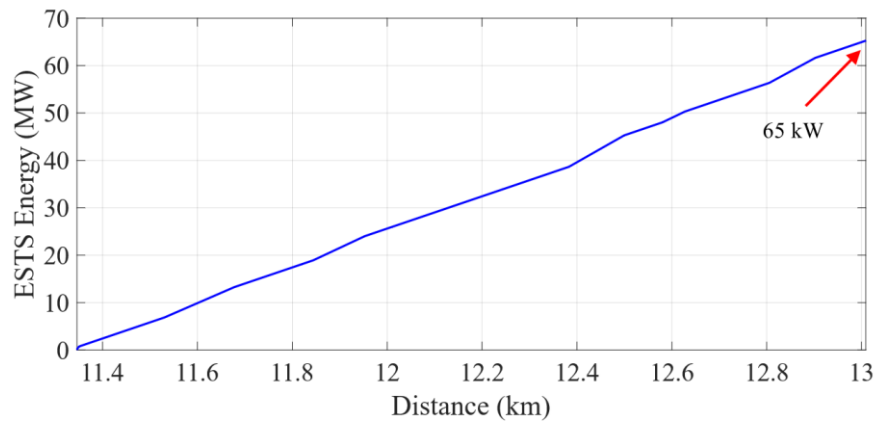
รูปที่ 4.31 แรงดันไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน



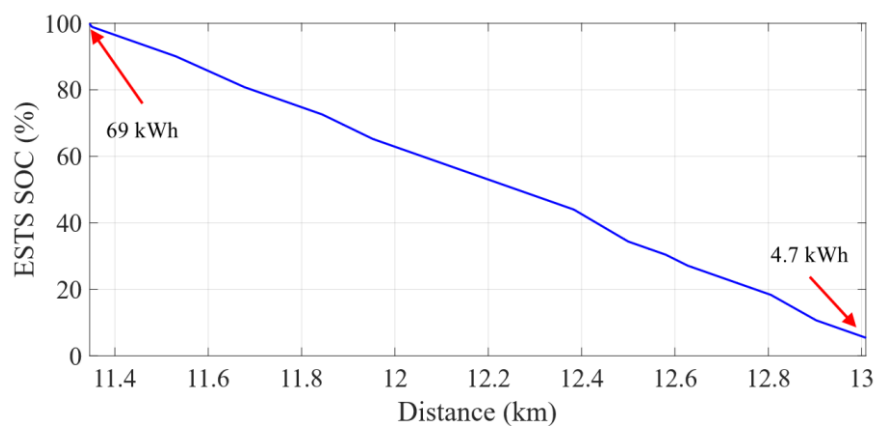
รูปที่ 4.32 กระแสไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน



รูปที่ 4.33 กำลังไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน



รูปที่ 4.34 พลังงานไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

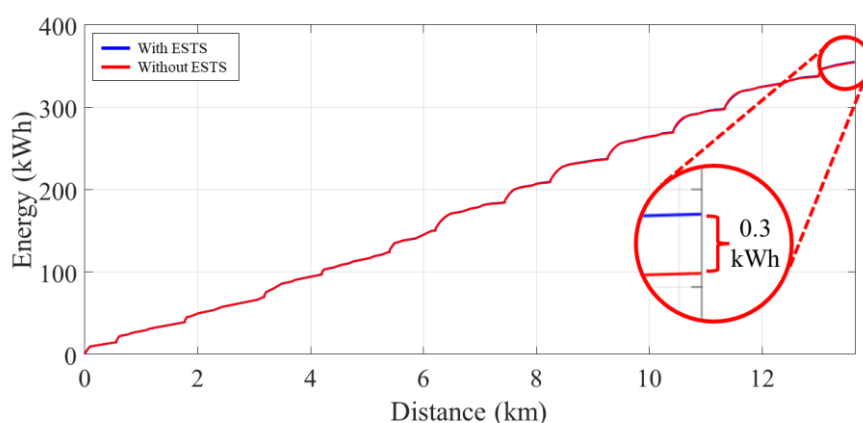


รูปที่ 4.35 สถานะการชาร์จ-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

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

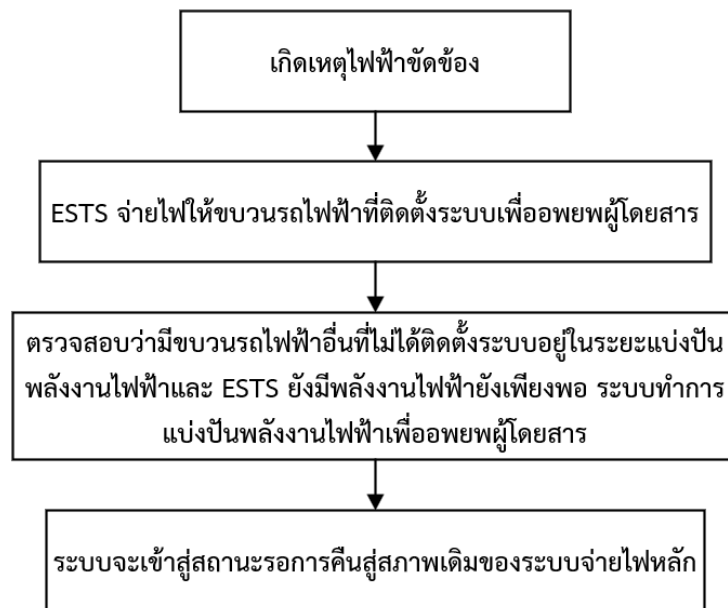
จากการพัฒนาและทดสอบสมรรถนะการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินที่สร้างขึ้นโดยอิงแบบจำลองอย่างง่ายในรูปของวงจรสมมูลนอร์ตัน พบว่าแบบจำลองสามารถแสดงผลการทำงานของ ESTS ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ครอบคลุมถึงพฤติกรรมของพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า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

4.4 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ส่วนนี้นำเสนอแบบจำลองแบบสมบูรณที่ผนวกแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเข้ากับแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินที่พัฒนาขึ้นในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ โดยสิ่งที่เพิ่มเติมจากหัวข้อก่อนหน้านี้คือการกำหนดเงื่อนไขสถานการณ์ไฟดับและลำดับการตอบสนองของระบบอย่างเป็นขั้นตอน เพื่อให้แบบจำลองทั้งสองส่วนทำงานประสานกันภายใต้กรอบการจำลองเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อทดสอบสมรรถนะในกรณีที่ ESTS จ่ายไฟให้ขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบและการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ติดตั้ง พร้อมประเมินปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ ESTS ต้องจ่ายและข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบยอมรับได้ กรอบการประเมินยึดข้อมูลการเดินรถจริงของระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม ระหว่างสถานีสนามกีฬาแห่งชาติ-บางหว้า เป็นกรณีศึกษา เพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมการเดินรถและภาระบรรทุกให้สอดคล้องกับสถานการณ์จริงมากที่สุด รายละเอียดเชิงวิธีการ ขั้นตอนการจำลอง พารามิเตอร์ที่ใช้ และผลการทดสอบนำเสนอไว้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

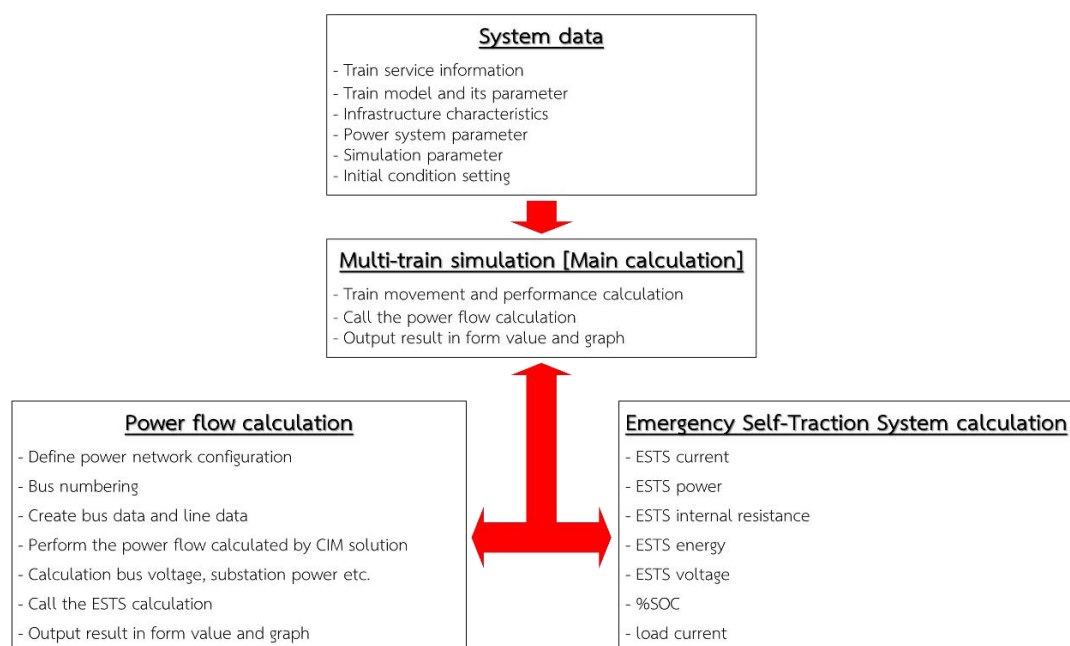
4.4.1 การทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

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



รูปที่ 4.37 แนวคิดของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่พัฒนาขึ้น สามารถสรุปโครงสร้างการทำงานของแบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 โครงสร้างแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

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

4.4.2 การทดสอบแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

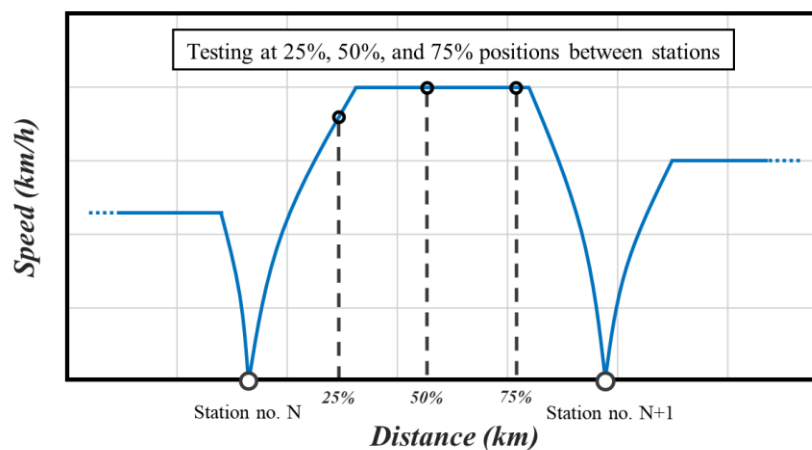
การทดสอบและประเมินสมรรถนะการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการโดยแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การทดสอบการทำงานของ ESTS ขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับ เพื่อตรวจสอบการตอบสนองของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในแง่ของความสอดคล้องกับพลวัตการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า และการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS เพื่อตรวจสอบลักษณะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.4.2.1 การทดสอบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับ

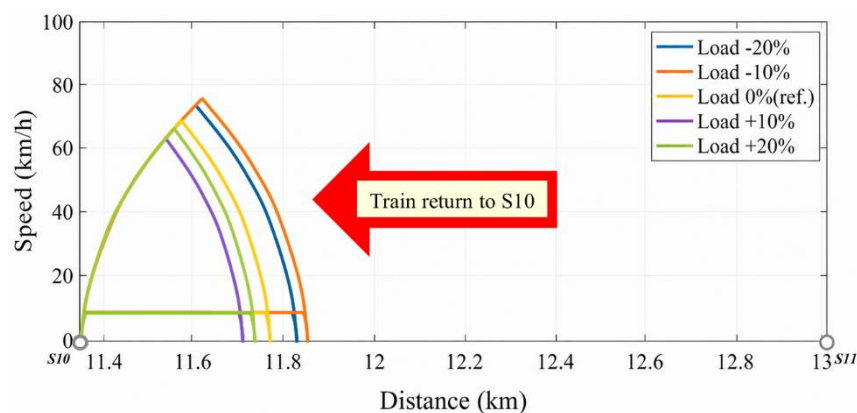
ภายหลังการกำหนดขนาดความจุของ ESTS ให้ครอบคลุมกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำที่จำเป็นต่อการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าที่หยุดชะงัก ณ ตำแหน่งใด ๆ ตลอดเส้นทางวิ่งเมื่อเกิดสถานการณ์ไฟดับ การประเมินสมรรถนะของระบบได้ดำเนินการโดยการจำลองสถานการณ์ไฟดับขณะขบวนรถไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 25%, 50% และ 75% ของช่วงระหว่างสถานีตลาดพลู-วุฒากาศ 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 ผลลัพธ์ถูกนำเสนอในรูปแบบกราฟเชิงเปรียบเทียบการทำงานของระบบขณะที่มีการปรับภาระโหลดขบวนรถไฟฟ้าตั้งแต่ -20% ถึง +20%

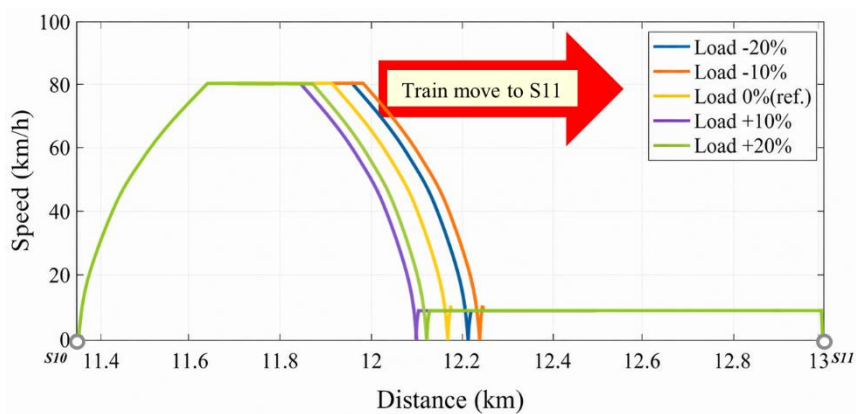
เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบในแง่ของพฤติกรรมเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.41-4.43 และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ดึงจาก ESTS ระหว่างการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.44-4.46 โดยผลดังกล่าวทำให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับภาระกับการเรียกใช้พลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ที่แปรตามตำแหน่งของการเกิดไฟดับ ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปสรุปแนวโน้มเชิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟไฟฟ้าและระบุพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริงตลอดช่วงเหตุฉุกเฉินได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลการจำลองยังสะท้อนความสามารถของระบบในการรองรับความผันแปรของภาระโหลดภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้าสำรอง และการกำหนดแนวทางออกแบบหรือปรับตั้งค่าระบบ ESTS ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น



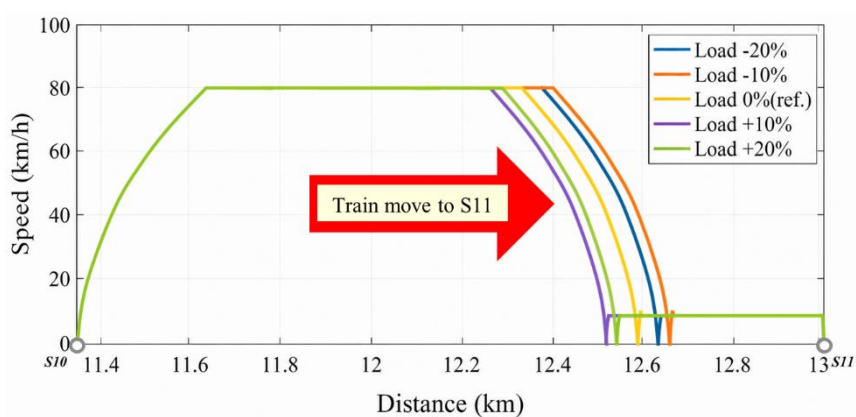
รูปที่ 4.40 ตำแหน่งจำลองสถานการณ์ไฟดับขณะขบวนรถไฟกำลังเคลื่อนที่



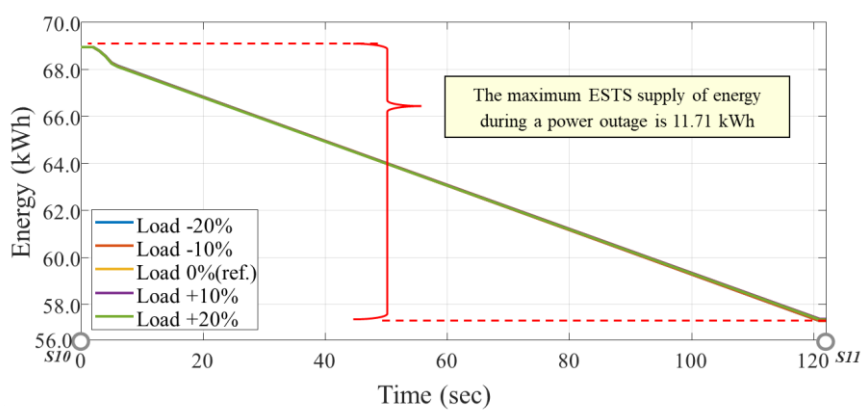
รูปที่ 4.41 การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 25% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร



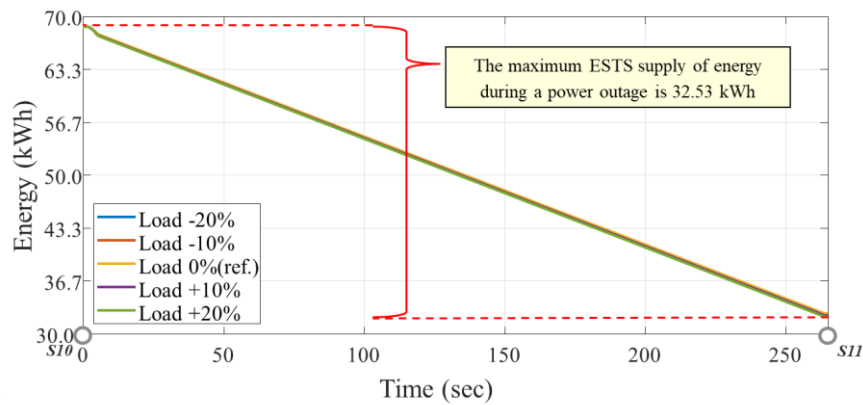
รูปที่ 4.42 การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 50% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร



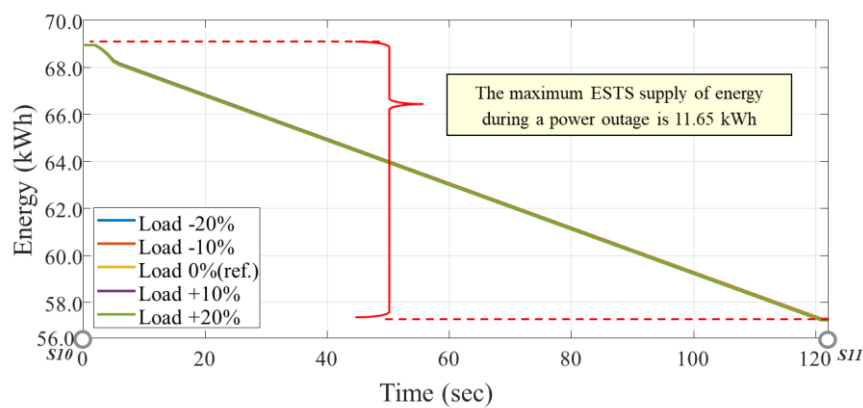
รูปที่ 4.43 การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 75% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร



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 พบว่าการเกิดสถานการณ์ไฟดับขณะ ขบวนรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 25%, 50% และ 75% ของช่วงระหว่างสถานีผู้โดยสาร ส่งผลต่อ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องดึงจาก ESTS โดยตรง โดยกรณีที่เกิดไฟดับขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 50% มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 32.53 kWh เนื่องจากระยะจากจุดหยุดไปยัง สถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดมีความยาวที่สุด ขณะที่เกิดไฟดับขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 25% จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 11.68 kWh เนื่องจากรถไฟฟ้าหยุดใกล้สถานีผู้โดยสารต้นทางที่ เพิ่งเคลื่อนที่ออกมา จึงมีการดึงพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS สำหรับวกกลับไปสถานีผู้โดยสารเดิมที่อยู่ ใกล้ และตำแหน่ง 75% มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดประมาณ 11.65 kWh เนื่องจากจุดหยุดอยู่ใกล้ สถานีผู้โดยสารปลายทางอยู่แล้ว

ต่อมาเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่ม-ลดภาระโหลดของรถไฟฟ้าตั้งแต่ -20% ถึง +20% พบว่าตำแหน่งและเวลาหยุดจอดของรถไฟฟ้าขณะเกิดไฟดับเปลี่ยนแปลงตาม น้ำหนักโหลด กล่าวคือเมื่อโหลดมีค่ามาก เวลาหยุดจอดจะเกิดเร็วขึ้น ส่งผลให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปด้วยแรงเฉื่อยในระยะสั้นจากจุดที่ควรหยุดจอด ทั้งนี้ ผลของการปรับภาระโหลดเกิดขึ้นเด่นชัดแตกต่างกันตามทิศทางการเคลื่อนที่หลังไฟดับ คือ กรณีที่เกิดไฟดับขณะรถไฟฟ้าบรรทุกโหลدن้าหนักเบาเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 25% รถไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปด้วยแรงเฉื่อยจนมีระยะห่างจากจุดจอดไปยังสถานีผู้โดยสารต้นทางที่ต้องวกกลับมากกว่าการบรรทุกโหลدن้าหนักมาก ส่งผลให้รถไฟฟ้าโหลดเบาดึงพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS มากกว่า เนื่องจากต้องเคลื่อนที่เพิ่มเติมไกลกว่า ในขณะที่กรณีที่เกิดไฟดับขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 50% และ 75% จะให้ผลลัพธ์ตรงกันข้าม เนื่องจากการเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉื่อยเป็นไปในทิศทางเดียวกับทิศที่รถไฟฟ้าต้องเคลื่อนที่ไปด้วยพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS การมีโหลดเบาจึงทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าการบรรทุกโหลدن้าหนักมาก อย่างไรก็ตาม น้ำหนักโหลดจะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อรถไฟฟ้าต้องเคลื่อนที่ในระยะทางไกล เช่น กรณีที่เกิดไฟดับขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง 50% โดยสามารถสรุปผลการจำลองได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การดึงพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ภายใต้เงื่อนไขบรรทุกน้ำหนักโหลดของรถไฟฟ้า

ตำแหน่ง ขณะเกิด ไฟดับ	พลังงานที่ใช้ขณะรถไฟฟ้าบรรทุกน้ำหนักโหลด (kWh)					ทิศทางการ เคลื่อนที่
	-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

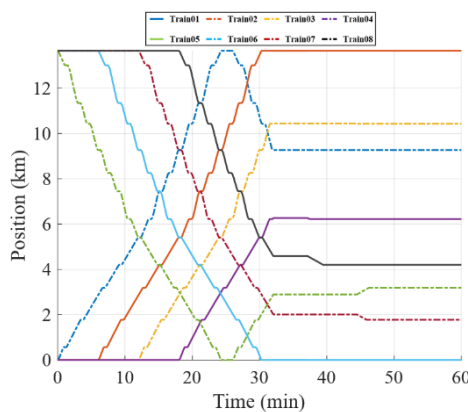
จากผลการจำลองในแต่ละเงื่อนไขแสดงให้เห็นว่า ESTS สามารถจ่ายไฟให้กับขบวนรถไฟฟ้า เพื่อขับเคลื่อนต่อไปยังสถานีผู้โดยสารที่ไกลที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพลังงานไฟฟ้าที่ถูกดึงไปใช้มีเพียงประมาณ 11.63–32.53 กิโลวัตต์ชั่วโมง ของพลังงานที่กักเก็บไว้ในระบบ ซึ่งถือว่าเป็นสัดส่วนที่ต่ำเมื่อเทียบกับความจุรวมที่ติดตั้งจริง ผลที่ได้ยืนยันย่นย่อว่า ESTS สามารถรองรับเหตุการณ์เข้าช้อนและสามารถนำพลังงานไฟฟ้าที่เหลือไปแบ่งปันให้กับขบวนรถไฟฟ้าอื่น ๆ ได้เพิ่มเติม ทั้งนี้ เพื่อให้การทำงานของ ESTS ดำเนินการได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องออกแบบโหมดควบคุมการเดินรถให้สอดคล้องกับการทำงานของ ESTS

4.4.2.2 การทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

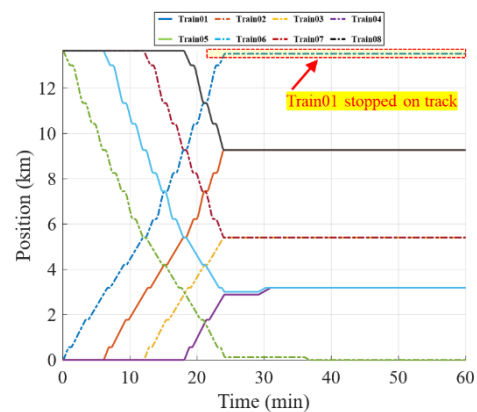
การจำลองส่วนนี้ทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS โดยกำหนดให้ระบบรถไฟฟ้ามวลชนให้บริการผู้โดยสารในวันทำการปกติ มีการปล่อยขบวนรถไฟฟ้ทุก ๆ 6 นาที และมีขบวนรถไฟฟ้เคลื่อนที่ในระบบเฉลี่ย 8 ขบวน รูปแบบการปล่อยขบวนรถไฟฟ้ถูกดำเนินการโดยให้ขบวนที่ 1–4 เคลื่อนที่ในทิศทางขาขึ้นจากสถานีสนามกีฬาแห่งชาติ (W1) ไปยังสถานีบางหว้า (S12) ส่วนขบวนที่ 5–8 เคลื่อนที่ในทิศทางขาลงหรือเส้นทางสวนย้อนกลับ สำหรับการติดตั้ง ESTS มีเพียงรถไฟฟ้ขบวนเลขคู่เท่านั้นที่ติดตั้งระบบ การจำลองจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนกว่ารถไฟฟ้ทุกขบวนจะวิ่งไป-กลับระหว่างสถานีผู้โดยสารต้นทางกับสถานีผู้โดยสารปลายทางครบ 1 รอบด้วยโครงสร้างความเร็วเหมือนกันทุกขบวน ซึ่งทำให้สัดส่วนระหว่างรถไฟฟ้ที่ติดตั้ง ESTS และไม่ติดตั้งในระบบมีจำนวนครึ่งต่อครึ่ง การทำงานของ ESTS จะเริ่มขึ้นโดยจ่ายไฟสำรองให้กับรถไฟฟ้ที่ติดตั้ง ESTS หลังจากที่ยขบวนนั้นหยุดจอดด้วยแรงเฉื่อย ต่อมาเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาทีและแน่ใจว่ารถไฟฟ้เหล่านั้นเคลื่อนที่ไปยังเขตปลอดภัยแล้ว ระบบจะเข้าสู่โหมดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่เหลือให้กับรถไฟฟ้ที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ที่หยุดจอดอยู่กลางทาง ทั้งนี้ ระยะระหว่าง ESTS กับขบวนรถไฟฟ้ที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าต้องอยู่ห่างกันไม่เกิน 2.5–5 กิโลเมตร อันเนื่องมาจากข้อจำกัดด้านระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟกระแสตรงตามมาตรฐาน EN 50163:2004 (British Standards Institution, 2004) โดยในที่นี้กำหนดระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไว้ที่ 3.5 กิโลเมตร (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข.) เพื่อแสดงผลการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS ในกรณีที่รถไฟฟ้ทุกขบวนสามารถเคลื่อนที่ไปจอดที่สถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุด และกรณีที่ยังมีรถไฟฟ้บางขบวนตกค้างอยู่บนทางวิ่ง นอกจากนี้ หากพลังงานไฟฟ้าสำรองใน ESTS หนึ่งไม่เพียงพอสำหรับการแบ่งปัน หรือรถไฟฟ้ที่ต้องการรับพลังงานไฟฟ้าจอดห่างเกินระยะที่กำหนด บทบาทการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจะถูกถ่ายโอนไปยัง ESTS อื่นภายในระบบรถไฟฟ้ามวลชนเดียวกัน

รูปที่ 4.47–4.48 แสดงตัวอย่างผลการตอบสนองของระบบรถไฟฟ้ามวลชนภายใต้สถานการณ์ไฟดับ โดยเปรียบเทียบ 2 กรณี ได้แก่ (ก) กรณีที่ขบวนรถไฟฟ้ทุกขบวนสามารถเคลื่อนที่ไปจอด ณ สถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ครบถ้วน และ (ข) กรณีที่ยังมีขบวนรถไฟฟ้บางขบวนตกค้างอยู่บนเส้นทางวิ่ง ทั้งนี้ รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์เชิงระยะทาง–เวลา ช่วยให้เห็นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้หลังเกิดเหตุไฟดับ ขณะที่รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์เชิงความเร็ว–เวลา ช่วยยืนยันพฤติกรรมการณ์การหยุดนิ่ง การเริ่มตอบสนองของ ESTS และการกลับมาเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้ในแต่ละกรณี ภายใต้กรณี (ก) เมื่อเกิดเหตุไฟดับในนาทีที่ 32 ขบวนรถไฟฟ้ที่ติดตั้ง ESTS จะเข้าสู่ช่วงตอบสนองและเริ่มใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองเพื่อขับเคลื่อนตนเอง ทำ

ให้ขบวนที่ 4 และ 8 เริ่มเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ในนาทิตี่ 37 จากนั้นในนาทิตี่ 45 ขบวนที่ 3 5 และ 7 จึงเริ่มเคลื่อนที่ด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS บนขบวนอื่น ส่งผลให้รถไฟทุกขบวนสามารถอพยพได้ครบถ้วน ในทางตรงกันข้าม กรณี (ข) เมื่อเกิดเหตุไฟดับในนาทิตี่ 24 พบว่ามีเพียงขบวนที่ 4 และ 6 ที่เริ่มใช้ ESTS ขับเคลื่อนตนเองไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ในนาทิตี่ 29 และต่อมาในนาทิตี่ 36 ขบวนที่ 5 จึงเคลื่อนที่ด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับการแบ่งปัน ขณะที่ขบวนที่ 1 ยังคงหยุดนิ่งอยู่บนเส้นทางวิ่งจนสิ้นสุดการจำลอง เนื่องจากอยู่นอกระยะที่สามารถรับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

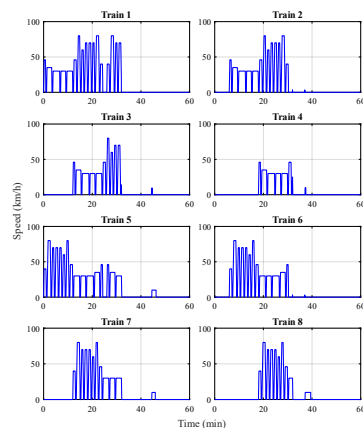


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

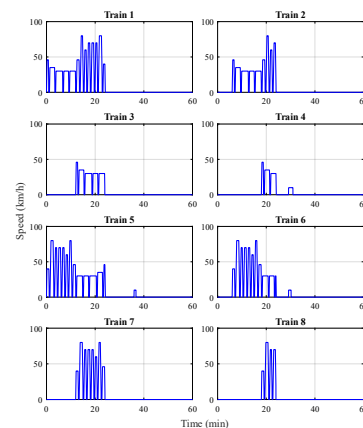


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์เชิงระยะทาง-เวลาการเคลื่อนที่ของรถไฟขณะไฟดับ



(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

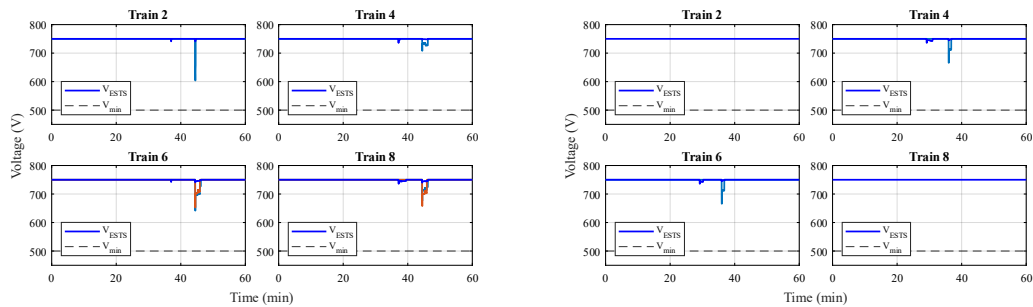


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์เชิงความเร็ว-เวลาการเคลื่อนที่ของรถไฟขณะไฟดับ

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

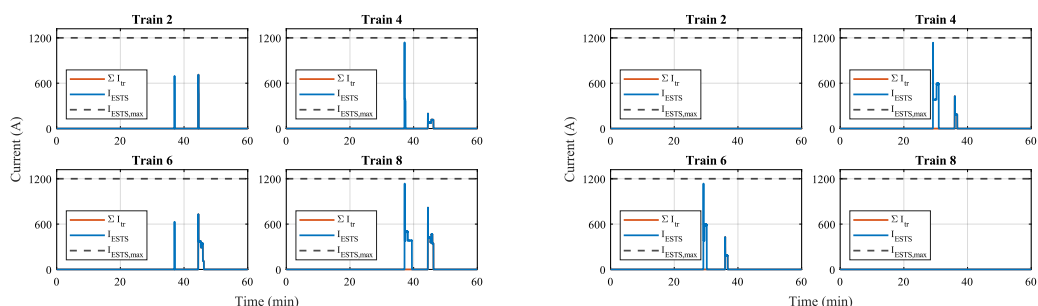
รูปที่ 4.49 แสดงกราฟแรงดันไฟฟ้าของ ESTS และแรงดันไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า โดยเส้นสีน้ำเงินเข้มแสดงแรงดันไฟฟ้าของ ESTS ส่วนเส้นสีอื่น ๆ แสดงแรงดันไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ESTS พิจารณาได้เป็นสองช่วงหลัก ได้แก่ ช่วงที่ ESTS จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเอง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



(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

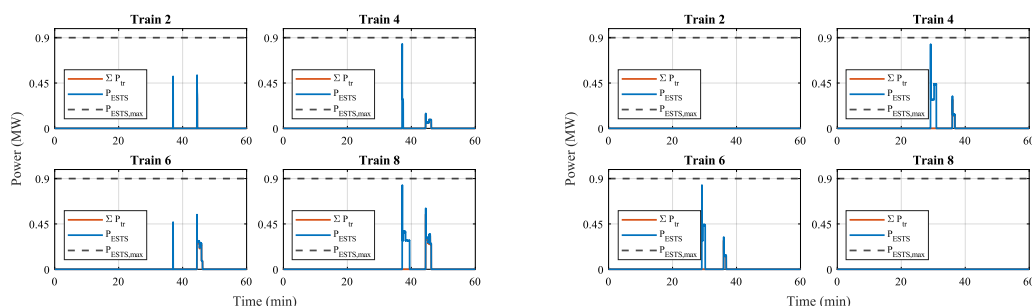
รูปที่ 4.49 แรงดันไฟฟ้าของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟและขบวนรถไฟที่รับพลังงานไฟฟ้า

รูปที่ 4.50 แสดงกระแสไฟฟ้าและ รูปที่ 4.51 แสดงกำลังไฟฟ้าจาก ESTS รวมถึงค่าของขบวนรถไฟที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า โดยในรูปที่ 4.50 เส้นสีน้ำเงินเข้มแสดงกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจาก ESTS ส่วนเส้นสีแดงแสดงผลรวมกระแสไฟฟ้า (ΣI_{tr}) และกำลังไฟฟ้า (ΣP_{tr}) ของขบวนรถไฟที่รับพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ดังนั้น ในช่วงที่ I_{ESTS} มีค่า แต่ ΣI_{tr} และ ΣP_{tr} มีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงว่า ESTS อยู่ในช่วงจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟที่ติดตั้งระบบเอง และยังไม่ได้เข้าสู่โหมดแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้ขบวนอื่น การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของ ESTS จึงพิจารณาได้เป็นสองช่วงหลักเช่นเดียวกับกรณีแรงดันไฟฟ้า ได้แก่ ช่วงที่ ESTS จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟที่ติดตั้งระบบเอง ทำให้กระแสไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าของ ESTS สูงขึ้นตามภาระโหลดการขับเคลื่อนของขบวนนั้น และช่วงที่ ESTS แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟอื่นที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ซึ่งทำให้ค่า ΣI_{tr} หรือ ΣP_{tr} ปรากฏขึ้นและมีแนวโน้มสอดคล้องกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกจาก ESTS โดยค่ากระแสไฟฟ้าต้องไม่เกินขีดจำกัดสูงสุดที่กำหนดไว้



(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 4.50 กระแสไฟฟ้าของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟและขบวนรถไฟที่รับพลังงานไฟฟ้า



(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

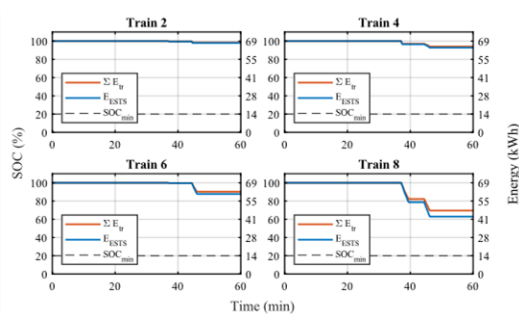
(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 4.51 กำลังไฟฟ้าของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟและขบวนรถไฟที่รับพลังงานไฟฟ้า

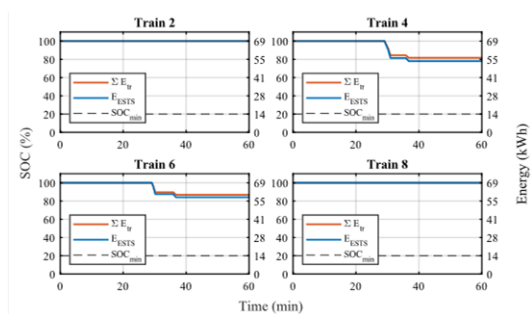
จากรูปข้างต้น พบว่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของ ESTS จะปรากฏค่ายอดอย่างชัดเจนในช่วงที่ ESTS จ่ายพลังงานไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนตนเองหรือแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนรถไฟอื่น โดยในรูปที่ 4.50(ก) และรูปที่ 4.51(ก) เป็นกรณีที่รถไฟทุกขบวนสามารถอพยพได้ครบถ้วน ESTS หลายชุดมีบทบาททั้งในการขับเคลื่อนตนเองและการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า ทำให้กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ารวมของระบบกระจายตัวอยู่ในหลายช่วงเวลา ขณะที่รูปที่ 4.50(ข) และรูปที่ 4.51(ข) เป็นกรณีที่มีขบวนรถไฟบางขบวนตกค้างบนเส้นทาง บทบาทการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะกระจุกตัวอยู่เพียงบาง ESTS เท่านั้น โดยทั้งสองกรณี ESTS ถูกดึงกระแสไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 1,200 แอมป์ และมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 0.9 เมกะวัตต์ เมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนขบวนรถไฟที่ติดตั้งระบบเอง ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจะอยู่ภายใต้ขอบเขตค่าออกแบบที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเข้าสู่ช่วงการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของ ESTS จะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนขบวนรถไฟที่รับพลังงานไฟฟ้าและลักษณะการกระจายภาระในแต่ละช่วงเวลา กล่าวคือ เมื่อขบวนรถไฟหนึ่งขบวนได้รับพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS หลายชุดพร้อมกัน ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบก็จะกระจายตัวระหว่าง ESTS หลายชุด ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของแต่ละชุดต่ำกว่าค่าสูงสุดที่กำหนด ขณะที่เมื่อ ESTS ชุดหนึ่งต้องจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนรถไฟหลายขบวนหรือรับภาระต่อเนื่องในช่วงเวลาเดียวกัน ค่าดังกล่าวอาจเข้าใกล้ข้อจำกัดของระบบได้

รูปที่ 4.52 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองจาก ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟแต่ละขบวน โดยเส้นสีน้ำเงินเข้มแสดงพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายออกจาก ESTS ส่วนเส้นสีแดงแสดงผลรวมพลังงานไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟได้รับจาก ESTS ทั้งในกรณีจ่ายให้ขบวนที่ติดตั้งระบบเอง

และกรณีแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนรถไฟฟ้านั้น ทั้งนี้ ค่าของทั้งสองเส้นอาจแตกต่างกัน เนื่องจากระบบมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าระหว่างการส่งผ่านราง สายจ่ายไฟ และองค์ประกอบของระบบ โดยรูปที่ 4.52(ก) เป็นกรณีที่ขบวนรถไฟสามารถอพยพไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ครบทุกขบวน 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 กิโลวัตต์ ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนว่า ESTS สามารถแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนรถไฟฟ้านั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนรูปที่ 4.52(ข) เป็นกรณีที่มีขบวนรถไฟบางขบวนตกค้างบนเส้นทาง พบว่า ESTS บนขบวนที่ 4 และ 6 ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนที่ 5 เท่านั้น โดยมีค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ต่ำสุด และเฉลี่ยเท่ากับ 15.17 0 และ 6.53 กิโลวัตต์ ชั่วโมง ตามลำดับ ขณะที่ ESTS บนขบวนอื่นยังไม่มีบทบาทในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพิ่มเติม แม้จะยังมีขบวนรถไฟตกค้างบนทางวิ่งก็ตาม ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ความสำเร็จของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไม่ได้ขึ้นอยู่กับพลังงานคงเหลือของ ESTS เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งสัมพัทธ์ของขบวนรถไฟ ระยะห่างระหว่าง ESTS กับขบวนรถไฟที่ต้องการรับพลังงานไฟฟ้า และข้อจำกัดด้านแรงดันไฟฟ้าของเส้นทางการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา



(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 4.52 พลังงานไฟฟ้าคงเหลือและสถานะการชาร์จของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟ

ผลการทดสอบแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถด้วยตนเองสำหรับระบบรถไฟฟ้ามวลชน แสดงให้เห็นว่า ESTS ของขบวนรถไฟแต่ละขบวนสามารถจำลองการทำงาน

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 ภายในระบบรวมกันด้วย

4.5 สรุป

การพัฒนาแบบจำลองระบบขับเคลื่อนฉุดด้วยตนเองสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการดำเนินงานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ 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