

การหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบริมทาง
สำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งขบวน



นางสาวนัชพร สุตพรหม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**OPTIMAL POSITIONS AND CAPACITIES OF
WAYSIDE SUPERCAPACITORS FOR
A DC ELECTRIFIED RAILWAY**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

การหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบบริมทาง
สำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งขบวน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



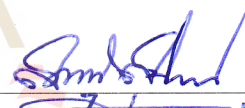
(ผศ. ดร.ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์)

ประธานกรรมการ



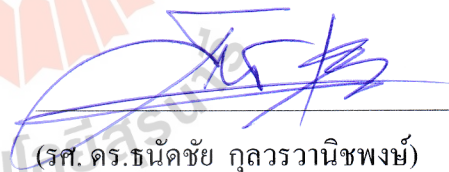
(อ. ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ศ. น.ท. ดร. सरาวุฒิ สุจิตจร)

กรรมการ



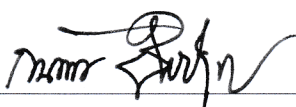
(รศ. ดร. ธนัชชัย กุลรวานิชพงษ์)

กรรมการ



(รศ. ดร. กীরติ ชยะกุลคีรี)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นัชพร สุตพรหม : การหาค่าตำแหน่งและขนาดเหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบบริม
ทางสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งขบวน (OPTIMAL POSITIONS AND
CAPACITIES OF WAYSIDE SUPERCAPACITORS FOR A DC ELECTRIFIED
RAILWAY) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย, 166 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการหาค่าตำแหน่งและขนาดเหมาะสมที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงาน
แบบบริมทางที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งขบวน เพื่อเก็บสะสมพลังงาน
จากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานของรถไฟฟ้า กรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีลม พิจารณาค่าตำแหน่ง
ติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย
จากการเบรกลดน้อยที่สุด ออกแบบขนาดเหมาะสมที่สุดจากการจ่ายพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดของตัวเก็บ
ประจุยิ่งยวดที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งใด ๆ ศึกษาการหาค่าตำแหน่งและขนาดเหมาะสมที่สุดจากการสร้าง
แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB เคลื่อนที่ไป-กลับ ใช้แบบจำลอง
โครงข่ายไฟฟ้าแบบ Multi-conductor system หาค่าตำแหน่งเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีต่างกัน 2 วิธี คือ การ
จำลองติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางทุก ๆ 1 km และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการ
เคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคที่พิจารณาผลของสถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีค่าสุดท้าย
ใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นเป็นเงื่อนไขบังคับ ผลการศึกษาพบว่า ขนาดความจุเหมาะสมที่สุดของตัวเก็บ
ประจุยิ่งยวดแบบบริมทาง 2 ชุด เท่ากับ 3.53 kWh และ 5.06 kWh ตำแหน่งเหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้ง
ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางอยู่ในช่วงที่รถไฟฟ้ามีความเร็วสูง คือ ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ
10.49 km จากสถานีผู้โดยสารต้นทาง การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนลดลง 50.76
kWh หรือคิดเป็น 8.37% ของพลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนทั้งหมด และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการ
เบรกลดลง 51.62 kWh คิดเป็น 33.37% ของพลังงานสูญเสียจากการเบรกรถที่ไม่มีระบบเก็บสะสม
พลังงาน

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา นัชพร สุตพรหม
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย

NATCHAPHON SUTPHROM : OPTIMAL POSITIONS AND
CAPACITIES OF WAYSIDE SUPERCAPACITORS FOR A DC
ELECTRIFIED RAILWAY. THESIS ADVISOR : TOSAPHOL
RATNIYOMCHAI, Ph. D., 166 PP.

REGENERATIVE BRAKING / SUPERCAPACITOR / WAYSIDE ENERGY
STORAGE SYSTEM

This thesis presents an optimal positions and capacities of wayside energy storage systems (WESSs) using supercapacitors stored a regenerative braking energy for a DC electrified railway. In case study BTS skytrain SILOM line, the objective function considers a minimization of energy consumption of traction substation and minimization of braking energy. Design an optimal capacity by maximum discharge energy capability of WESSs. A single train simulator is used to simulate a train's round trip. The multi-conductor system is used in a mathematical model and power flow calculation by MATLAB program. The study searches for optimal positions to install WESSs with 2 different methods: (1) manually varying position of WESSs with a step of 1 km and (2) using Particle Swarm Optimization (PSO). The results showed that the optimal capacities are 3.53 and 5.06 kWh for 2 WESSs and the optimal positions are the areas that train has high speed. The optimal positions of WESSs stood at 6.81 and 10.49 km away from the first passenger station. Energy consumption reduce 50.76 kWh, 8.37% of energy consumption without WESSs. The highest braking energy reduction is 51.62 kWh or 33.37% of braking energy without WESSs.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature Natchaphon

Advisor's Signature Tosaphol Ratniyomchai

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

อาจารย์ ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ยิ่งแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมไปถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไข รายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดี ในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัชชัย กุลสุวรรณิชพงษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ อาจารย์ ดร. ชัยยุทธ สัมภาวะคุปต์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และกำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งการเผยแพร่ผลงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน ขอคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้กำลังใจในการทำวิจัย และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างยิ่งมาโดยตลอด

นัชพร สุตพรหม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
1.8 สรุปย่อ.....	5
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 ระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบรถไฟฟ้า	7
2.3 ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง.....	9
2.4 การทดสอบและการใช้งานของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่.....	12
2.5 สรุป	13
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	14
3.1 บทนำ.....	14
3.2 เทคโนโลยีสะสมพลังงาน.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1	พลังงานทางกล (Mechanical Energy Storage)	15
3.2.2	พลังงานไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Energy Storage).....	15
3.2.3	พลังงานไฟฟ้า (Electrical Energy Storage)	16
3.2.4	พลังงานเคมีความร้อน (Thermochemical Energy Storage).....	16
3.2.5	พลังงานเคมี (Chemical Energy Storage).....	17
3.2.6	พลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage).....	17
3.3	การใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงาน	17
3.3.1	ระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบไฟฟ้า.....	17
3.3.2	ระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบพลังงานหมุนเวียน.....	18
3.3.3	แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง.....	18
3.3.4	ระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบขนส่ง.....	18
3.4	เทคโนโลยีสะสมพลังงานสำหรับระบบรถไฟฟ้า.....	19
3.4.1	แบตเตอรี่ (Batteries).....	19
3.4.2	ล้อตุ่นกำลัง (Flywheel)	20
3.4.3	ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor).....	22
3.5	การเลือกใช้เทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงาน.....	28
3.6	ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง.....	29
3.7	การเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน	30
3.8	ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสดตรง.....	31
3.9	รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย	33
3.10	สรุป	34
4	การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสดตรงหนึ่งขบวน	35
4.1	บทนำ.....	35
4.2	การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า	35
4.3	การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน	44
4.3.1	แบบจำลองสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน.....	46
4.3.2	แบบจำลองรถไฟฟ้า.....	47

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

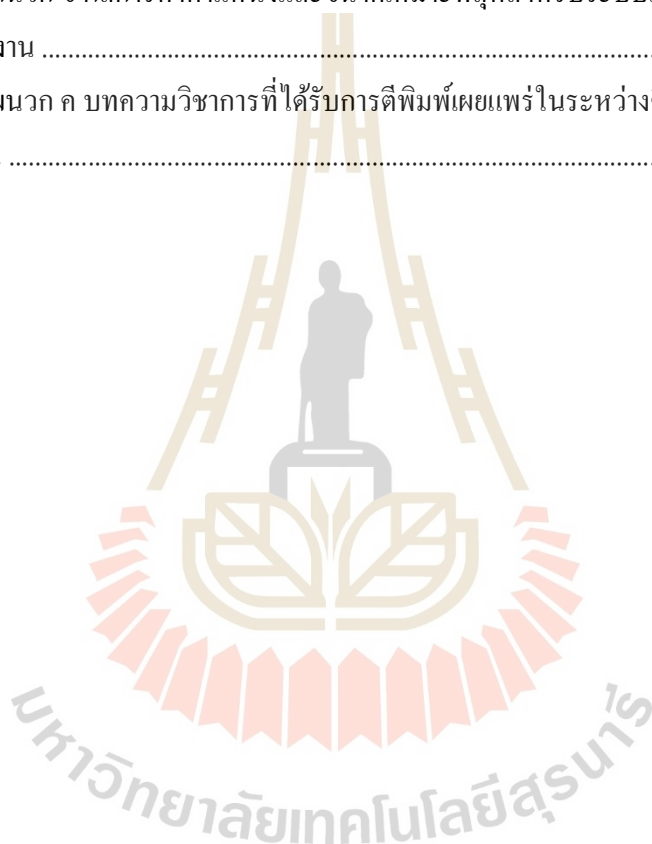
4.3.3	แบบจำลองระบบเก็บสะสมพลังงาน	50
4.3.4	การควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบ Piece-wise Linear SOC.....	52
4.3.5	การคำนวณผลเฉลยแรงดันด้วยวิธีฉีดกระแสไฟฟ้า (Current injection method).....	54
4.4	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสายสีลมหนึ่งขบวน	59
4.5	การประมาณค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลผ่านรางวิ่งไปยังดิน.....	72
4.6	สรุป	74
5	ตำแหน่งและขนาดเหมาะที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุ ยิ่งยวดแบบริมทาง	75
5.1	บทนำ.....	75
5.2	ขนาดความจุเหมาะที่สุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับระบบเก็บสะสม พลังงานแบบริมทาง	75
5.3	ตำแหน่งเหมาะที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 จุด.....	78
5.4	ตำแหน่งเหมาะที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางโดยใช้ เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค	95
5.4.1	การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization)	95
5.4.2	ตำแหน่งเหมาะที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 จุด ด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่ม อนุภาค	97
5.5	สรุป	112
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	113
6.1	สรุปผลการดำเนินงาน	113
6.2	ข้อเสนอแนะ	114
รายการอ้างอิง		115

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย	119
ภาคผนวก ข ผลการหาดำแหน่งและขนาดเหมาะที่สุดสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงาน	128
ภาคผนวก ค บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	134
ประวัติผู้เขียน	166



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ความแตกต่างของการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน9
3.1	ตัวอย่างโมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด26
3.2	ตัวอย่างการออกแบบจำนวน โมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 3.60 kWh.....26
3.3	แรงดันมาตรฐานการจ่ายไฟตามมาตรฐาน EN 50163 หรือ IEC 60850.....33
4.1	พารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าในระบบทดสอบ59
4.2	ตำแหน่งสถานีและตำแหน่งสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน.....60
4.3	ระดับความชันของเส้นทางเคลื่อนที่รถไฟฟ้าสายสีลม62
4.4	ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งรอบบริการ64
5.1	พารามิเตอร์การควบคุมการทำงานแบบ Piece-wise Linear SOC76
5.2	พลังงานจ่ายออกสูงสุดและขนาดเหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบบริมทาง 2 ชุด77
5.3	การจำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด.....81
5.4	การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km85
5.5	ค่าพารามิเตอร์สำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี PSO.....99
5.6	ผลการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด ด้วยวิธี PSO.....99
5.7	การใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย กรณีติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km102
ก.1	ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า กรณีมีและไม่มีการทำงาน ในโหมดเคลื่อนที่ ด้วยความเฉื่อย121
ข.1	การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด ขนาด 3.53 kWh และ 5.06 kWh กรณีศึกษา รถไฟฟ้าสายสีลม.....129

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

ข.2	ค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี PSO สำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 จุด ขนาด 3.53 kWh และ 5.06 kWh กรณีศึกษารถไฟฟ้ายาสีลม	133
-----	--	-----



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แบบจำลองของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนตามสภาวะการทำงาน	11
2.2	รูปแบบการควบคุมเชิงเส้นเป็นช่วง	11
3.1	ประเภทเทคโนโลยีการสะสมพลังงานตามรูปแบบการเก็บพลังงาน	15
3.2	แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน ติดตั้งที่ HAIJIMA Substation	20
3.3	รายละเอียดของระบบล้อยูนกำลัง	22
3.4	โครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	22
3.5	ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด	23
3.6	ผู้คอนเทอเนอร์ของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่งระหว่าง Chamonix substation ถึง Argentiere substation	27
3.7	เงื่อนไขและเกณฑ์การเลือกใช้เทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงานตามการใช้งาน	28
3.8	แผนภาพวงจรของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่สำคัญสำหรับระบบไฟฟ้า ขับเคลื่อนกระแสตรง	30
3.9	วงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้วงจรสับไฟฟ้า 2Q	31
3.10	แผนผังการจ่ายไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของรถไฟฟ้า	32
3.11	รถไฟฟ้าสายสีเขียวส่วนต่อขยาย แบริ่ง-สมุทรปราการ	34
4.1	โหมคการทำงานของรถไฟฟ้า	36
4.2	ตัวอย่างลักษณะแรงบิดของหัวรถจักรและแรงยึดเกาะสูงสุด	37
4.3	แผนภาพการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า	37
4.4	แผนภาพระยะวิกฤติการเบรก	40
4.5	กราฟแรงบิด (Torque) และกำลังไฟฟ้า (Power) เทียบกับเวลา สำหรับรถไฟฟ้า	40
4.6	สมบัติของแรงบิดของหัวรถจักรไฟฟ้ากับความเร็วเชิงเส้น	41
4.7	ขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า	43
4.8	ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบ Multi-conductor system	44
4.9	แบบจำลองของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน	46
4.10	แบบจำลองกรณีสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 2 เกิดกระแสไหลย้อนกลับ	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11	แบบจำลองของรถไฟฟ้าเมื่อทำงานในโหมดขับเคลื่อน.....48
4.12	แบบจำลองกรณีรถไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อน.....49
4.13	แบบจำลองเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรกจ่ายพลังงานย้อนกลับ50
4.14	แบบจำลองระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบรถไฟฟ้า.....51
4.15	การควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC52
4.16	ขั้นตอนการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน58
4.17	รถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ ๖ รอบพระชนมพรรษาสาย ๒ (สายสีลม).....60
4.18	ตำแหน่งสถานีผู้โดยสารและตำแหน่งสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน61
4.19	ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าเทียบกับตำแหน่ง.....61
4.20	ระดับความชันของเส้นทาง61
4.21	คุณลักษณะแรงกดของรถไฟฟ้า.....63
4.22	คุณลักษณะแรงเบรกของรถไฟฟ้า63
4.23	แรงกดของรถไฟฟ้าเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ จากสถานี W1 ไป S12.....64
4.24	กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ จากสถานี W1 ไป S1265
4.25	การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรวม และพลังงานไฟฟ้ารถไฟ.....66
4.26	พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย66
4.27	แรงดันไฟฟ้าที่โน้ดรถไฟ.....67
4.28	แรงดันไฟฟ้าที่โน้ดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟ เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12.....68
4.29	แรงดันไฟฟ้าที่โน้ดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟ เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1.....69
4.30	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟ เคลื่อนที่จาก W1 ไป S1270
4.31	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟ เคลื่อนที่จาก S12 ไป W171
4.32	แรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งที่โน้ดรถไฟ73
4.33	แรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งสูงสุดและต่ำสุดที่โน้ดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34	กระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดและการไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ย.....74
5.1	ขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบริมทางชุดที่ 2 76
5.2	ผลการออกแบบขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบริมทาง 2 ชุด78
5.3	การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน.....83
5.4	พลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกเทียบกับตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน84
5.5	ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าและตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km84
5.6	สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้ากรณี WESSs ติดตั้งที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12.....85
5.7	สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้ากรณี WESSs ติดตั้งที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1.....86
5.8	แรงดันไฟฟ้าที่ โหนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6 และ 10 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S1287
5.9	แรงดันไฟฟ้าที่ โหนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6 และ 10 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W188
5.10	แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6 และ 10 km.....89
5.11	แรงดันไฟฟ้า โหนด WESSs ติดตั้งที่ 6 และ 10 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12.....89
5.12	แรงดันไฟฟ้า โหนด WESSs ติดตั้งที่ 6 และ 10 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1.....90
5.13	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงาน ติดตั้งที่ 6 และ 10 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12.....91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บ สะสมพลังงาน ติดตั้งที่ 6 และ 10 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1.....92
5.15	ลักษณะการควบคุม Piece-wise linear และกระแสไฟฟ้าของระบบเก็บ สะสมพลังงานกรณี ติดตั้ง WESSs ที่ 6 km และ 10 km92
5.16	แรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งที่โนดรถไฟฟ้า กรณี WESSs ติดตั้งที่ 6 km และ 10 km93
5.17	แรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งสูงสุดและต่ำสุดที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งรถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ 6 km และ 10 km.....93
5.18	แรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งที่โนด WESSs กรณีติดตั้งที่ 6 km และ 10 km 94
5.19	กระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดและการไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ย เทียบกับตำแหน่งรถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ 6 km และ 10 km.....95
5.20	แผนภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคใน PSO97
5.21	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอนุภาคจากการหาตำแหน่งเหมาะสมที่สุดครั้งที่ 3100
5.22	ค่าความเหมาะสมดีที่สุดแบบวงกว้างจากการหาตำแหน่งเหมาะสมที่สุดครั้งที่ 3101
5.23	ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าและตำแหน่งติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km101
5.24	สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12.....103
5.25	สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1.....103
5.26	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บ สะสมพลังงาน ติดตั้งที่ 6.81 km และ 10.49 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12.....104

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.27	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บ สะสมพลังงาน ติดตั้งที่ 6.81 km และ 10.49 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1.....104
5.28	ลักษณะการควบคุม Piece-wise linear และกระแสไฟฟ้าของระบบเก็บ สะสมพลังงาน กรณีติดตั้ง WESSs ที่ 6.81 km และ 10.49 km105
5.29	แรงดันไฟฟ้าที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12.....106
5.30	แรงดันไฟฟ้าที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ รถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1.....107
5.31	แรงดันไฟฟ้าที่โนดรถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ 6.81 km และ 10.49 km108
5.32	แรงดันไฟฟ้าโนด WESSs ติดตั้งที่ 6.81 km และ 10.49 km เทียบกับ ตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12.....108
5.33	แรงดันไฟฟ้าโนด WESSs ติดตั้งที่ 6.81 km และ 10.49 km เทียบกับ ตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1109
5.34	แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งที่โนดรถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km110
5.35	แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งสูงสุดและต่ำสุดที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับ ตำแหน่งรถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km110
5.36	แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งที่โนด WESSs กรณีติดตั้งที่ 6.81 km และ 10.49 km 111
5.37	กระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดและการไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ย เทียบกับตำแหน่ง รถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km111
5.38	สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ 5 รอบการทำงาน กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km112
ก.1	โหมดการทำงานของรถไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย.....120

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.2	การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีมีและไม่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย122
ก.3	พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวม กรณีมีและไม่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย.....122
ก.4	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกรณีมีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จาก W1-S12.....123
ก.5	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกรณีมีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จาก S12-W1.....124
ก.6	แรงดันไฟฟ้าที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีมีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย125
ก.7	แรงดันไฟฟ้าที่โนดรถไฟฟ้า กรณีมีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย126
ก.8	แรงดันไฟฟ้าวิ่งตำแหน่งรถไฟฟ้า กรณีมีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย.....127
ก.9	แรงดันไฟฟ้าวิ่งสูงสุดและต่ำสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน.....127

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบขนส่งมวลชนภายในเมืองของหลาย ๆ ประเทศ เทคโนโลยีรถไฟฟ้าเป็นระบบขนส่งมวลชนอย่างหนึ่งที่สำคัญในปัจจุบัน เนื่องจากรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยล้อเลื่อนบนรางรถไฟ ซึ่งเป็นระบบที่มีการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานการเคลื่อนที่ต่ำ และการขนส่งมวลชนของรถไฟฟ้าสามารถขนส่งผู้โดยสารได้มากต่อรถไฟฟ้า 1 ขบวน และเทคโนโลยีที่ใช้ไฟฟ้าได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษจากการเผาไหม้ภายใน ดังนั้น เทคโนโลยีรถไฟฟ้าจึงได้รับความนิยมในปัจจุบัน ทั้งรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายในเมือง หรือรถไฟฟ้าความเร็วสูง เป็นต้น

การลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า และการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของรถไฟฟ้า เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบรถไฟฟ้า การลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การพัฒนาเทคโนโลยีขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพ เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียภายใน การออกแบบตารางการให้บริการรถไฟฟ้า หรือการออกแบบลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าให้เหมาะสม และการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนในรถไฟฟ้าสมัยใหม่เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (regenerative braking) คือ มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก และจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนสู่ระบบส่งจ่าย การนำพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานของรถไฟฟ้ากลับมาใช้ เป็นการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบรถไฟฟ้าแทนการเบรกแบบพลวัต หรือแทนการทำให้พลังงานจากการเบรกสูญเสียในรูปของความร้อนผ่านตัวต้านทานการเบรก ซึ่งพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้าขบวนใกล้เคียงที่อยู่ในเขตจ่ายไฟฟ้าเดียวกัน และต้องการกำลังไฟฟ้าในขณะนั้น หรือการนำเทคโนโลยีการสะสมพลังงาน (energy storage) เข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน เพื่อสะสมพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการเบรก และนำมาช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า เป็นต้น การติดตั้งเทคโนโลยีสำหรับสะสมพลังงานจากการเบรกมีทั้งการติดตั้งบนตัวรถไฟฟ้า (Onboard Energy Storage System: OBESS) และการติดตั้งที่ตำแหน่งริมทาง (Wayside Energy Storage System: WESS)

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสะสมพลังงานในระบบรถไฟฟ้าถูกใช้อย่างแพร่หลาย และมีวัตถุประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน (Li-ion) ถูกติดตั้งที่สถานีขับเคลื่อน Shin-Hikida สำหรับ Hokuriku line เพื่อชดเชยระดับแรงดันไฟฟ้าตก แบตเตอรี่นิกเกิล-เมทัลไฮไดร (Ni-MH) ถูกติดตั้งบนรถแทรมในประเทศฝรั่งเศส โดยบริษัท Alstom transportation เพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถแทรมที่ต้องให้บริการในพื้นที่ที่ไม่สามารถติดตั้งสายพาดอากาศได้ (Ratniyomchai et al., 2013) การใช้เทคโนโลยีระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง ติดตั้ง แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน ขนาดความจุ 76.12 kWh และ 137.02 kWh ที่สถานีไฟฟ้า Haijima และ Okegawa ตามลำดับ สามารถลดการจ่ายพลังงานจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ถึง 10% ผลจากการเก็บข้อมูลการใช้งานเป็นระยะเวลา 1 ปี ที่สถานีไฟฟ้า Haijima และ สถานีไฟฟ้า Okegawa ระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถช่วยจ่ายพลังงานได้ 400 MWh/year และ 700 MWh/year ในปีแรกของการใช้งาน ตามลำดับ (Hayashiya, 2017) ในปี ค.ศ. 2007 ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors) ขนาด 6.875 kWh ถูกติดตั้งเพื่อทดสอบในประเทศญี่ปุ่น ผลการทดสอบ สามารถเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 5.90 kWh หรือ 77% ของพลังงานที่เก็บได้จากการเบรกทั้งหมด (Okui et al., 2010)

การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางของระบบรถไฟฟ้า เป็นการติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ (Batteries) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors) และล้อดุนกำลัง (Flywheels) ไว้ที่ตำแหน่งระหว่างเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง เป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาเรื่องน้ำหนักของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน และปัญหาพื้นที่สำหรับติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน ตำแหน่งติดตั้ง และขนาดความจุของระบบเก็บสะสมพลังงานที่เหมาะสมไม่มีรูปแบบที่ตายตัว ขึ้นกับการควบคุมการทำงาน และการให้บริการของรถไฟฟ้า เช่น ความถี่ในการให้บริการ จำนวนขบวนรถไฟฟ้าในระบบ ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า เป็นต้น งานวิจัยนี้ศึกษาการหาตำแหน่งและขนาดความจุของระบบเก็บสะสมพลังงานเหมาะที่สุดสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง เพื่อสะสมพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานได้สูงสุด และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ใช้ระบบทดสอบจากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งขบวน กรณีศึกษา รถไฟฟ้าสายสีลม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ติดตั้งแบบริมทางสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง ศึกษาการหาตำแหน่งและขนาดเหมาะสมที่สุด สำหรับติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงาน โดยใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง สายสี่ลม 1 ขบวน โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1.2.1 ศึกษาเทคโนโลยีเก็บสะสมพลังงาน และระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบริมทาง สำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรง

1.2.2 พัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

1.2.3 ศึกษาการหาตำแหน่งและขนาดเหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางวงที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดของรถไฟฟ้ากระแสตรง

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางส่งผลต่อการเก็บสะสมพลังงาน จากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานของรถไฟฟ้า และส่งผลต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ระบบทดสอบเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB

1.4.2 พารามิเตอร์และข้อมูลการจำลองของระบบทดสอบใช้ข้อมูลของขบวนรถไฟฟ้าสายสี่ลม (สายสีเขียวเข้ม) รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ตั้งแต่สถานีสนามกีฬาแห่งชาติถึงสถานีบางหว้า

1.4.3 การจำลองผลเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า 1 ขบวนในระบบทดสอบ

1.4.4 พิจารณาน้ำหนักของผู้โดยสารขนาด payload AW3

1.4.5 ระบบเก็บสะสมพลังงานใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการจำลองและไม่คำนึงถึงค่าคงตัวเวลา (time constant)

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 พัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง กรณีใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน

1.5.2 วิเคราะห์ผลจากการจำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางของรถไฟฟ้ากระแสตรง

1.5.3 ประเมินตำแหน่งและขนาดความจุที่เหมาะสมที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้แบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงที่ติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง

1.6.2 สามารถคาดคะเนขนาดความจุ และตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบริมทาง

1.6.3 สามารถนำหลักการและแนวคิดในงานวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในอนาคต

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ ซึ่งกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่มีการศึกษามาแล้ว เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย โดยแบ่งเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ การใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานสำหรับรถไฟฟ้า ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง และการทดสอบการใช้งานจริงของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประกอบไปด้วยความรู้เบื้องต้นของเทคโนโลยีสะสมพลังงาน เช่น การใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบต่าง ๆ เทคโนโลยีสะสมพลังงานสำหรับระบบรถไฟฟ้า ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง เป็นต้น และสุดท้ายกล่าวถึงรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีในประเทศไทย

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสดตรง ซึ่งกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน โดยใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้แก่ การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า และการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าจากการสร้างแบบจำลองโครงข่ายไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน รวมถึงผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า กรณีศึกษาสายสีลม

บทที่ 5 กล่าวถึงการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งและขนาดความจุของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานเหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งแบบริมทาง โดยใช้การหาตำแหน่งเหมาะสมที่สุด 2 วิธี ได้แก่ การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานทุก ๆ 1 km และการหาตำแหน่งเหมาะสมที่สุดโดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ภาคผนวก ก. การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจากการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยก่อนเข้าจอดที่สถานี โดยไม่คำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

ภาคผนวก ข. ผลการหาตำแหน่งและขนาดเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง

ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

1.8 สรุปย่อการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้สร้างแบบจำลองโครงข่ายระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนและจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน กรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีลม การทำงานของรถไฟฟ้าแบ่งเป็น 3 โหมด ได้แก่ โหมดเร่ง โหมดความเร็วคงที่ และโหมดเบรก จำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบ Multi-conductor ซึ่งพิจารณาที่โนดตัวนำไฟฟ้าและ โนดที่รางวิ่ง คำนวณแบบวนรอบซ้ำด้วยวิธีการถดถอยไฟฟ้า เพื่อหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่โนดใด ๆ ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนประกอบไปด้วย สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน แทนด้วยวงจรสมมูลนอร์ตัน ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน ทำงานตามการควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากรณีจ่ายพลังงาน และเป็นโหลดรับกระแสไฟฟ้ากรณีประจุพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน รถไฟฟ้า แทนด้วยโหลดรับกระแสไฟฟ้าเมื่อทำงานในโหมดขับเคลื่อน และแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อขนานกับความต้านทานรถไฟฟ้าเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน ศึกษาการหาตำแหน่งและขนาดความจุของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่สามารถช่วยจ่ายพลังงานเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และสามารถเก็บ

สะสมพลังงานจากการเบรกแบบถ่ายคืนพลังงานเพื่อลดพลังงานสูญเสียจากการเบรกได้มากที่สุด
พิจารณาขนาดความเหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากพลังงานจ่ายออกสูงสุดของระบบเก็บ
สะสมพลังงานที่ตำแหน่งใด ๆ เป็น 75% ของพลังงานสะสมสูงสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด จำลอง
การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าไป-กลับ 1 รอบบริการ ใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของระบบเก็บสะสม
พลังงานต่างกัน 2 วิธี คือ การจำลองติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางทุก ๆ 1 km และ
วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การประยุกต์ใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานสำหรับรถไฟฟ้า มีการศึกษาและวิจัยที่หลากหลาย วัตถุประสงค์ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา บทนี้นำเสนอการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีการศึกษามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยดังกล่าวได้นำมาใช้เป็นตัวอย่าง และเป็นแนวทางในการประยุกต์ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

2.2 ระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบรถไฟฟ้า

การนำระบบเก็บสะสมพลังงานมาใช้ในระบบรถไฟฟ้าเริ่มมีการศึกษามาอย่างยาวนาน ในปี ค.ศ. 1982 ศูนย์พัฒนาการขนส่งของกรขนส่งประเทศแคนาดา (The Transportation Development Center of Transport Canada: TDC) ได้ศึกษาการนำเทคโนโลยีเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางมาใช้ในระบบรถไฟฟ้าเพื่อลดค่ายอดโหลดกำลังไฟฟ้า (peak load) และลดการใช้พลังงานไฟฟ้า (energy consumed) เนื่องจาก 80% ของต้นทุนค่าใช้จ่ายมาจากค่ายอดโหลดกำลังไฟฟ้า เปรียบเทียบการใช้งานของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้แบตเตอรี่ และล้อยุนกำลัง ผลการศึกษาด้านทุนในประเทศแคนาดาขณะนั้น เมื่อพิจารณาาระบบเก็บสะสมพลังงานที่มีกักกำลังไฟฟ้า และขนาดความจุพลังงานไฟฟ้าเท่ากัน คำนึงถึงค่าใช้จ่ายเพื่อบำรุงการใช้งานตลอด 20 ปี จากผลการศึกษาพบว่าระบบที่ใช้แบตเตอรี่ใช้ต้นทุน 15.72 ล้านดอลลาร์สหรัฐ และระบบล้อยุนกำลังใช้ต้นทุน 18.44 ล้านดอลลาร์สหรัฐ แต่ตลอดการใช้งานสามารถลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าได้เพียง 2.36 ล้านดอลลาร์สหรัฐ (Turner, 1984) ในปี ค.ศ. 1988 ประเทศญี่ปุ่นเริ่มใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ล้อยุนกำลังในระบบรถไฟฟ้าเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ผลการติดตั้งระบบดังกล่าวสามารถช่วยลดพลังงานไฟฟ้าได้ 12% ในประเทศญี่ปุ่นใช้เทคโนโลยีเก็บสะสมพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยการชดเชยระดับแรงดันไฟฟ้า และการเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานเพื่อนำกลับมาใช้อีกครั้ง ระบบรถไฟฟ้าในประเทศญี่ปุ่นเริ่มพัฒนาใช้งานแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานในปี ค.ศ. 2006 และ ค.ศ. 2007 ตามลำดับ (Okui et al., 2010) ระบบรถไฟฟ้าในประเทศญี่ปุ่นมีการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ระบบรถไฟฟ้าจำเป็นต้องมีโหลดสำหรับรับพลังงาน

จากการเบรคตลอดเวลา การนำระบบเก็บสะสมพลังงานมาใช้ในระบบรถไฟฟ้าสามารถช่วยป้องกันระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าล้มเหลวเนื่องจากพลังงานส่วนเกินได้โดยการเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าดังกล่าว และสามารถนำพลังงานกลับมาช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ในภายหลัง การใช้ประโยชน์ของพลังงานจากการเบรคแบบจ่ายคืนพลังงาน (Hayashiya, 2017) เช่น

- 1) จ่ายพลังงานไฟฟ้าจากการเบรคให้กับรถไฟฟ้ายานพาหนะใกล้เคียง
- 2) จ่ายพลังงานไฟฟ้าจากการเบรคเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายให้กับโหลดไฟฟ้าของสถานีผู้โดยสาร
- 3) จ่ายพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรคเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรง

อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่นิยมใช้ในระบบรถไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ ล้อดันกำลัง ตัวเก็บประจุยิ่งยวด หรือการใช้งานร่วมกันของอุปกรณ์ดังกล่าว เป็นต้น ซึ่งระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถติดตั้งได้ทั้งบนตัวรถไฟฟ้า (on-board) โดยปกติจะติดตั้งไว้บนหลังคา และการติดตั้งที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน หรือข้างรางวิ่ง (stationary or trackside) วัตถุประสงค์ของการใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานแตกต่างกันออกไป เช่น ลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม ลดความต้องการกำลังไฟฟ้า หรือกำลังไฟฟ้าสำรอง ชดเชยระดับแรงดันไฟฟ้า หรือการจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีแหล่งจ่าย เป็นต้น โดยรูปแบบการใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานที่เหมาะสมขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานบนตัวรถ สามารถจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้ายานพาหนะที่ไม่มีแหล่งจ่ายได้ กรณีรถไฟฟ้ายานพาหนะที่ผ่านสถานีที่ท่องเที่ยวหรือสถานีที่ประวัติศาสตร์ที่ไม่เหมาะกับการติดตั้งระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือศีรษะ เป็นต้น (Ratniyomchai et al., 2013) ความแตกต่างระหว่างการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถไฟฟ้า และการติดตั้งแบบริมทาง โดยประสิทธิภาพของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ติดตั้งบนขบวนรถจะขึ้นกับลักษณะเฉพาะของขบวนรถไฟฟ้า และประสิทธิภาพของระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งแบบริมทางจะขึ้นกับลักษณะเฉพาะของระบบ และเทคโนโลยีการสะสมพลังงาน การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถไฟฟ้า ส่วนมากจะใช้ในกรณีวิ่ง โดยไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้า (catenary free operation) แต่ค่าใช้จ่ายดำเนินการค่อนข้างแพง ดังนั้นบางระบบการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางจึงเหมาะสมกว่า (Khodaparastan et al., 2019) ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ติดตั้งบนขบวนรถ และระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน (Khodaparastan et al., 2019)

การใช้งาน	ข้อดี	ข้อเสีย
ติดตั้ง ESS บน ตัวรถไฟฟ้า	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถใช้งานเมื่อไม่มีสายส่งเหนือศีรษะได้. - ช่วยลดปัญหาแรงดันไฟฟ้าตก. - ช่วยลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากรางที่สาม และเพิ่มประสิทธิภาพ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้นทุนสูงเนื่องจากการจัดวางระบบเก็บสะสมพลังงานบนตัวรถไฟฟ้า - ข้อจำกัดด้านความปลอดภัยสูงเนื่องจากผู้โดยสารบนรถไฟฟ้า - หยุคให้บริการรถไฟฟ้าเพื่อการบำรุงรักษาและซ่อมแซม
ติดตั้ง ESS แบบ ริมทาง	<ul style="list-style-type: none"> - การบำรุงรักษา และการซ่อมแซมไม่ส่งผลต่อการให้บริการของรถไฟฟ้า - สามารถใช้งานได้ทุกขบวนรถไฟฟ้าที่วิ่งผ่าน (ภายในเขตจ่ายไฟฟ้าเดียวกัน) - ช่วยลดผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าตก 	<ul style="list-style-type: none"> - การเพิ่มขึ้นของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการรับพลังงานไฟฟ้าและการจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้า - จำเป็นต้องวิเคราะห์เพื่อหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสม

2.3 ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่ของรถไฟฟ้ากระแสดตรง

การใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่ ซึ่งอาจหมายถึงติดตั้งที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน หรือติดตั้งที่ตำแหน่งใด ๆ ระหว่างเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า การติดตั้งแบบดังกล่าวไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงเรื่องน้ำหนักและสถานที่ติดตั้งของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน แต่จำเป็นต้องวิเคราะห์เพื่อหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสม ดังนั้นการจำลองการใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่ที่มีการศึกษาในหลาย ๆ หัวข้อเพื่อวิเคราะห์หาขนาดความจุที่เหมาะสม ตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสม และกลยุทธ์การควบคุมการทำงาน เป็นต้น

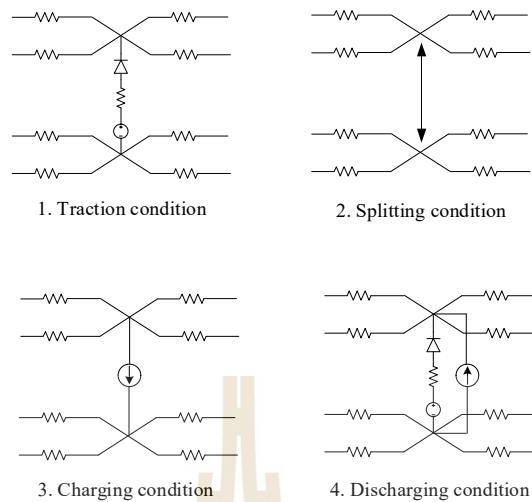
การจำลองการใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานของระบบ Brussels Metro network เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบขนส่งสาธารณะ โดยติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ผลการจำลองที่แตกต่างกัน 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลา peak time ช่วงเวลา off-peak time และช่วงเวลา weekend period พบว่าพลังงานไฟฟ้าโดยรวมประหยัดเพิ่มขึ้นเมื่อติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานมากขึ้น แต่พลังงานไฟฟ้าที่ประจุได้ต่อหน่วยระบบเก็บสะสม

พลังงานจะลดลงเมื่อจำนวนการติดตั้งมากขึ้น โดยพลังงานไฟฟ้าที่เก็บสะสมได้ต่อระบบเก็บสะสมพลังงานขึ้นกับสภาพการจราจรของรถไฟฟ้า (Barrero et al., 2008) การจำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแตกต่างกัน 5 กรณี เช่น กรณีติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน 1 ชุด 2 ชุด และ 3 ชุด ที่มีตำแหน่งติดตั้งต่างกัน เปรียบเทียบกับกรณีไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงาน ผลการจำลองพบว่า การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานช่วยลดกระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่งที่ตำแหน่งใกล้ระบบเก็บสะสมพลังงานจะเกิดแรงดันไฟฟ้าตกน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงาน และกรณีรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก ส่งผลให้เกิดแรงดันสูงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงาน (Calderaro et al., 2013)

การศึกษาการควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่ได้มีการศึกษาโดยการจำลองการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานในรูปแบบที่แตกต่างกัน งานวิจัยที่มีการศึกษาและได้ตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้วในอดีต เช่น

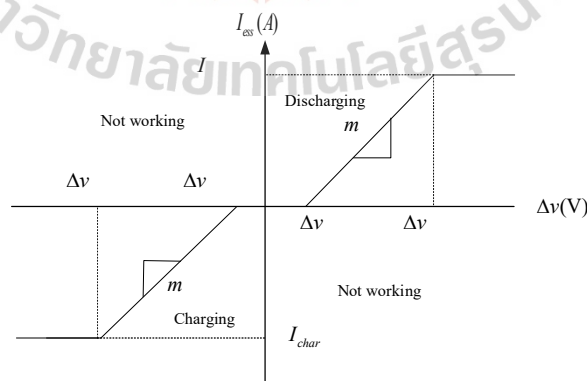
- Ciccarelli et al. (2013) เปรียบเทียบผลการจำลองรูปแบบการควบคุมระดับแรงดันที่เหมาะสมของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน และการควบคุมการแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์ระหว่างรถไฟและระบบเก็บสะสมพลังงาน เปรียบเทียบผลการจำลองตามการควบคุมการทำงาน 2 รูปแบบพบว่า ทั้ง 2 รูปแบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมของระบบได้เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงาน โดยกลยุทธ์การควบคุมระดับแรงดันที่เหมาะสมสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่ากลยุทธ์การแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์ แต่กลยุทธ์การแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์สามารถลดค่ายอดกระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และชดเชยแรงดันไฟฟ้าตกได้ดีกว่า

- Jia et al. (2014) นำเสนอรูปแบบการควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานที่พิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าร่วมกับสถานะประจุของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน และขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานเมื่อคายประจุ หรืออัดประจุ โดยงานวิจัยดังกล่าวนำเสนอการจำลองแบบพลวัต (dynamic simulation) ของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดตรงที่มีตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นระบบเก็บสะสมพลังงาน โดยนำเสนอแบบจำลองของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่แตกต่างกัน 4 สภาวะ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ สภาวะขับเคลื่อน สภาวะแยกตัว สภาวะประจุ และสภาวะคายประจุ โดยแบบจำลองของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการทำงาน



รูปที่ 2.1 แบบจำลองของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนตามสภาวะการทำงาน
ที่มาภาพ: (Jia et al., 2014)

• Ratniyomchai (2016) จำลองระบบรถไฟฟ้าที่มีระบบเก็บสะสมพลังงานทำงานตามรูปแบบการควบคุมแบบเชิงเส้นเป็นช่วง (Piece-wise Linear Characteristic) เป็นการควบคุมการทำงานตามลักษณะเชิงเส้นระหว่างกระแสไฟฟ้า และผลต่างแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งของระบบเก็บสะสมพลังงาน การทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานขึ้นกับผลต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและมากที่สุด กระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นตามความชัน m_c และ m_d ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปแบบการควบคุมเชิงเส้นเป็นช่วง
ที่มาภาพ: (Ratniyomchai, 2016)

การออกแบบขนาดความจุและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่เป็นประเด็นสำคัญที่มีการศึกษา โดยตำแหน่งที่เหมาะสมขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน งานวิจัยที่มีการศึกษาและเผยแพร่มาแล้วในอดีต เช่น

- Sirmelis, Zakis and Grigans (2015) นำเสนอการพิจารณาขนาดความจุที่เหมาะสมของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด สำหรับติดตั้งที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน โดยการพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด และพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของระบบเก็บสะสมพลังงาน พิจารณาการใช้งานของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่เหมาะสม โดยการพิจารณาความลึกของการคายประจุ (depth of discharge) และประเมินค่าใช้จ่ายจากขนาดความจุดังกล่าว

- Ratniyomchai, Hillmansen and Tricoli (2015) นำเสนอการออกแบบขนาดความจุและตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดของระบบเก็บสะสมพลังงานเหมาะที่สุดสำหรับระบบรถไฟฟ้ารางเบา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า และลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมของระบบ การหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดเป็นการจำลองติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานทุก ๆ 500 เมตรในแต่ละช่วงเขตจ่ายไฟฟ้า และมีเงื่อนไขให้ระบบเก็บสะสมพลังงานกลับมามีพลังงานเท่ากับค่าเริ่มต้นเมื่อสิ้นสุดการทำงาน ผลการจำลองพบว่า ตำแหน่งเหมาะที่สุดที่ทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีขนาดความจุน้อยที่สุด คือ ที่ตำแหน่งใกล้กับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในแต่ละช่วงของเขตจ่ายไฟฟ้า

2.4 การทดสอบและการใช้งานของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่

ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่มีการใช้งานและทดสอบการใช้งานในระบบรถไฟฟ้าหลาย ๆ ประเทศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เพิ่มเสถียรภาพของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน หรือแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตก การทดสอบติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้แบตเตอรี่ Ni-MH สำหรับรถไฟฟ้าขนส่งกระแสดตรงในเมือง New York ใช้เทคโนโลยีที่มีชื่อว่า GIGACELL ค่าความจุพลังงาน 400 kWh โดยการเชื่อมต่อโดยตรงผ่านเบรกเกอร์ความเร็วสูง (high speed circuit breaker) ใช้ระบบทดสอบ NYCT R160 Test Train ผลการทดสอบสามารถชดเชยแรงดันไฟฟ้าตกได้ 55V สะสมพลังงานจากการเบรกได้ 2.10 kWh หรือคิดเป็น 71.4% ของพลังงานจากการเบรกทั้งหมด การทดสอบการใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานจ่ายกำลังไฟฟ้ากรณีเกิดความผิดพลาดกับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ผลการทดสอบพบว่าระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้รถไฟฟ้าได้ถึง 17 ขบวน (Nishimura, et al., 2011) ในปี ค.ศ. 2013 และ 2014 ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้แบตเตอรี่ถูกติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน Haijima และ Okegawa ในประเทศญี่ปุ่น วัตถุประสงค์การใช้งานเพื่อเก็บสะสม และใช้ประโยชน์พลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน ระบบเก็บสะสมพลังงานช่วยลดการใช้กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ 4.2% และ

ช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 400 MWh/year ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน Haijama และ 700 MWh/year ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน Okegawa หรือคิดเป็น 5-8% ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแต่ละสถานี (Hayashiya, et al., 2015)

การใช้เทคโนโลยีสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้รับความนิยมทั้งการใช้งานจริงและการทดสอบการใช้งาน ในปี ค.ศ. 2002 การรถไฟใต้ดินเมืองมาดริด ประเทศสเปน (Madrid de metro) ได้ลงทุนติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อทดสอบการใช้งานสำหรับระบบขนส่ง วัตถุประสงค์เพื่อการใช้ประโยชน์พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน เพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวม โดยติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้เทคโนโลยี Siemens Sitras SES ติดตั้งที่ตำแหน่งใกล้สถานี Ventas ผลการทดสอบพบว่าความต้องการพลังงานโดยเฉลี่ยต่อขบวนรถไฟลดลง 50 kW หรือคิดเป็น 30% และช่วยเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าได้ (Radcliffe et al., 2010) ในปี ค.ศ. 2007 ประเทศจีนใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานเพื่อวัตถุประสงค์การสะสมพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน และป้องกันความผิดพลาดของระบบจ่ายไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยี SITRAS-SEC supercapacitor energy storage system ติดตั้งที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟ Beijing subway line 5 (Yang et al., 2014) ในประเทศฝรั่งเศสได้ทดสอบการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 1 kWh เพื่อเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้า ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ทดสอบถูกติดตั้งระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน Chamonix และสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน Argentiere ของรถไฟ Saint-Gervais/Vallorcine (SGVA) line ผลการทดสอบพบว่าระดับแรงดันไฟฟ้าตกลง แต่ขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีขนาดไม่เพียงพอสำหรับชดเชยแรงดันไฟฟ้าตลอดการทดสอบ (Castings et al., 2018)

2.5 สรุป

บทนี้สรุป และรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้รับการเผยแพร่ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน งานวิจัยดังกล่าวถูกใช้เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา การนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และใช้ในการยืนยันว่า ในปัจจุบันการนำเทคโนโลยีระบบเก็บสะสมพลังงานมาใช้ในระบบรถไฟสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า หรือการลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียได้จริงจากผลการจำลอง หรือผลการทดสอบการใช้งานจริงดังที่กล่าวมาแล้ว ในบทถัดไปจะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่สำคัญเกี่ยวกับระบบเก็บสะสมพลังงาน และการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน เป็นต้น ซึ่งเป็นประเด็นที่สำคัญในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

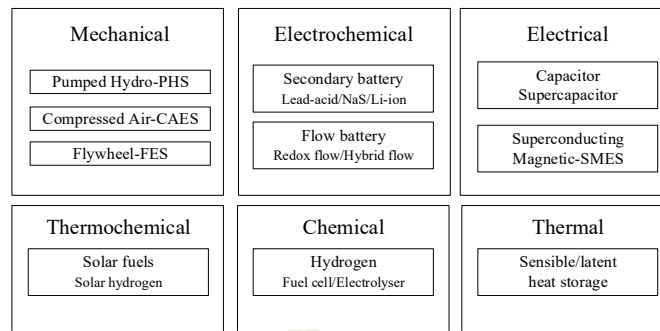
3.1 บทนำ

ระบบเก็บสะสมพลังงาน (Energy Storage System: ESS) และอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานมีความสำคัญตั้งแต่ในอดีตถึงปัจจุบัน เทคโนโลยีแบตเตอรี่เป็นตัวอย่างของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่มีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ระบบเก็บสะสมพลังงานเป็นประเด็นหลักที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ในบทนี้จึงมีเนื้อหาที่เน้นเกี่ยวกับความหมายและรายละเอียดของเทคโนโลยีสะสมพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ระบบเก็บสะสมพลังงานสำหรับระบบไฟฟ้า การเลือกใช้เทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงาน ความหมายของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง และการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานของรถไฟฟ้า และสุดท้ายกล่าวถึงระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสดตรง และรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย

3.2 เทคโนโลยีสะสมพลังงาน

การสะสมพลังงานไฟฟ้า (electrical energy storage) กล่าวถึงกระบวนการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าจากโครงข่ายกำลังงาน (power network) ให้อยู่ในรูปแบบพลังงานอื่นที่สามารถสะสมได้ และสามารถเปลี่ยนพลังงานดังกล่าวกลับมาในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้าเมื่อต้องการ (Ciccarelli, 2014) การนำเทคโนโลยีสะสมพลังงานมาประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน มีวัตถุประสงค์ของการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสะสมพลังงานกับระบบไฟฟ้าเพื่อเพิ่มเสถียรภาพ หรือความมั่นคงของระบบไฟฟ้า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะสมพลังงานในระบบพลังงานหมุนเวียนเพื่อเก็บพลังงานที่ผลิตได้ การใช้เทคโนโลยีสะสมพลังงานในระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองเพื่อป้องกันความเสียหายของข้อมูลในระบบสื่อสาร หรือการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในระบบขนส่งเพื่อลดการปล่อยมลภาวะทางอากาศจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล และลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งการผลิตไฟฟ้าในอนาคตต้องลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล และเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (Yang et al., 2014) เป็นต้น แบ่งประเภทของเทคโนโลยีสะสมพลังงานด้วยรูปแบบการเก็บพลังงานในระบบแสดงดังรูปที่ 3.1

Classification of Electrical Energy Storage Technologies



รูปที่ 3.1 ประเภทเทคโนโลยีการสะสมพลังงานตามรูปแบบการเก็บพลังงาน
ที่มา: (Luo et al., 2015)

3.2.1 พลังงานทางกล (Mechanical Energy Storage)

- Pumped Hydroelectric Storage (PHS) การปั้มน้ำขึ้นไปไว้ในอ่างเก็บน้ำที่สูงในช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้าต่ำ และปล่อยน้ำจากที่สูงเพื่อปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงมีความต้องการไฟฟ้าสูง
- Compressed Air Energy Storage (CAES) การเก็บพลังงานในรูปของอากาศที่มีความดันสูง ปล่อยพลังงานโดยการให้ความร้อนจนอากาศเกิดการขยายตัวและปั่นกังหันที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้า
- Flywheel Energy Storage (FES) การเก็บพลังงานในรูปของพลังงานจลน์สะสมพลังงานที่เกิดจากการหมุน พลังงานของล้อตุนกำลังขึ้นกับความเร็วของล้อตุนกำลังและความเฉื่อย

3.2.2 พลังงานไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Energy Storage)

- Battery Energy Storage (BES) แบตเตอรี่เก็บพลังงานในรูปแบบของพลังงานเคมี การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วทั้งสองของแบตเตอรี่ทำให้มีความต่างศักย์ไฟฟ้าแบ่งชนิดของแบตเตอรี่ตามวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น แบตเตอรี่ตะกั่ว (Lead Acid Battery) ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ใช้โลหะตะกั่ว (Pb) และออกไซด์ของตะกั่ว (PbO₂) เป็นขั้วไฟฟ้า แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม (Nickel Cadmium Battery) ใช้แผ่นนิกเกิลไฮดรอกไซด์ (Ni(OH)₂) และแผ่นแคดเมียมไฮดรอกไซด์ (Cd(OH)₂) แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium Sulphur Battery) ใช้ของเหลวซัลเฟอร์

และของเหลวโซเดียมที่ขี้ขาวและลบ แบตเตอรี่โซเดียม-นิกเกิล-คลอไรด์ (Sodium Nickel Chloride Battery) ใช้ นิกเกิล และ โซเดียมคลอไรด์กับ สารละลายอเล็กโทโรไลต์เตตระคลอโรลูมินาต (Tetrachloroaluminate) ที่ ขี้ไฟฟ้าขาว และใช้ของเหลวโซเดียมที่ขี้ไฟฟ้าลบ แบตเตอรี่ลิเทียม (Lithium Ion Battery) ใช้สารประกอบของโลหะกับลิเทียมออกไซด์และ โครงสร้างของคาร์บอนแกรไฟท์ที่ขี้ไฟฟ้า ใช้เกลือของลิเทียมละลายใน สารอินทรีย์คาร์บอเนตเป็นอเล็กโทโรไลต์ (Organic Carbonates) เป็นต้น

- Flow Battery แบตเตอรี่ที่มีการไหลของส่วนเก็บพลังงาน เกิดจากปฏิกิริยา รีดักชัน-ออกซิเดชัน (Reduction-Oxidation reactions) โดยสารละลายอเล็กโทโรไลต์อยู่ในถังภายนอกเซลล์ไหลผ่านเข้าไปในเซลล์เพื่อเกิดปฏิกิริยา แบ่ง ได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้ 1. แบตเตอรี่วานาเดียม (Vanadium Redox Battery: VRB) ใช้สารละลายวานาเดียมในกรดซัลฟิวริกเจือจางเป็นสารละลายอเล็กโทโรไลต์ 2. แบตเตอรี่สังกะสี-โบรมีน (Zinc Bromine Battery: ZnBr) ใช้ สารละลายอเล็กโทโรไลต์ 2 ชนิดไหลผ่านขี้ไฟฟ้าคาร์บอนพลาสติกในแต่ละ เซลล์ของ ZnBr 3. แบตเตอรี่พอลิซัลไฟด์โบรมไมด์ (Polysulphide Bromide Battery: PSB) ใช้สารละลายเกลือโซเดียมโบรมไมด์ (NaBr) และโซเดียมพอลิซัลไฟด์ (Na_2S_x) เกิดปฏิกิริยาผันกลับทางเคมี

3.2.3 พลังงานไฟฟ้า (Electrical Energy Storage)

- Capacitor and Supercapacitor ตัวเก็บประจุและตัวเก็บประจูงยิ่งยวดเก็บ พลังงานในรูปแบบของประจุไฟฟ้า ตัวเก็บประจูงยิ่งยวดประกอบไปด้วย 2 อเล็กโทโรด สารอเล็กโทโรไลต์ และขี้ไฟฟ้าคาร์บอนที่มีรูพรุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ ในการประจุไฟฟ้า ส่งผลให้มีความหนาแน่นพลังงานมากกว่าตัวเก็บประจุ แบบดั้งเดิม
- Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) เก็บพลังงานในรูปแบบของ พลังงานไฟฟ้าโดยตรงผ่านตัวเหนี่ยวนำในสนามแม่เหล็ก ประกอบไปด้วยตัว เหนี่ยวนำที่ทำจากวัสดุยิ่งยวด (superconductor) และวงแหวน (circular)

3.2.4 พลังงานเคมีความร้อน (Thermochemical Energy Storage) การผลิตพลังงานจาก แสงอาทิตย์เกิดจากอนุภาคโฟตอน (Photon) ตกกระทบแผ่นซิลิคอน สารกึ่งตัวนำเป็นพาหะนำ ไฟฟ้าเกิดความต่างศักย์ที่ขี้ของเซลล์แสงอาทิตย์

3.2.5 พลังงานเคมี (Chemical Energy Storage) พลังงานไฟฟ้าและความร้อนเป็นผลผลิตจากเซลล์เชื้อเพลิงจากการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจน (Hydrogen) และออกซิเจน (Oxygen) ความหนาแน่นของพลังงานไม่ขึ้นกับอัตราการประจุหรือการคายประจุของระบบ

3.2.6 พลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage) เป็นการนำพลังงานจากการเปลี่ยนสถานะของสสารโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนอุณหภูมิโดยไม่เปลี่ยนสถานะ พลังงานความร้อนที่ได้นำไปต้มน้ำเพื่อปั่นกังหันในการผลิตไฟฟ้า

3.3 การใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงาน

การนำเทคโนโลยีสะสมพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น เช่น เทคโนโลยีที่สะสมพลังงานในรูปแบบของพลังงานทางกล หรือการสะสมพลังงานในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า มีการนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายวัตถุประสงค์ เช่น การใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานช่วยจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าในช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า การใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองเพื่อป้องกันความเสียหายของข้อมูล หรือการใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบขนส่ง เป็นต้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.3.1 ระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบไฟฟ้า

โหลดของระบบไฟฟ้าเป็นโหลดที่ขึ้นกับสถานที่ ช่วงเวลา หรือฤดูกาล เช่น เขตอุตสาหกรรมมีความต้องการใช้ไฟฟ้าในปริมาณที่สูง และต้องการความมั่นคงทางไฟฟ้าสูงมากกว่าเขตที่อยู่อาศัย และเขตที่อยู่อาศัยใช้โหลดทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันขึ้นกับช่วงเวลาและวันในสัปดาห์ หรือปริมาณการใช้โหลดทางไฟฟ้าในฤดูร้อนมีค่ามากกว่าในฤดูหนาว เป็นต้น (Huggins, 2010) ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานเพื่อแก้ปัญหาในระบบไฟฟ้า ดังนี้

- ใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ากรณีเกิดระบบไฟฟ้าล้มเหลวและต้องใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องผลิตกำลังไฟฟ้าใหม่อีกครั้ง กรณีนี้ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม
- นำระบบเก็บสะสมพลังงานมาใช้ช่วยลดปัญหาความไม่แน่นอนของระดับแรงดันทั้งฝั่งไฟฟ้าแรงสูงและฝั่งไฟฟ้าแรงต่ำ เพื่อป้องกันความเสียหายของเครื่องใช้ไฟฟ้า หรือชดเชยแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูง
- การนำระบบเก็บสะสมพลังงานมาประยุกต์ใช้เพื่อเก็บพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีความต้องการโหลดไฟฟ้าต่ำ และจ่ายพลังงานไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการโหลดทางไฟฟ้าสูง (shaving of extreme peaks) เป็นการใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานป้องกันปัญหาการล้มเหลวของระบบไฟฟ้าเนื่องจากภาระทางไฟฟ้าเกิน

3.3.2 ระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบพลังงานหมุนเวียน

การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเป็นการผลิตไฟฟ้าที่ไม่ทำให้เกิดมลพิษ เช่น พลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic system) ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็น การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่มีวันหมด ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ ซึ่งเป็น แนวคิดสำหรับพลังงานยั่งยืน (Sustainable energy) (Yongqing et al., 2017) นอกจากนี้การเชื่อมต่อ ระบบการผลิตพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นการเพิ่มกำลังการผลิตให้กับ ระบบ แต่เนื่องจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ไม่ว่าจะเป็นจากพลังงาน แสงอาทิตย์ หรือพลังงานจากลม เป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบสุ่มหรือยากต่อการคาดเดา (Robyns, 2015) ดังนั้นการนำระบบเก็บสะสมพลังงานเข้ามาช่วยแก้ปัญหาความไม่ต่อเนื่องของ กำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าจากระบบผลิตพลังงานหมุนเวียนเพื่อป้องกันการตัดการเชื่อมต่อจาก โครงข่ายไฟฟ้าแบบกะทันหัน กรณีไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ เทคโนโลยีการสะสมพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน ขนาด 32MW/8MWh ถูกติดตั้งสำหรับ ระบบผลิตไฟฟ้าจากลมที่ภูเขาโลเรด (Luarel Mountain) (Luo et al., 2015)

3.3.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง

เทคโนโลยีแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาความเสียหายของ ทั้งข้อมูลและอุปกรณ์จากระบบไฟฟ้าขัดข้อง เช่น ศูนย์กลางข้อมูล (Data centers) โครงข่ายการ สื่อสาร (Communications network) ระบบเครือข่าย (Network server) โรงพยาบาล หรือโรงงาน อุตสาหกรรมที่ต้องการความมั่นคงทางไฟฟ้าสูง เพื่อป้องกันความเสียหายของเครื่องจักรราคาแพง เป็นต้น ในอดีตแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (lead acid battery) แต่ในปัจจุบัน เทคโนโลยีตัวเก็บประจุยิ่งยวดและเทคโนโลยีใหม่ของแบตเตอรี่ได้รับความนิยม เช่น แบตเตอรี่ ลิเทียม-ไอออน (Lithium-ion) แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม (Nickel-cadmium) เป็นต้น (Maher, 2005) ABB PCS 100 UPS-I ถูกพัฒนาโดยบริษัท ABB เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองสำหรับ โรงงาน อุตสาหกรรมที่ใช้โหลดสามเฟสสมดุล (three-phase balanced loads) ใช้เทคโนโลยีสะสมพลังงาน ด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด สามารถใช้งานได้ที่ระดับแรงดัน 208 V ถึง 480 V ด้วย กำลังไฟฟ้า 150 kVA ถึง 3000 kVA (Elliott, et al., 2018)

3.3.4 ระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบขนส่ง

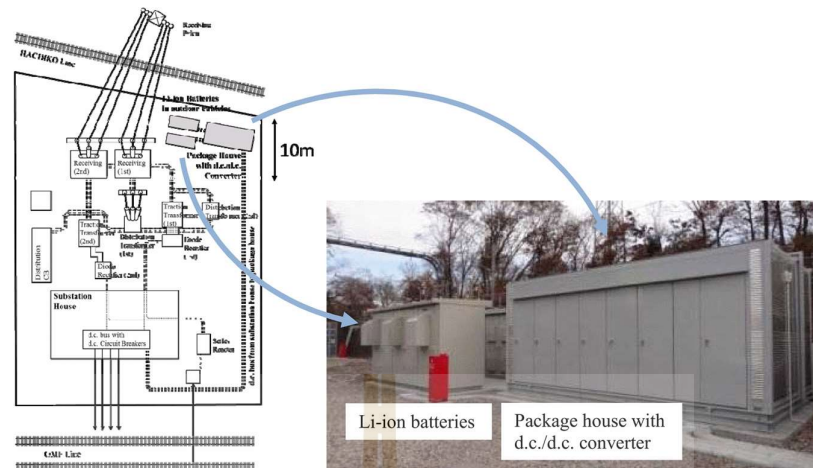
ระบบขนส่งมีความสำคัญต่อชีวิตมนุษย์ทั้งทางด้านการเดินทาง ทางด้าน อุตสาหกรรม หรือการขนย้ายสินค้า เป็นต้น ระบบขนส่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการปล่อยสาร ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นสารมลพิษหรือเป็นก๊าซที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก การนำพลังงาน ทดแทนมาใช้ในระบบขนส่งจึงเป็นหัวข้อให้กับนักวิจัยในปัจจุบันได้พัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้ไฟฟ้า แทนน้ำมัน ทั้งรถยนต์ส่วนบุคคลไฟฟ้า รถบัสไฟฟ้า หรือรถไฟไฟฟ้า เป็นต้น การใช้ไฟฟ้าในระบบ

ขนส่งเป็นการใช้พลังงานสะอาดที่ไม่เกิดของเสียหรือมลพิษ ใช้ระบบไฟฟ้าเพียงระบบเดียว สามารถจ่ายให้ทั้งระบบกำลังและระบบควบคุม และสามารถเก็บพลังงานกลับมาใช้ใหม่ได้เมื่อเบรก (Brunet, 2010)

3.4 เทคโนโลยีสะสมพลังงานสำหรับระบบรถไฟฟ้า

3.4.1 แบตเตอรี่ (Batteries)

ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้แบตเตอรี่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบรถไฟฟ้าเพื่อแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกและลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ในประเทศญี่ปุ่น แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน (Li-ion) ถูกติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน Myodani, Shin-Hikida และ Itayado เพื่อชดเชยระดับแรงดันไฟฟ้าตก และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในปี ค.ศ. 2005, 2006 และ 2007 ตามลำดับ หลังจากมีการติดตั้งแบตเตอรี่ที่ Itayada substation ในปี ค.ศ. 2007 สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 310 MWh/year แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH) ถูกติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน Komagawa ของรถไฟฟ้า Tanimachi line เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก (Okui et al., 2010) ที่ Haijima substation และ Okegawa substation ติดตั้งแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน (Li-ion) สำหรับเก็บพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน และนำพลังงานดังกล่าวกลับมาใช้เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน สามารถลดพลังงานได้ถึง 400 MWh/year และ 700 MWh/year ตามลำดับ ระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งที่ตำแหน่ง Haijima substation แสดงดังรูปที่ 3.2 (Hayashiya, et al., 2015) ที่นครนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทดสอบการติดตั้งแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH) ขนาด 400 kWh เทคโนโลยีจากผู้ผลิต Kawasaki ชื่อว่า GIGACELL ทดสอบด้วยรถไฟฟ้า NYCT R160 (10 car train) ผลการทดสอบติดตั้งแบตเตอรี่ในระบบ แรงดันไฟฟ้าตกเพียง 64 V จากปกติ 122 V กรณีไม่มีแบตเตอรี่ในระบบ สามารถเก็บพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานได้ 2.10 kWh หรือ 71.4% ของพลังงานเบรกทั้งหมด และแบตเตอรี่ดังกล่าวสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้าได้ 17 ขบวน ในระยะทาง 1.22 km กรณีเกิดระบบไฟฟ้าขัดข้องหรือไฟฟ้าดับ (Nishimura, et al., 2011) นอกจากนี้ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้แบตเตอรี่ถูกติดตั้งบนรถไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนกรณีไม่มีแหล่งจ่ายจากภายนอก เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านสถานที่ที่ขาดต่อการติดตั้งสายตัวนำพาดอากาศหรือรางที่สาม เช่น อุโมงค์หรือสถานที่ทางประวัติศาสตร์ แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH) ถูกติดตั้งบนรถแตรม (Citadis tramway) ในเมืองนิซ (Nice) ประเทศฝรั่งเศสสำหรับเคลื่อนที่ผ่าน Place Masena และ Place Garibaldi (Ratniyomchai et al., 2013)



รูปที่ 3.2 แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน ติดตั้งที่ HAIJIMA Substation

ที่มา: (Hayashiya, et al., 2015)

3.4.2 ล้อตุ้มกำลัง (Flywheel)

ล้อตุ้มกำลังสะสมพลังงานในรูปแบบของพลังงานจลน์ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบรถไฟฟ้าเพื่อชดเชยระดับแรงดันไฟฟ้าตกในระบบไฟฟ้า เก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานเพื่อนำกลับมาใช้ หรือเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากรณีไม่มีแหล่งจ่ายจากภายนอก เป็นต้น ล้อตุ้มกำลังเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการกำลังสูงในช่วงเวลาสั้น ๆ มีความถี่สูงในการสะสมและจ่ายพลังงาน การทำงานของล้อตุ้มกำลังกรณีที่ล้อตุ้มกำลังทำงานในโหมดสะสมพลังงาน ล้อตุ้มกำลังจะทำงานเป็นมอเตอร์และ โรเตอร์ของล้อตุ้มกำลังมีความเร็วเพิ่มขึ้น กรณีทำงานในโหมดจ่ายพลังงาน ล้อตุ้มกำลังทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความเร็วโรเตอร์ลดลง (Dutta et al., 2018) ปริมาณพลังงานที่สะสมในล้อตุ้มกำลังขึ้นอยู่กับความเร็วการหมุนและความเฉื่อย ล้อตุ้มกำลังแบ่งออกเป็นล้อตุ้มกำลังชนิดความเร็วต่ำ ซึ่งมีความเร็วต่ำกว่า 6000 rpm และล้อตุ้มกำลังชนิดความเร็วสูง ซึ่งมีความเร็วสูงถึง 100000 rpm (Luo et al., 2015) พลังงานของล้อตุ้มกำลัง (E_{fw}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.1) โดยที่ J คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) และ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของล้อตุ้มกำลัง

$$E_{fw} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (3.1)$$

กำลังของล้อตุนกำลัง (P_{fw}) และแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (T_{fw}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.2) และ (3.3)

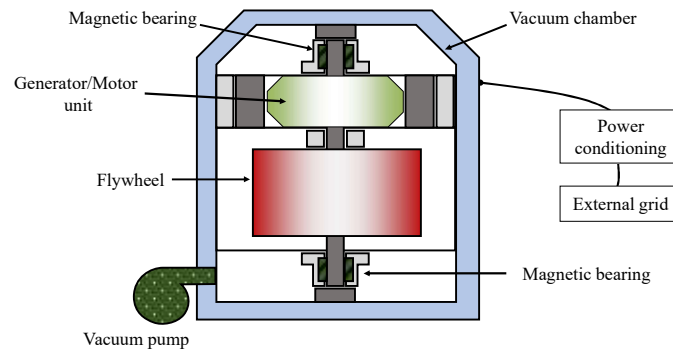
$$P_{fw} = \frac{dE}{dt} \quad (3.2)$$

$$T_{fw} = \frac{P_{fw}}{\omega} \quad (3.3)$$

ความเร็วในการทำงานของล้อตุนกำลังจะอยู่ในช่วงความเร็วสูงสุดในการทำงานและความเร็วต่ำสุด ($\omega_{max}, \omega_{min}$) พลังงานสะสมภายในล้อตุนกำลังสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.4)

$$E_{fw} = \frac{1}{2} J (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \quad (3.4)$$

ในปี ค.ศ. 2000 มีการทดลองใช้ล้อตุนกำลังในระบบรถไฟใต้ดิน London Underground's Piccadilly line ทดสอบการใช้งานล้อตุนกำลังขนาด 100 kW ติดตั้งขนานกัน 3 ตัว สามารถสะสมพลังงานได้ถึง 3 kWh ด้วยความเร็วของล้อตุนกำลัง 37800 rpm ทดสอบในระบบแรงดันปกติ 630 Vdc แรงดันตกเพียง 100 V จากปกติ 180 V กรณีไม่มีล้อตุนกำลังในระบบ (Radcliffe et al., 2010) ในประเทศญี่ปุ่นเริ่มประยุกต์ใช้งานล้อตุนกำลังในระบบรถไฟใต้ดินตั้งแต่ปี ค.ศ. 1988 ติดตั้งที่ Zushi post ของระบบ Electric Express Railway เพื่อสะสมพลังงานจากการเบรกในรูปแบบพลังงานทางกล และนำพลังงานกลับมาจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าอีกครั้ง ผลการทดสอบสามารถสะสมพลังงานได้ทั้งหมด 12% ของพลังงานเบรกทั้งหมด (Okui et al., 2010) ล้อตุนกำลังขนาด 325 kW 4 kWh 20000 rpm ถูกติดตั้งบนหลังคารถแตรมที่เมือง Rotterdam ประเทศ Netherlands เพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากรณีไม่มีแหล่งจ่ายจากภายนอก (Ratniyomchai et al., 2013) ข้อเสียของล้อตุนกำลัง คือ มีพลังงานสูญเสียสูงถึง 20% ของพลังงานที่สะสมต่อชั่วโมง จึงทำให้ล้อตุนกำลังไม่สามารถใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานเพียงตัวเดียวได้ ต้องประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบเก็บสะสมพลังงานอื่น ๆ เป็นต้น (Luo et al., 2015) รูปที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของระบบล้อตุนกำลัง

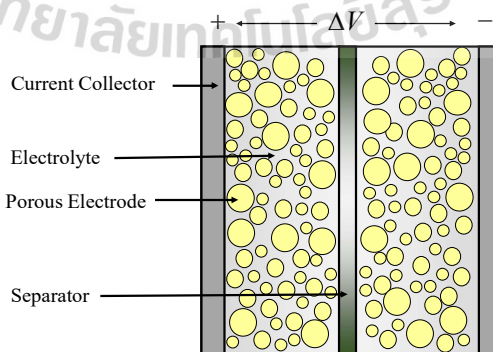


รูปที่ 3.3 รายละเอียดของระบบล้อตุนกำลัง

ที่มาภาพ: (Luo, Wang, Dooner, และ Clarke, 2015)

3.4.3 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor)

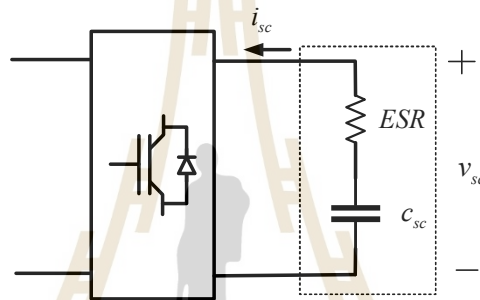
ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าต้องการการประจุ (Charge) และคายประจุ (Discharge) ที่ตอบสนองในช่วง 10 วินาที ถึง 1 นาที ดังนั้นคุณลักษณะการตอบสนองมีความสำคัญมากกว่าความหนาแน่นของพลังงาน (Okui, et al., 2010) ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีคุณสมบัติที่สามารถประจุ และคายประจุได้เร็วเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ มีความหนาแน่นกำลังงานสูง มีอายุการใช้งานสูงถึง 100000 รอบ และมีประสิทธิภาพสูงถึง 84 - 97% แต่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีความหนาแน่นพลังงานน้อย (Luo et al., 2015) เนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถประจุและคายประจุได้อย่างรวดเร็ว และความหนาแน่นกำลังงานสูง ทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้รับความนิยมนำมาใช้สำหรับเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานในระบบขนส่ง (Ratniyomchai et al., 2013)



รูปที่ 3.4 โครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

[เข้าถึงเมื่อ 8 พฤษภาคม 2563]

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นตัวเก็บประจุชนิดหนึ่งที่มีค่าประจุสูงในหน่วยฟารัด (farad) ถึงกิโลฟารัด (kilo-farad) ตัวเก็บประจุยิ่งยวดประกอบด้วยขั้วบวกและขั้วลบที่มีรูพรุนจำนวนมาก (porous electrodes) แฉกั้นระหว่างขั้ว (separator) และสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) การที่มีรูพรุนสูงส่งผลให้เพิ่มพื้นที่การกักเก็บของประจุ โครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแสดงดังรูปที่ 3.4 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีค่าความต้านทานภายใน (Equivalent Series Resistance: ESR) ส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียขณะประจุและคายประจุ ความต้านทานภายในแสดงถึงประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะทำงานร่วมกับวงจรแปลงผันสองทาง (DC-DC bidirectional converter) ดังแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

พลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (E_{sc}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.5) โดยที่ c_{sc} คือ ค่าความประจุในหน่วยฟารัด (F) และ v_{sc} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และกำลังงานสูงสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ($P_{sc,max}$) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.6)

$$E_{sc} = \frac{1}{2} c_{sc} v_{sc}^2 \quad (3.5)$$

$$P_{sc,max} = \frac{1}{4} \frac{v_{sc}^2}{ESR} \quad (3.6)$$

ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ทำงานร่วมกับวงจรแปลงผันมีข้อจำกัดของกระแสไฟฟ้า เพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าสูงเมื่อแรงดันไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานต่ำ ดังนั้นการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด นิยมจ่ายพลังงานให้แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของระบบ

พลังงานที่สามารถใช้ได้ของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ($E_{sc,useable}$) แสดงดังสมการที่ (3.7) (Killer et al., 2012) โดยพลังงานที่สามารถใช้ได้ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเท่ากับ 75% ของพลังงานตัวเก็บประจุยิ่งยวดสูงสุด

$$E_{sc,useable} = \frac{1}{2} c_{sc} \left[v_{sc,max}^2 - (0.5v_{sc,max})^2 \right] = 0.75 \left[\frac{1}{2} c_{sc} v_{sc,max}^2 \right] \quad (3.7)$$

สถานะประจุ (State of Charge: SOC) ของระบบเก็บสะสมพลังงาน คือ สถานะของพลังงานที่สะสมภายในระบบเก็บสะสมพลังงานเทียบกับพลังงานสูงสุดของระบบเก็บสะสมพลังงาน สถานะประจุสามารถคำนวณ ได้ดังสมการที่ (3.8)

$$SOC = \frac{E_{sc}}{E_{sc,max}} \times 100 = \frac{\frac{1}{2} c_{sc} v_{sc}^2}{\frac{1}{2} c_{sc} v_{sc,max}^2} \times 100 \quad (3.8)$$

ความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge: DOD) คือ ร้อยละพลังงานของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ถูกใช้งาน หรือคายประจุไป เช่น กรณีที่ระบบเก็บสะสมพลังงานมีค่า SOC เท่ากับ 80% แสดงว่าความลึกของการคายประจุจะเท่ากับ 20% ค่าความลึกของการคายประจุ ดังสมการที่ (3.9)

$$DOD = \left(1 - \frac{E_{sc}}{E_{sc,max}} \right) \times 100 \quad (3.9)$$

ในปัจจุบันเทคโนโลยีตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีหลากหลายบริษัทผู้ผลิตวางจำหน่าย โมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งสามารถนำโมดูลที่มีการจำหน่ายมาประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ได้ ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่าง โมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากบริษัทผู้ผลิต การประยุกต์ใช้โมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถออกแบบจำนวน โมดูลของตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้โดยพิจารณาพลังงานสะสมของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กำลังไฟฟ้าสูงสุด กระแสไฟฟ้าสูงสุด การออกแบบจำนวน โมดูลของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.10) – (3.15) จำนวน โมดูลที่ต้องใช้ทั้งหมด (N_{total}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.10)

โดยที่ $E_{ess,total}$ และ $E_{sc,module}$ คือ พลังงานสะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ต้องการ และ พลังงานสะสมของโมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด ตามลำดับ

$$N_{total} = \frac{E_{ess,total}}{E_{sc,module}} \quad (3.10)$$

จำนวนโมดูลที่ต่อในแบบอนุกรมของระบบเก็บสะสมพลังงานจะขึ้นกับระดับ แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการออกแบบ สามารถคำนวณจำนวนโมดูลที่ต่อในแบบอนุกรม (N_s) และการ ต่อในแบบขนาน (N_p) ได้ดังสมการที่ (3.11) - (3.12) โดยที่ $v_{ess,max}$ และ $v_{sc,n}$ คือ แรงดันไฟฟ้า ของระบบเก็บสะสมพลังงานสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าของโมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด ตามลำดับ

$$N_s = \frac{v_{ess,max}}{v_{sc,n}} \quad (3.11)$$

$$N_p = \frac{N_{total}}{N_s} \quad (3.12)$$

กระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบเก็บสะสมพลังงาน ($I_{ess,max}$) ปริมาณความจุไฟฟ้า รวมในหน่วยฟารัด (Farad) ($C_{ess,total}$) และค่าความต้านทานภายในรวมของระบบเก็บสะสม พลังงาน ($ESR_{ess,total}$) จากการต่อโมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบอนุกรมและแบบขนาน สามารถ คำนวณได้ดังสมการที่ (3.13) - (3.15) โดยที่ $I_{sc,max}$ คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดของโมดูลตัวเก็บประจุ ยิ่งยวด C_{sc} คือ ปริมาณความจุไฟฟ้าในหน่วยฟารัดของโมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด และ ESR_{sc} คือ ความต้านทานภายในของโมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Killer et al., 2012)

$$I_{ess,max} = N_p \times I_{sc,max} \quad (3.13)$$

$$C_{ess,total} = C_{sc} \times \frac{N_p}{N_s} \quad (3.14)$$

$$ESR_{ess,total} = ESR_{sc} \times \frac{N_s}{N_p} \quad (3.15)$$

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างโมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด

Module	GTSM-48V165FUS	3550-48-B-1.5C-M-SD-300RCB	BMOD0063 P125	LSUM 129R6C 0062F EA
Producer	Shanghai Green Tech	Kilowatt Labs	Maxwell	LS Ultracapacitor
Capacitance	165 F	-	63 F	62 F
Max. ESR	5 m Ω	≤ 4 m Ω	18 m Ω	13.2 m Ω
Rated Voltage	48 V	48 V	125 V	129.6 V
Max. Continuous current	100 A	290 A	150 A	260 A
Specific Power	3850 W/kg	-	1750 W/kg	2700 W/kg
Max. Stored Energy	52.8 Wh	3550 Wh	101.7 Wh	144.6 Wh
Weight	14.5 kg	69 kg	59.5 kg	55 kg

ตารางที่ 3.2 แสดงตัวอย่างผลการออกแบบจำนวน โมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด สำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 3.60 kWh โดยกำหนดให้ระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 1000 A และมีแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 900 V ใช้ข้อมูลโมดูล LSUM 129R6C 0062F EA

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการออกแบบจำนวน โมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 3.60 kWh

Module	N_p	N_s	$I_{ess,max}$ (A)	$v_{ess,max}$ (V)	$C_{ess,total}$ (F)	$ESR_{ess,total}$ (m Ω)
LSUM 129R6C 0062F EA	4	7	1040	907	35.43	23.10

ในปี ค.ศ. 2002 เทคโนโลยีเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด Siemens Sitrans SES energy storage system ขนาด 1 MW 2.3 kWh ถูกติดตั้งในระบบรถไฟฟ้าใต้ดินของเมือง มาดริด ประเทศสเปน (Madrid de Metro) จากผลการทดสอบ ระบบสามารถลดกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยได้ถึง 50 kW ต่อ 1 ขบวน หรือคิดเป็น 30% (Okui et al., 2010) ตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 2560 kW 6.875 kWh ถูกติดตั้งเพื่อทดสอบที่ตำแหน่งระหว่าง Agano substation และ Shoumaru substation ที่ประเทศญี่ปุ่น ในปี ค.ศ. 2007 สามารถเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 5.9 kWh หรือ 77% ของพลังงานจากการเบรกทั้งหมด (Okui et al., 2010) ในประเทศจีน เทคโนโลยี SITRAS-SEC จากบริษัท Siemens ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสะสมพลังงานขนาด 94 F 2.5 kWh ติดตั้งสำหรับเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานในระบบรถไฟฟ้า ระยะทางรวม 27.6 km ของ Beijing subway Line 5 ในปี ค.ศ. 2007 (Yang et al., 2014) ในประเทศ

ฝรั่งเศสได้ทดสอบการใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานโดย SNCF (French Railway Company) ด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ติดตั้งแบบริมทางขนาด 1 kWh ระหว่าง Chamonix substation ถึง Argentiere substation ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ระยะทางรวม 1.365 km ความชันทางวิ่งสูงสุด 9% ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานเพื่อช่วยลดระดับแรงดันไฟฟ้าตกในระบบ ผลการทดสอบสามารถลดระดับแรงดันไฟฟ้าตกได้ 26 V ในครั้งแรกที่เกิดแรงดันตก (Castaings et al., 2018) ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้แบตเตอรี่ร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด เพื่อใช้คุณสมบัติความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่ร่วมกับคุณสมบัติการประจุและคายประจุเร็วของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เทคโนโลยี Sitrax HES hybrid energy storage system ของผู้ผลิต Bombardier ประกอบด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำงานร่วมกับแบตเตอรี่นิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ วัตถุประสงค์เพื่อใช้สะสมพลังงานจากการเบรก และเป็นแหล่งจ่ายสำหรับขบวนรถไฟฟ้ายานยนต์ที่ไม่มีแหล่งจ่ายจากภายนอก ในปี ค.ศ. 2008 เทคโนโลยี Sitrax HES ถูกติดตั้งบนรถแตรมที่ให้บริการระหว่างเมือง Almada และ Seixal ในประเทศโปรตุเกส สามารถเคลื่อนที่ได้ถึง 2.5 km โดยไม่มีแหล่งจ่ายจากภายนอก (Rufer, 2010)

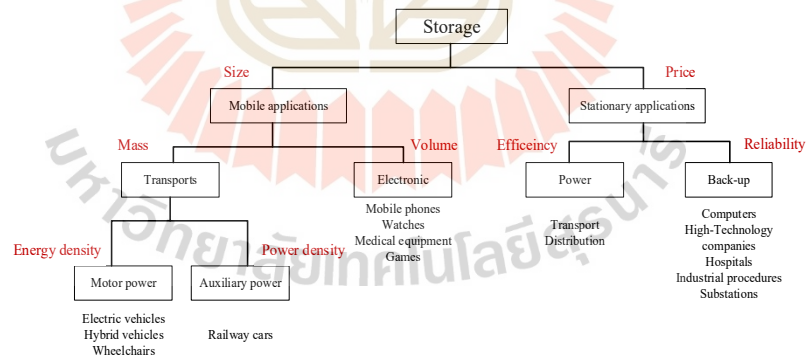


รูปที่ 3.6 ตู้คอนเทนเนอร์ของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่งระหว่าง Chamonix substation ถึง Argentiere substation

ที่มาภาพ: (Castaings et al., 2018)

3.5 การเลือกใช้เทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงาน

วัตถุประสงค์การใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานในปัจจุบันมีหลากหลายดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ตัวอย่างเช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพิ่มความมั่นคงของระบบไฟฟ้าให้กับผู้ใช้งาน หรือการเพิ่มความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพของการจัดการพลังงาน เป็นต้น การเลือกอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ ต้องคำนึงถึงต้นทุนค่าใช้จ่าย ความต้องการความจุพลังงานของอุปกรณ์ รูปแบบการใช้งาน หรือผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Brunet, 2010) เงื่อนไขเกณฑ์การเลือกเทคโนโลยีให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน และข้อจำกัดแสดงดังรูปที่ 3.7 เทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงานสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และความเหมาะสมของการใช้งานนั้น ๆ เช่น การประยุกต์ใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานที่เคลื่อนที่ได้ (Mobile applications) ต้องคำนึงถึงขนาดของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน น้ำหนักของอุปกรณ์ ความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการใช้งาน และปริมาณความจุพลังงานที่เหมาะสมกับการใช้งาน กรณีใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานที่อยู่นิ่งหรือไม่เคลื่อนที่ (Stationary applications) น้ำหนักของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานไม่ได้เป็นปัญหาที่ต้องคำนึงถึง แต่ประสิทธิภาพในการทำงานหรือต้นทุนค่าใช้จ่ายเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงมากกว่า ในระบบรถไฟฟ้า การเลือกใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานขึ้นกับความเหมาะสม และวัตถุประสงค์หลักของการใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงาน

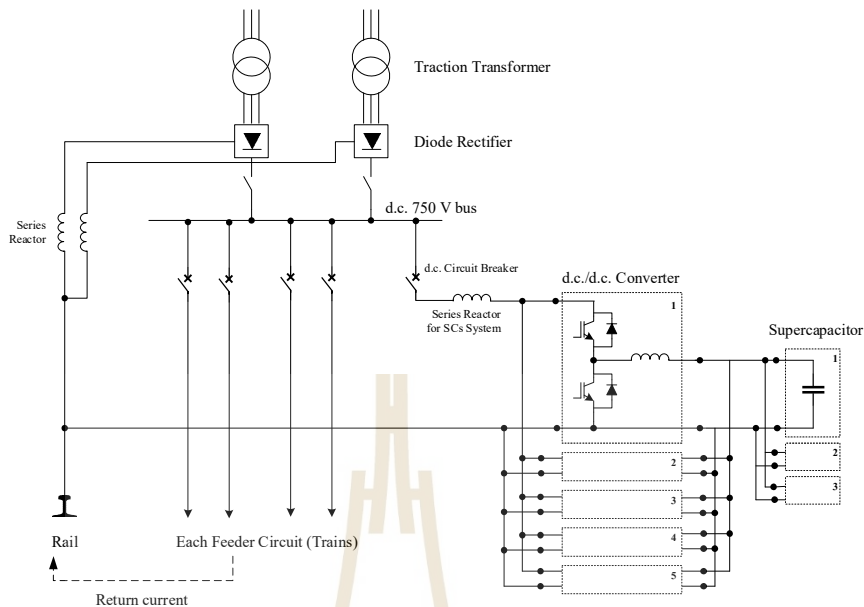


รูปที่ 3.7 เงื่อนไขและเกณฑ์การเลือกใช้เทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงานตามการใช้งาน
ที่มาภาพ: (Brunet, 2010)

การเลือกใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบรถไฟฟ้า รถไฟฟ้าที่มีความถี่ในการให้บริการสูงในบางพื้นที่ การแลกเปลี่ยนพลังงานของรถไฟฟ้าใกล้เคียงในเขตจ่ายไฟฟ้าเดียวกัน อาจเพียงพอต่อการรับพลังงานจากการเบรกทั้งหมด ดังนั้นระบบเก็บสะสมพลังงานจึงไม่มีความสำคัญ (Hayashiya, 2017) การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถไฟฟ้าสามารถช่วยแก้ปัญหากรณีรถไฟฟ้าต้องเคลื่อนที่ผ่านสถานที่ที่ยากต่อการติดตั้งระบบส่งจ่าย (Ratniyomchai et al., 2013) การใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่ติดตั้งที่ตำแหน่งเกิดแรงดันไฟฟ้าตกมาก เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่งพร้อมกันหลายขบวน หรือการใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองให้กับรถไฟฟ้ากรณีเกิดระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนล้มเหลว เป็นต้น ซึ่งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่นิ่งอาจมีระยะทางจำกัดของการทำงานระบบเก็บสะสมพลังงาน และเพิ่มพลังงานไฟฟ้าสูญเสียภายในตัวนำรางที่สาม

3.6 ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง

ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง กล่าวถึงระบบที่มีการนำอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.4 ประยุกต์ใช้กับระบบรถไฟฟ้าโดยติดตั้งที่ตำแหน่งใด ๆ ระหว่างเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางเป็นการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่ ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ซึ่งอาจหมายถึงระบบเก็บสะสมพลังงานที่ติดตั้งที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Stationary Energy Storage System) หรือการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่งใด ๆ ระหว่างเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า (Wayside Energy Storage System) แนวคิดหลักของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง คือ การรับพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก และจ่ายพลังงานดังกล่าวกลับสู่ระบบรถไฟฟ้าเมื่อมีความต้องการพลังงาน (Khodaparastan et al., 2019) ข้อดีของการใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานแบบติดตั้งอยู่กับที่ คือ ไม่ต้องคำนึงถึงน้ำหนักของระบบเก็บสะสมพลังงาน ง่ายต่อการซ่อมบำรุง และไม่ต้องหยุดให้บริการเดินรถไฟฟ้า รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างแผนภาพวงจรของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง

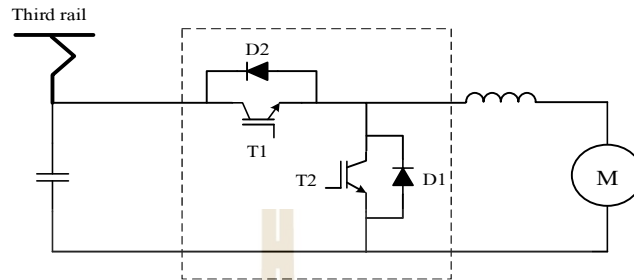


รูปที่ 3.8 แผนภาพวงจรของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่สำคัญสำหรับระบบไฟฟ้า
ขับเคลื่อนกระแสดตรง
ที่มาภาพ: ดัดแปลงจาก (Hayashiya, et al., 2015)

3.7 การเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน

การเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (regenerative braking) เป็นเทคโนโลยีขับเคลื่อนในรถไฟฟ้ามหานคร การเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานเป็นการเปลี่ยนการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะที่รถไฟทำงานในโหมดเบรก และจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับเข้าสู่รางตัวนำที่สามหรือสายส่งพาดอากาศ เมื่อเกิดการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานของรถไฟฟ้ามหานครกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายให้กับรถไฟฟ้ามหานครใกล้เคียงที่ทำงานในโหมดขับเคลื่อนขณะนั้นได้ เพื่อป้องกันระบบไฟฟ้าล้มเหลวเนื่องจากกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานกรณีโหดไฟฟ้ามีค่าน้อยเมื่อเกิดการเบรก โดยปกติการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานจะทำงานร่วมกับการเบรกแบบพลวัต คือ การนำกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกจ่ายให้กับตัวต้านทานการเบรก เพื่อจำกัดพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินให้หายไปในรูปแบบของความร้อน (กุลสุวรรณิชพงษ์, 2561) หรือการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานเพื่อรับพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน ซึ่งการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานเป็นอีกหนึ่งวิธีเพื่อป้องกันความล้มเหลวในระบบไฟฟ้า โดยสามารถเก็บสะสมพลังงานดังกล่าวกลับมาใช้จ่ายให้กับรถไฟฟ้ามหานครได้อีกครั้งเมื่อมีความต้องการกำลังไฟฟ้า รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างวงจรแปลงผันสำหรับระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน

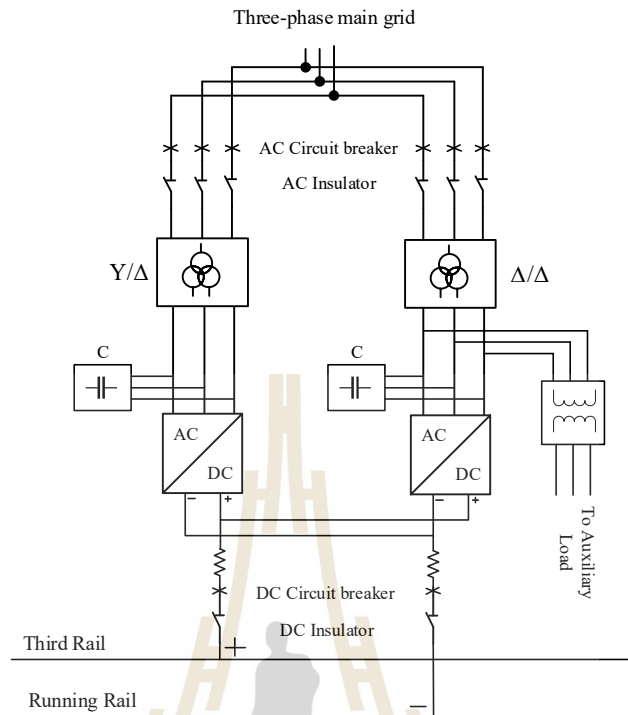
กระแสตรงที่สามารถเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานได้ สวิตช์ T1 และ T2 นำกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบขับเคลื่อน กรณีเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน กระแสไฟฟ้าจ่ายคืนให้กับระบบไฟฟ้าผ่านไดโอด D2



รูปที่ 3.9 วงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้วงจรสับไฟฟ้า 2Q
(กุลวรวานิชพงษ์, 2561)

3.8 ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถไฟฟ้ามีพิคัดแรงดัน 600 V และ 750 V สำหรับรถไฟฟ้าที่ใช้รางที่สาม (third rail) เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น ระบบขนส่งมวลชนในเมืองหรือระบบรถไฟฟ้าใต้ดิน กรณีของระบบแตรมหรือรถไฟฟ้ารางเบาจะใช้ตัวนำแคทีนารีที่พิคัดแรงดัน 750 V เช่นเดียวกัน สำหรับรถไฟฟ้าชานเมืองจะใช้ตัวนำแคทีนารีพิคัดอากาศเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ระดับแรงดันกระแสตรงพิคัด 1500 V การจ่ายไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของรถไฟฟ้าเริ่มต้นจากสถานีไฟฟ้าประธานรับไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับแรงดันสูง แปลงแรงดันผ่านหม้อแปลงให้เป็นระดับแรงดันปานกลางเพื่อจ่ายให้กับสถานีเรียงกระแสไฟฟ้า (rectifier substation) หรือเรียกว่าสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (traction substation) เพื่อแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับรางตัวนำที่สามหรือแคทีนารีพิคัดอากาศ และจากสถานีไฟฟ้าประธานจะทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับสถานีไฟฟ้าบริการ (service substation) ที่สถานีผู้โดยสารเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบสื่อสาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง หรือระบบปรับอากาศของอาคารสถานี เป็นต้น ผลกระทบของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สำคัญ คือ ปัญหากระแสรั่วไหล (stray current) ระหว่างรางวิ่งกับดิน กระแสรั่วไหลดังกล่าวส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะที่ฝังอยู่ในดินใกล้ ๆ รางรถไฟ เช่น เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตของอาคารหรือสะพาน เป็นต้น (กุลวรวานิชพงษ์, 2561) ตัวอย่างแผนผังการจ่ายไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนผังการจ่ายไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของรถไฟฟ้า

ที่มาภาพ: (Khodaparastan et al., 2019)

แรงดันในระบบไฟฟ้ากระแสตรงตามมาตรฐาน EN 50163 หรือ IEC 60850 มีข้อกำหนดดังตารางที่ 3.4 ระดับแรงดันทำงานปกติของระบบจ่ายไฟฟ้าตามมาตรฐานจะมีแรงดันอยู่ในช่วงแรงดัน U_{min1} ถึง U_{max2} โดยการทำงานที่มีระดับแรงดันในช่วง U_{max1} ถึง U_{max2} ต้องมีค่าไม่เกิน 5 นาที และแรงดันทำงานในช่วง U_{min1} ถึง U_{min2} ต้องมีค่าไม่เกิน 2 นาที ที่สถานีจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับระบบรถไฟฟ้าต้องมีกักตุนแรงดันไฟฟ้าไว้ไหลกลับของสถานีเรียงกระแสต้องมีค่าไม่เกิน U_{max2} มีข้อกำหนดสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (regenerative braking) โดยสามารถมีค่าแรงดันได้ถึง 1000 V ในกรณีของระบบจ่ายไฟฟ้า 750 V และ 800 V กรณีของระบบจ่ายไฟฟ้า 600 V ที่ใช้ในระบบรถไฟฟ้าหรือรถโดยสารไฟฟ้าโทรลลี่ (กุลวรรานิชพงษ์, 2561)

ตารางที่ 3.3 แรงดันมาตรฐานการจ่ายไฟตามมาตรฐาน EN 50163 หรือ IEC 60850

Electrification system	Lowest non-permanent voltage	Lowest permanent voltage	Nominal voltage	Highest permanent voltage	Highest non-permanent voltage
	$U_{\min 2}$ (V)	$U_{\min 1}$ (V)	U_n (V)	$U_{\max 1}$ (V)	$U_{\max 2}$ (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	29 000
Special national conditions for France, see Annex B.					
^a Future d.c. traction system for tramways and local railways should conform with system nominal voltage of 750 V, 1 500 V, 3 000 V. ^b Special national conditions for Belgium, see Annex B. ^c Special national conditions for United Kingdom, see Annex B.					

3.9 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีความแตกต่างกันในแต่ละเมือง เช่น กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ภูเก็ตเป็นระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนใต้ดิน รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงปารีสและกรุงโตเกียวให้บริการทั้งระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนใต้ดินและทางยกระดับ เป็นต้น (กุลรวานิชพงษ์, 2561) ในประเทศไทยเริ่มให้บริการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนครั้งแรกในปี พ.ศ. 2542 โดยบริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) รับสัมปทานจากกรุงเทพมหานคร ทั้งหมด 2 เส้นทาง คือ สายสุขุมวิท (สายสีเขียวอ่อน) หรือสายรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ ๖ รอบพระชนมพรรษาสาย ๑ ให้บริการตั้งแต่สถานีอ่อนนุชถึงสถานีแบริ่ง รูปที่ 3.11 แสดงขบวนรถไฟฟ้าส่วนต่อขยายที่ให้บริการช่วงสถานีแบริ่งถึงสมุทรปราการ สายสีลม (สายสีเขียวเข้ม) หรือสายรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ ๖ รอบพระชนมพรรษาสาย ๒ ให้บริการตั้งแต่สถานีสนามกีฬาแห่งชาติถึงสถานีบางหว้า ปัจจุบันบริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ให้บริการระยะทางรวม 50.58 km ทั้งหมด 44 สถานี ผู้ให้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในกรุงเทพฯ-ปริมณฑลมีทั้งหมด 3 ราย ได้แก่ บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ให้บริการรถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้มและสายสีเขียวอ่อน บริษัททางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) รับสัมปทานจากการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) ให้บริการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินหรือสายเฉลิมรัชมงคล

ให้บริการช่วงสถานีหัวลำโพงถึงสถานีบางซื่อ และรถไฟฟ้าสายสีม่วงหรือสายฉลองรัชธรรม ให้บริการระหว่างสถานีเตาปูนถึงสถานีคลองบางไผ่ รถไฟฟ้าเชื่อมต่อสนามบินสุวรรณภูมิเข้าสู่เขตเมืองหรือรถไฟฟ้าแอร์พอร์ทลิงก์ (Airport Rail Link) ให้บริการโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ระหว่างสถานีพญาไทถึงสนามบินสุวรรณภูมิ



รูปที่ 3.11 รถไฟฟ้าสายสีเขียวส่วนต่อขยาย แบริ่ง-สมุทรปราการ

ที่มาภาพ: <https://www.bltbangkok.com/public/core/uploaded/article/d21c53d62e154788b95b4718dd4189b0.jpg>

[เข้าถึงเมื่อ 22 กันยายน 2562]

3.10 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับเทคโนโลยีสะสมพลังงานที่กล่าวถึงการสะสมพลังงานในรูปแบบพลังงานใด ๆ และเปลี่ยนพลังงานดังกล่าวกลับมาอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าอีกครั้ง การประยุกต์ใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบต่าง ๆ และเทคโนโลยีสะสมพลังงานที่ใช้งานในระบบรถไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเป็นรายละเอียดที่สำคัญสำหรับทำความเข้าใจ และเป็นความรู้พื้นฐานสำหรับรายละเอียดในบทถัดไป โดยในบทถัดไปเป็นรายละเอียดเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า และการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลองของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 4

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสดรงหนึ่งขบวน

4.1 บทนำ

การศึกษาเกี่ยวกับระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้าต่อการทดลองจริง ปัจจุบันนิยมใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในปัจจุบันเข้ามาเป็นเครื่องมือการคำนวณผ่านการสร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้า การสร้างแบบจำลองสามารถจำลองการทำงานของรถไฟฟ้าในสถานการณ์ต่าง ๆ ช่วยให้ทราบถึงพฤติกรรมของระบบไฟฟ้า และคาดการณ์สิ่งที่จะเกิดขึ้นได้ โดยที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการทดลอง ความถูกต้องของผลการจำลองขึ้นกับการสร้างแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงในทางปฏิบัติ ในบทนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสดรงหนึ่งขบวน โดยแบ่งเป็นการคำนวณสมรรถนะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า และการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าภายใต้การวิเคราะห์แบบโหนด นำเสนอผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่ใช้ข้อมูลของรถไฟฟ้าสายสีลมเป็นกรณีศึกษา

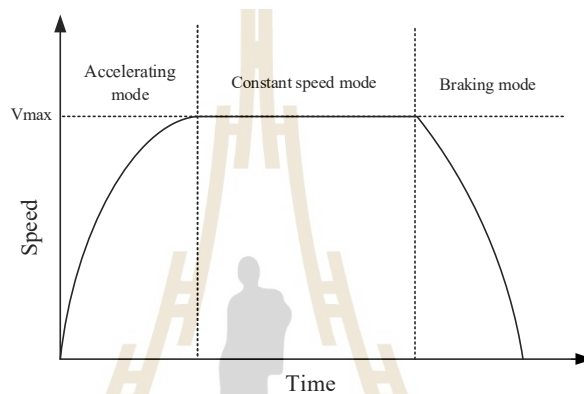
4.2 การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

รูปแบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าถูกกำหนดด้วยลักษณะเส้นโค้งความเร็ว-เวลา (train's speed-time curve) แบ่งโหมดการเคลื่อนที่ออกเป็นทั้งหมด 3 โหมด คือ เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง (accelerating mode) เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (constant speed mode) และการเบรก (braking mode) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเริ่มจากการจำลองให้รถไฟฟ้าหยุดนิ่งที่สถานีต้นทาง รถไฟฟ้าเริ่มเคลื่อนที่โดยการทำงานเข้าสู่โหมดเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ความเร่งที่ใช้ต้องไม่เกินความเร่งสูงสุดของรถไฟฟ้า และแรงจุดที่ใช้ตลอดการเคลื่อนที่ ต้องไม่เกินแรงยึดเกาะที่ไม่ทำให้เกิดการลื่นไถลไปตามราง (กุลวรวานิชพงษ์, 2561)

- โหมดเร่ง (accelerating mode) คือ การที่รถไฟฟ้าเพิ่มความเร่งจากภาวะหยุดนิ่งด้วยความเร่งเพื่อเพิ่มความเร่งของรถไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ตามลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า โดยความเร่งจะมีค่ามากกว่าศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากับความเร่งสูงสุดของรถไฟฟ้า

$$(0 < a \leq a_{acc,max})$$

- โหมดความเร็วคงที่ (constant speed mode) คือ รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่โดยที่ความเร่งเป็นศูนย์ ($a = 0$) ดังนั้นแรงฉุดของรถไฟฟ้าจะเท่ากับแรงต้านการเคลื่อนที่
- โหมดเบรก (braking mode) รถไฟฟ้าจะลดความเร็วของรถไฟฟ้าด้วยความหน่วงหรือความเร่งที่มีค่าเป็นลบเพื่อเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารหรือการลดความเร็วเพื่อไม่ให้รถไฟฟ้ามีความเร็วเกิดความเร็วที่กำหนดตามลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าและความเร่งมีค่าไม่เกินความหน่วงสูงสุด ($a_{dec,max} < a < 0$)



รูปที่ 4.1 โหมดการทำงานของรถไฟฟ้า

โดยแรงฉุดของรถไฟฟ้าและแรงยึดเกาะสูงสุดของรถไฟฟ้าคำนวณได้จากกร (4.1) - (4.3) ตามลำดับ (กุลวรวานิชพงษ์, 2561)

$$F_T = M_{eff} a + F_R \quad (4.1)$$

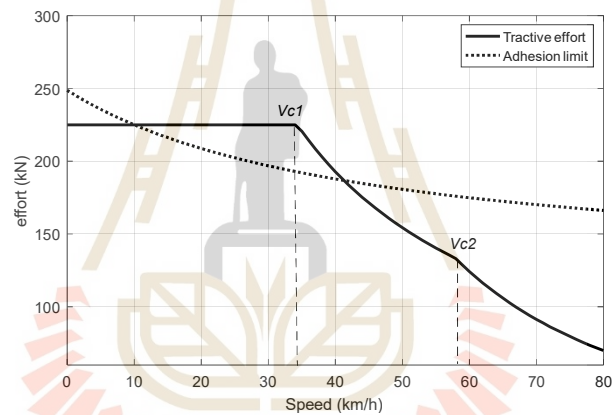
$$\mu_s = \frac{7.5}{v_i(t) + 44} + 0.161 \quad (4.2)$$

$$F_{adh} = 9810 \mu_s M_d \quad (4.3)$$

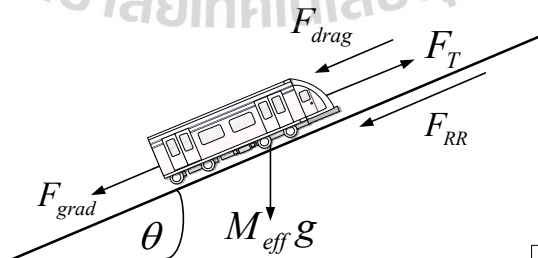
โดยที่ F_T คือ แรงฉุดของรถไฟฟ้า (N)
 M_{eff} คือ มวลประสิทธิผล (kg)
 a คือ ความเร่ง (m/s^2)
 μ_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยึดเกาะ (N/kg)

- v_t คือ ความเร็วในหน่วย (km/h)
 M_d คือ มวลของขบวนขับเคลื่อน (ขบวนที่มีมอเตอร์ขับเคลื่อน) (kg)
 F_{adh} คือ แรงยึดเกาะ (N)
 F_R คือ แรงต้านทานการเคลื่อนที่ (N)

การเคลื่อนที่ของรถไฟควรมีแรงจุดไม่เกินแรงยึดเกาะของรถไฟกับรางวิ่งเพื่อไม่ให้เกิดการลื่นไถลไปตามราง ดังนั้นแรงจุดของรถไฟต้องอยู่ภายใต้เส้นกราฟแรงยึดเกาะสูงสุด โดยแรงยึดเกาะเป็นคุณลักษณะของหัวรถจักร ซึ่งอาจได้ข้อมูลดังกล่าวจากผู้ผลิตหรือสามารถประเมินแรงยึดเกาะสูงสุดได้ดังสมการ (4.3) รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างลักษณะแรงจุดของหัวรถจักรและแรงยึดเกาะสูงสุด



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างลักษณะแรงจุดของหัวรถจักรและแรงยึดเกาะสูงสุด



รูปที่ 4.3 แผนภาพการเคลื่อนที่ของรถไฟ
ที่มาภาพ: (สัมภาระคุปต์, 2560)

แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ แรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเสียดทาน (Frictional force: F_{RR}) แรงต้านเนื่องจากความชัน (Gradient force: F_{grad}) และแรงต้านอากาศ (Aerodynamic drag force: F_{drag}) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สามารถคำนวณแรงต้านการเคลื่อนที่ได้จากสมการที่ (4.4) – (4.7) (กุลวรวานิชพงษ์, 2561)

$$F_R = F_{RR} + F_{grad} + F_{drag} \quad (4.4)$$

$$F_{RR} = f_{RR} M_{eff} g \cos(\theta) \quad (4.5)$$

$$F_{grad} = \pm M_{eff} g \sin(\theta) \quad (4.6)$$

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho_{air} c_d A_F v_{veh}^2 \quad (4.7)$$

โดยที่	f_{RR}	คือ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน เท่ากับ 0.001 สำหรับล้อเหล็กของรถไฟกับราง
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
	θ	คือ มุมที่กระทำกับแนวระดับ ($degree$)
	ρ_{air}	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
	c_d	คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (N/m^2)
	A_F	คือ พื้นที่ด้านหน้าตัดของรถไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ (m^2)
	v_{veh}	คือ ความเร็วสัมพัทธ์การไหลของอากาศเทียบกับความเร็วของรถไฟฟ้า (m/s)

แรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ เป็นลักษณะเฉพาะของขบวนรถที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางเดินรถ ผู้ผลิตหัวรถจักรจึงนิยมระบุค่าแรงเสียดทาน 2 อย่างนี้ในรูปของสมการเดวิส (Davis equation) ดังสมการที่ (4.8) (กุลวรวานิชพงษ์, 2561) โดยกำหนดให้ A (kN), B (kNh/km), C (kNt^2/km^2) คือ สัมประสิทธิ์ของสมการเดวิส และ v คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (km/h)

$$F_{RR} + F_{drag} = A + Bv + Cv^2 \quad (4.8)$$

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า กรณีแรงฉุดของรถไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงยึดเกาะที่ไม่ทำให้เกิดการลื่นไถล กำหนดให้แรงฉุดมีค่าเท่ากับแรงยึดเกาะที่สามารถรับได้ และคำนวณหาความเร่งของรถไฟฟ้าจากแรงฉุดนี้ หลังจากคำนวณแรงฉุดของรถไฟฟ้า อัปเดตความเร็วของรถไฟฟ้า และระยะทางที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ในช่วงเวลา Δt คำนวณกำลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า ดังสมการที่ (4.9) – (4.11) (สัมภาษณ์, 2560)

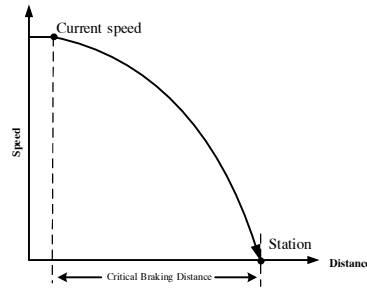
$$v(t + \Delta t) = v(t) + a\Delta t \quad (4.9)$$

$$s(t + \Delta t) = s(t) + v(t)\Delta t + \frac{1}{2} a(\Delta t)^2 \quad (4.10)$$

$$P_T(t + \Delta t) = \begin{cases} \frac{F_T \times v(t + \Delta t)}{\eta_T} + P_{aux} & \text{if } F_T \geq 0 \\ \eta_T (F_T \times v(t + \Delta t)) + P_{aux} & \text{if } F_T < 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

- โดยที่ P_T คือ กำลังงานรถไฟฟ้า
 η_T คือ ประสิทธิภาพรวมของรถไฟฟ้า
 P_{aux} คือ กำลังงานไฟฟ้าเสริม เช่น กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในรถไฟฟ้าสำหรับแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น (W)
 $v(t + \Delta t)$ คือ ความเร็วรถไฟฟ้าที่เวลา $t + \Delta t$ (m/s)
 $s(t + \Delta t)$ คือ ตำแหน่งรถไฟฟ้าที่เวลา $t + \Delta t$ (m)

เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้าใกล้สถานีผู้โดยสารถัดไป ก่อนที่รถไฟฟ้าจะทำงานในโหมดเบรก รถไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย โหมดนี้รถไฟฟ้าจะมีแรงฉุดเท่ากับศูนย์ ($F_T = 0$) ส่งผลให้ความเร่งมีค่าเป็นลบ หรือรถไฟฟ้ามีความเร็วลดลงเนื่องจากแรงต้านทานการเคลื่อนที่ กำลังงานรถไฟฟ้าเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าเสริม

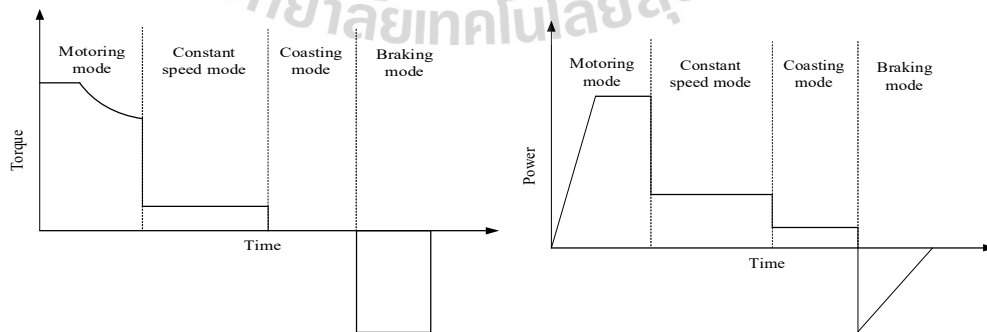


รูปที่ 4.4 แผนภาพระยะวิกฤติการเบรก
ที่มาภาพ: (สัมภาะคุปต์, 2560)

การทำงานในโหมดเบรกของรถไฟฟ้าจะเริ่มทำงานเมื่อระยะห่างจากตำแหน่งของรถไฟฟ้าล่าสุดน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะวิกฤติการเบรก (Critical Braking Distance: CBD) เพื่อการจอดรถไฟฟ้าที่สถานีผู้โดยสารอย่างแม่นยำ (สัมภาะคุปต์, 2560) แผนภาพระยะวิกฤติการเบรกแสดงดังรูปที่ 4.4 และสามารถคำนวณระยะเริ่มเบรกได้จากสมการที่ (4.12) รูปที่ 4.5 แสดงแรงบิด (torque) และกำลังไฟฟ้า (power) เทียบกับเวลาเมื่อรถไฟฟ้าทำงานใน โหมดต่าง ๆ

$$CBD = -0.5 \times \frac{v^2}{a_{dec}} \tag{4.12}$$

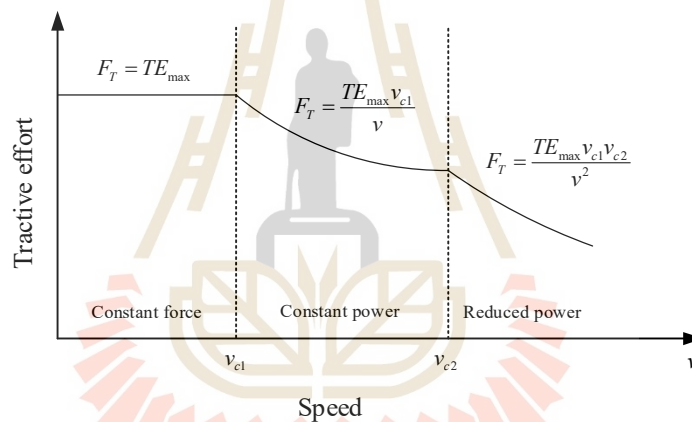
โดยที่ v คือ ความเร็วของรถไฟฟ้าขณะนั้น (m/s)
 a_{dec} คือ ความเร่งเป็นลบ (m/s^2)



รูปที่ 4.5 กราฟแรงบิด (Torque) และกำลังไฟฟ้า (Power) เทียบกับเวลา สำหรับรถไฟฟ้า
ที่มาภาพ: (Dubey, 2005)

ลักษณะแรงฉุดของหัวรถจักรไฟฟ้า

ลักษณะสมบัติของหัวรถจักรไฟฟ้า นิยมนำเสนอในรูปของแรงฉุด (Tractive force: F_T) แรงฉุดของรถไฟฟ้าเกิดจากแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ส่งผ่านเฟืองทดและแปรงฟันตามความเร็วการเคลื่อนที่เชิงเส้น แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรงฉุดคงที่ (Constant force) ช่วงกำลังงานคงที่ (Constant power) และช่วงกำลังงานลดทอน (Reduced power) ซึ่งช่วงกำลังงานคงที่เป็นช่วงที่แรงบิดของมอเตอร์ลดลงแต่ยังสามารถจ่ายโหลดด้วยกำลังคงที่ได้ และช่วงกำลังงานลดทอนเป็นช่วงการทำงานที่แรงบิดจะลดลงในอัตราที่ผกผันกับความเร็วกำลังสอง การเปลี่ยนโหมดการทำงานจะขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่ หรือเมื่อรถไฟฟ้ามีความเร็วมากกว่าความเร็วฐาน (v_{c1} หรือ v_{c2}) รูปที่ 4.6 แสดงสมบัติของแรงฉุดของหัวรถจักรไฟฟ้ากับความเร็วเชิงเส้น (กุลวรวานิชพงษ์, 2561)



รูปที่ 4.6 สมบัติของแรงฉุดของหัวรถจักรไฟฟ้ากับความเร็วเชิงเส้น

ขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.7 สรุปขั้นตอนการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

(1) กำหนดพารามิเตอร์สำหรับระบบทดสอบ เช่น พารามิเตอร์ขบวนรถไฟฟ้า น้ำหนักขบวนรถ ความเร่งสูงสุด ข้อมูลสถานีผู้โดยสาร ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า และข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลอง

(2) ตรวจสอบเวลาในการจำลองการเคลื่อนที่ (t) กรณีเวลาในการจำลองการเคลื่อนที่มากกว่าเวลาสุดท้ายของการจำลองผล (t_{stop}) ให้จบการคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

(3) ตรวจสอบรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรกหรือไม่ กรณีรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก ความเร่งของรถไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบ และข้ามไปยังขั้นตอนที่ (7)

(4) คำนวณแรงจุดของรถไฟฟ้าจากสมการที่ (4.1) และแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าดังสมการที่ (4.4) – (4.8)

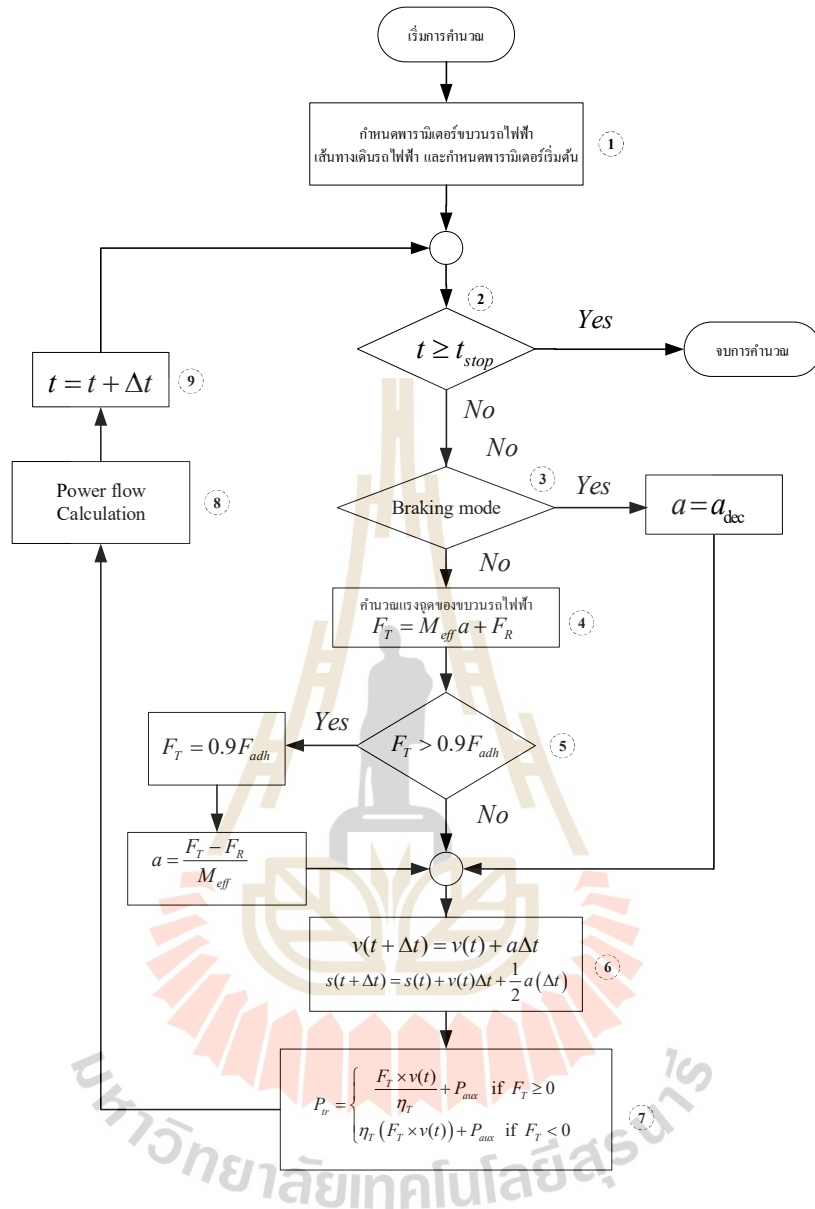
(5) ตรวจสอบแรงจุดของรถไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงยึดเกาะสูงสุดที่ยอมรับได้หรือไม่ ในการจำลองนี้กำหนดให้แรงจุดต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 90% ของแรงยึดเกาะสูงสุด ($F_T \leq 0.9F_{adh}$) กรณีรถไฟฟ้ามีค่าแรงจุดของรถไฟฟ้าน้อยกว่าแรงยึดเกาะสูงสุดที่ยอมรับได้ให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ (7) กรณีแรงจุดของรถไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงยึดเกาะสูงสุดที่กำหนด ให้แรงจุดของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนเท่ากับแรงยึดเกาะสูงสุดที่ยอมรับได้ และคำนวณหาความเร่งจาก $a = (F_T - F_R) / M_{eff}$ คำนวณแรงยึดเกาะสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดการไถลได้ดังสมการที่ (4.2) – (4.3)

(6) อัปเดตค่าความเร็ว (v) และตำแหน่งปัจจุบันของรถไฟฟ้า (s) ดังสมการที่ (4.9) – (4.10)

(7) คำนวณกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนกรณีรถไฟฟ้าทำงานในโหมดต่าง ๆ ดังสมการที่ (4.11)

(8) คำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนเพื่อหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่บัสใด ๆ รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

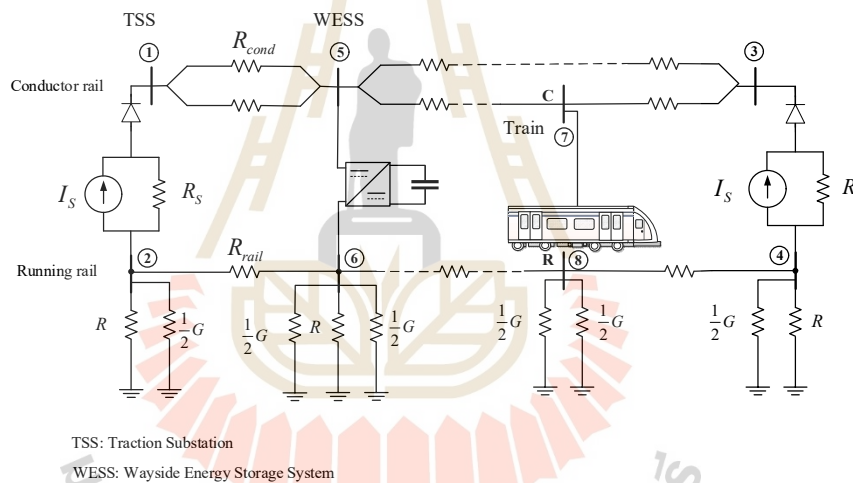
(9) เพิ่มเวลาในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ($t = t + \Delta t$) และกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ (2)



รูปที่ 4.7 ขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟ

4.3 การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน

การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนใช้แบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบ Multi-conductor system ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ประกอบไปด้วยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction Substation: TSS) ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง (Wayside Energy Storage System: WESS) และรถไฟฟ้า (Train) การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้า วิเคราะห์ภายใต้การวิเคราะห์แบบโนด (Node analysis) เพื่อง่ายต่อการสร้างแบบจำลอง และใช้วิธีการวนรอบซ้ำจนกว่าความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เพื่อหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่บัสใด ๆ งานวิจัยนี้ใช้วิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า (Current injection method) เป็นวิธีการเพื่อหาผลเฉลยของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (กุลวรวานิซพงษ์, 2561) รายละเอียดวิธีการคำนวณ และรายละเอียดแบบจำลองอธิบายในหัวข้อที่ 4.3.1 – 4.3.4



รูปที่ 4.8 ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบ Multi-conductor system

ที่มาภาพ: (สัมภาวะคุปต์, 2560)

- โดยที่ R_{cond} คือ ความต้านทานรางตัวนำไฟฟ้า (Ω/km)
 R_{rail} คือ ความต้านทานรางวิ่ง (Ω/km)
 R_S คือ ความต้านทานลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Ω)
 R_{SE} คือ ความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Ω)
 G_{RE} คือ ค่าความนำไฟฟ้าของรางเทียบกับดิน (s/km)
 I_S คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่สถานีขับเคลื่อน (A)

แบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนดังแสดงในรูปที่ 4.8 เป็นแบบจำลองรถไฟฟ้ามอเตอร์ที่มีรางตัวนำและรางวิ่ง 2 ราง คือ รางขาไป (up-track) และรางขากลับ (down-track) การคำนวณความต้านทานรางตัวนำไฟฟ้า ($R_{cond,p-q}$) และความต้านทานรางวิ่ง ($R_{rail,p-q}$) ระหว่างโนด p และ q สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.13) – (4.15) จากรูปที่ 4.8 ตัวต้านทานรางตัวนำไฟฟ้าจากโนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 1 (โนด 1) ถึงโนดระบบเก็บสะสมพลังงาน (โนด 5) ตำแหน่งที่พิจารณาดังกล่าวไม่มีโนดรถไฟฟ้ามอเตอร์ สามารถคำนวณความต้านทานรางตัวนำไฟฟ้ารวมได้โดยการขนานความต้านทานดังสมการที่ (4.13) กรณีที่ตำแหน่งระหว่างโนดใด ๆ ที่พิจารณา มีโนดรถไฟฟ้ามอเตอร์อยู่ระหว่างกลาง สามารถคำนวณค่าความต้านทานระหว่างโนดได้ดังสมการที่ (4.14) โดยที่ $R_{line,p-q}$ และ R_{cond} คือ ค่าความต้านทานตัวนำไฟฟ้าระหว่างโนด p ถึงโนด q (Ω) และความต้านทานตัวนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวในหน่วย (Ω / km) และ d_{p-q} คือ ระยะห่างระหว่างโนด p ถึงโนด q ในหน่วย (km)

$$R_{line,p-q} = \frac{1}{2} (d_{p-q} \times R_{cond}) \quad (4.13)$$

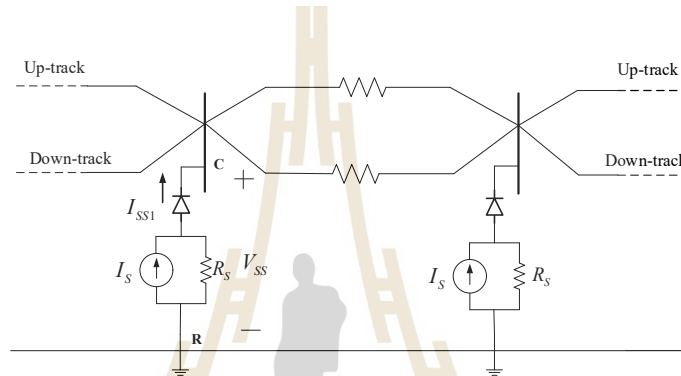
$$R_{line,p-q} = d_{p-q} \times R_{cond} \quad (4.14)$$

รางวิ่งในแบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนที่พิจารณา นอกจากรางวิ่งจะมีหน้าที่รับน้ำหนักและเป็นทางวิ่งของรถไฟฟ้ามอเตอร์แล้วนั้น รางวิ่งมีทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสย้อนกลับไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย แบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนในงานวิจัยนี้พิจารณาให้รางวิ่งมีการเชื่อมต่อของรางวิ่งทางคู่ถึงกัน รางวิ่งรถไฟฟ้ามอเตอร์ 1 รางจะมีส่วนนำกระแสย้อนกลับ 2 ส่วน (traction return conductor) และกรณีพิจารณารถไฟฟ้าเพียง 1 ขบวนสามารถคำนวณค่าความต้านทานรางวิ่ง $R_{rail,p-q}$ ระหว่างโนด p และ q (Ω) ได้ดังสมการที่ (4.15) (Finlayson et al., 2006) โดยที่ R_{rail} คือ ค่าความต้านทานรางวิ่งต่อหน่วยความยาวในหน่วย (Ω / km)

$$R_{rail,p-q} = \frac{d_{p-q} \times R_{rail}}{2} \quad (4.15)$$

4.3.1 แบบจำลองสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในแบบจำลองเป็นสถานีไฟฟ้ากระแสตรงแทนด้วยวงจรสมมูลนอร์ตัน (Norton's equivalent circuit) และมีไดโอดเพื่อบ่งบอกว่าสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีกระแสไหลได้ทางเดียวดังแสดงในรูปที่ 4.9 ค่ากระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (I_S) และความต้านทานลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (R_S) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.16) – (4.17) (สัมภาวะคู่, 2560) โดยที่ P_{SS} คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าจริงลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และ V_{noload} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าไร้โหลดของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน



รูปที่ 4.9 แบบจำลองของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน
ที่มาภาพ: (กุลวราวิชพงษ์, 2561)

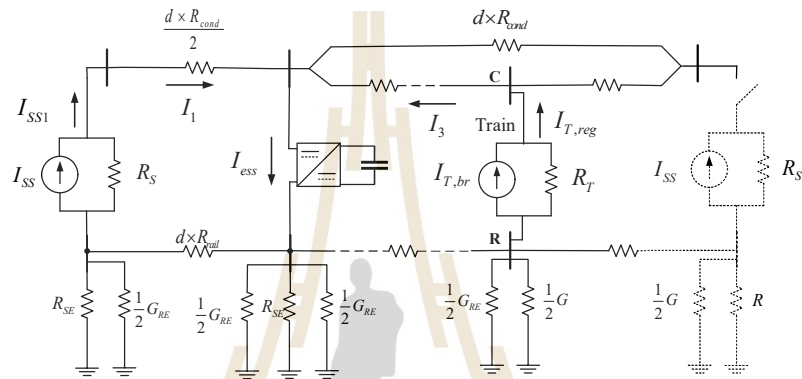
$$I_S = \frac{P_{SS}}{V_{noload}} \quad (4.16)$$

$$R_S = \frac{(V_{noload})^2}{P_{SS}} \quad (4.17)$$

การจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจ่ายโหลดขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน หรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างโนดตัวนำไฟฟ้าหรือรางที่สาม และ โนดรางวิ่งที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ดังสมการที่ (4.18) (สัมภาวะคู่, 2560)

$$I_{SS1} = I_S - \frac{V_{SS}}{R_S} \quad (4.18)$$

สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่กระแสไหลได้ทิศทางเดียว ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรกจ่ายคืนพลังงานที่มีกระแสไหลย้อนกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ามาที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนใด ๆ สถานีนั้นจะถูกตัดออกจากแบบจำลอง รูปที่ 4.10 แสดงแบบจำลองกรณีที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 2 เกิดกระแสไหลย้อนกลับ ทำให้แบบจำลองสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 2 ถูกตัดออกจากแบบจำลอง กรณีที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 1 ไม่เกิดกระแสไหลย้อนกลับยังสามารถช่วยจ่ายกระแสให้กลับโพลได้เช่นเดิม

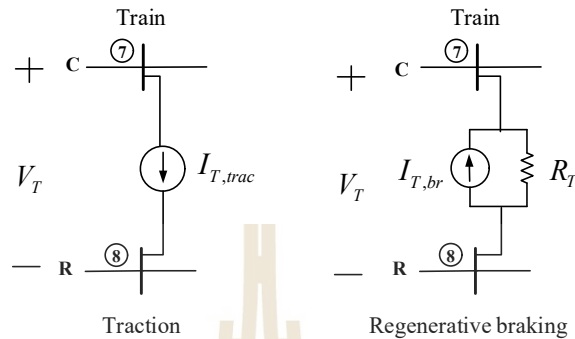


รูปที่ 4.10 แบบจำลองกรณีสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 2 เกิดกระแสไหลย้อนกลับ

4.3.2 แบบจำลองรถไฟฟ้า

โหมดการทำงานของรถไฟฟ้างานดังกล่าวมาแล้วในการคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า แบบจำลองของรถไฟฟ้าเปลี่ยนไปตามโหมดการทำงาน แบ่งการทำงานออกเป็น 2 โหมดหลัก ๆ ได้แก่ โหมดขับเคลื่อน (traction train) คือ โหมดที่รถไฟฟ้ารับกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เช่น เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่ง โหมดความเร็วคงที่ และ โหมดวิ่งด้วยความเฉื่อย และ โหมดการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (regenerative braking) คือ เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรกและจ่ายกำลังไฟฟ้าจากการเบรกเข้าสู่ตัวนำไฟฟ้า ซึ่งอาจจะเป็นสายส่งเหนือศีรษะ (overhead wire) หรือรางที่สาม (third rail) ขึ้นกับระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้านั้น ๆ รูปที่ 4.11 แสดงแบบจำลองของรถไฟฟ้าเมื่อทำงานในโหมดขับเคลื่อนและโหมดการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน โดยโหมดขับเคลื่อนจำลองรถไฟฟ้าเป็นแบบจำลองกระแสไฟฟ้า (current model) สามารถคำนวณกระแสรถไฟฟ้า ($I_{T, trac}$) ได้จากสมการที่ (4.21) โดยที่ P_T คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า จำลองรถไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อขนานกับความต้านทานรถไฟฟ้า เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน กระแสไฟฟ้าที่จ่ายโดยรถไฟฟ้า ($I_{T, br}$)

และความต้านทานรถไฟฟ้า (R_T) ขณะทำงานใน โหมดการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.23) – (4.24)



รูปที่ 4.11 แบบจำลองของรถไฟฟ้าเมื่อทำงานใน โหมดขับเคลื่อน และ โหมดการเบรกแบบจ่ายพลังงานย้อนกลับ

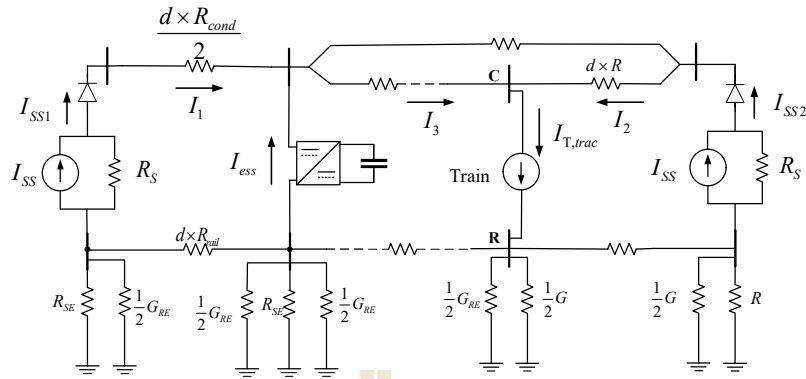
4.3.2.1 รถไฟฟ้าในโหมดขับเคลื่อน

รถไฟฟ้าในโหมดขับเคลื่อน คือ การที่รถไฟฟ้าต้องการกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อน การจำลองรถไฟฟ้าเป็นโหนดทางไฟฟ้าด้วยแหล่งรับกระแสไฟฟ้า โดยกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าได้จากการคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า คือ กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ไฟฟ้าใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าตามแรงจลน์รถไฟฟ้า (P_{trac}) รวมกับกำลังไฟฟ้าเสริมที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ในรถไฟฟ้า (P_{aux}) เช่น แสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.19) และ (4.20) ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในโหมดขับเคลื่อนสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (4.21) V_T คือ แรงดันไฟฟ้าที่โนครถไฟฟ้า หรือแรงดันไฟฟ้าที่รางตัวนำไฟฟ้าเทียบกับแรงดันรางวิ่งที่ตำแหน่งรถไฟฟ้า ($V_{T,C}$ และ $V_{T,R}$) รูปที่ 4.12 แสดงแบบจำลองกรณีรถไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อน

$$P_T = P_{trac} + P_{aux} \quad (4.19)$$

$$P_T = V_T I_{T,trac} \quad (4.20)$$

$$I_{T,trac} = \frac{P_T}{V_T} = \frac{P_T}{V_{T,C} - V_{T,R}} \quad (4.21)$$



รูปที่ 4.1 แบบจำลองกรณีรถไฟไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อน

4.3.2.2 รถไฟฟ้าในโหมดการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน

การเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน คือ การเบรกรถไฟฟ้าด้วยวิธีการเบรกทางไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การเบรกแบบพลวัต (dynamic braking) คือ การตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าออก และนำตัวต้านทานการเบรกต่อขนานเพื่อทำให้พลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกหายไปในรูปแบบของความร้อนผ่านตัวต้านทานการเบรก (braking resistor) และการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (regenerative braking) เป็นการเปลี่ยนการทำงานของมอเตอร์ให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายคืนสู่ระบบไฟฟ้า โดยได้พลังงานทางกลจากการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าก่อนเกิดการเบรกของรถไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นถูกจ่ายเข้าสู่ตัวนำไฟฟ้ารางที่สาม ดังนั้นการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานต้องมีโหลดสำหรับรับพลังงานที่จ่ายมาจากรถไฟฟ้าเพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้าในระบบมีค่าสูงซึ่งอาจส่งผลให้เกิดอันตรายได้ การเบรกทางไฟฟ้ามักจะใช้ทั้ง 2 วิธีการที่กล่าวมาแล้วร่วมกัน โดยสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานบางส่วน และการจ่ายพลังงานส่วนเกินให้กับตัวต้านทานการเบรก ในงานวิจัยนี้การเบรกเกิดจากการให้ความเร่งเป็นค่าลบเพื่อหยุดรถไฟฟ้า ดังนั้นกำลังงานที่ได้จากการเบรกจึงเป็นค่าลบ และส่งผลให้กระแสไฟฟ้าจากพลังงานเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานเป็นค่าลบเช่นเดียวกัน พลังงานจากการเบรกสุทธิ (P_{reg}) ได้จากการนำพลังงานที่ได้จากการเบรก (P_{br}) หลังจากจ่ายพลังงานเสริมให้กับรถไฟฟ้าแล้วดังสมการที่ (4.22)

$$P_{reg} = P_{br} + P_{aux} \quad ; P_{br} < 0 \quad (4.22)$$

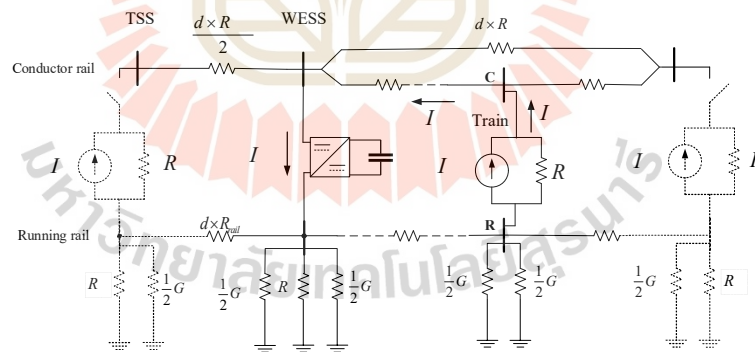
การเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์มีค่าเท่ากับแรงดันไ่ว์โหลดเมื่อรถไฟฟ้าจ่ายพลังงานย้อนกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ดังนั้นความต้านทานรถไฟฟ้าจะ

เปลี่ยนเมื่อกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเปลี่ยนไป ความต้านทานรถไฟฟ้า (R_T) คำนวณได้ดังสมการที่ (4.23) กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากกำลังงานเบรกย้อนกลับ ($I_{T,br}$) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.24) โดยที่ V_{noload} คือ แรงดันไร้โหลดของระบบ

$$R_T = \frac{V_{noload}}{I_{T,br}} = \frac{(V_{noload})^2}{P_{reg}} \quad (4.23)$$

$$I_{T,br} = \frac{V_{noload}}{R_T} = \frac{P_{reg}}{V_{noload}} \quad (4.24)$$

กรณีเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานทำให้แรงดันที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าสูงกว่าแรงดันไร้โหลดเมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน แบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ใช้เป็นสถานีไฟฟ้ากระแสตรงที่มีไดโอด ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลย้อนกลับได้ ดังนั้นกรณีนี้จะเสมือนตัดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนออกจากระบบไฟฟ้าดังที่กล่าวมาแล้วนั้น รูปที่ 4.13 แสดงแบบจำลองเมื่อรถไฟฟ้าทำงานใน โหมดเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน และสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนทุกสถานีถูกตัดออกจากระบบเนื่องจากเกิดกระแสไหลย้อนกลับ

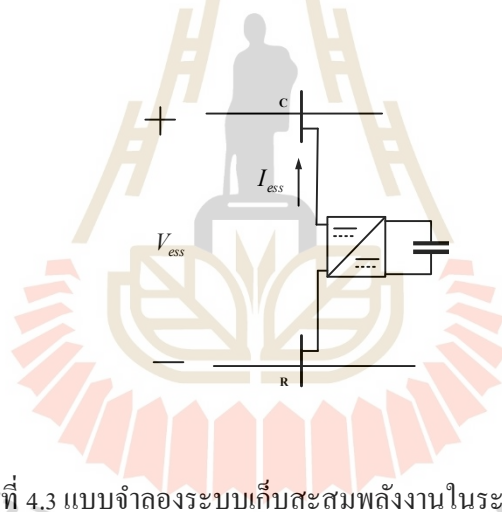


รูปที่ 4.2 แบบจำลองเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรกจ่ายพลังงานย้อนกลับ

4.3.3 แบบจำลองระบบเก็บสะสมพลังงาน

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ พิจารณาการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบริมทาง โดยระบบเก็บสะสมพลังงานนี้จะติดตั้งที่ตำแหน่งใด ๆ ระหว่างเส้นทางเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเส้นทางนั้น ๆ ที่ไม่ใช่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้า

ขับเคลื่อน การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานเป็นการติดตั้งเพื่อเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกของรถไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และนำพลังงานที่เก็บสะสมไว้กลับมาจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อระดับแรงดันที่บัสมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด ตำแหน่งการติดตั้งและขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานที่เหมาะสมไม่มีรูปแบบที่ตายตัวขึ้นกับการควบคุมการทำงาน หรือลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานสำหรับติดตั้งริมทางของรถไฟฟ้ามีทั้งแบตเตอรี่ ล้อตุ่นกำลัง หรือตัวเก็บประจุยิ่งยวด ในงานวิจัยนี้พิจารณาตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีคุณสมบัติที่สามารถประจุและคายประจุได้เร็วเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ ตอบสนองในช่วง 10 วินาที ถึง 1 นาที (Okui et al., 2010) มีความหนาแน่นกำลังงานสูง มีอายุการใช้งานสูงถึง 100000 รอบ และมีประสิทธิภาพสูงถึง 84-97% (Luo et al., 2015) และจากคุณสมบัติที่สามารถประจุและคายประจุได้อย่างรวดเร็วและความหนาแน่นกำลังงานสูงทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้รับความนิยมนำมาใช้สำหรับเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกในระบบขนส่ง (Ratniyomchai et al., 2013)



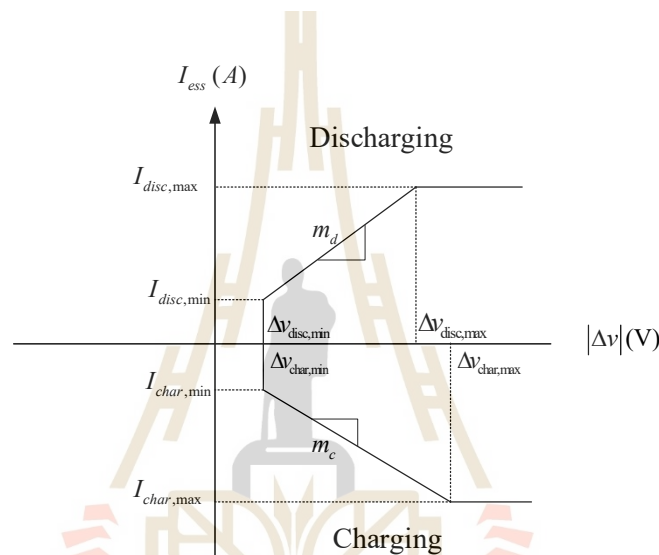
รูปที่ 4.3 แบบจำลองระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบรถไฟฟ้า

ที่มาภาพ: (Ratniyomchai, 2016)

การจ่ายหรือการสะสมพลังงานของระบบเก็บสะสมพลังงานขึ้นกับการควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน แบบจำลองของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดในระบบไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.14 แบบจำลองดังกล่าวเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายกระแสหรือรับกระแสตามการควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน โดยที่ I_{ess} คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกหรือรับเข้าระบบเก็บสะสมพลังงาน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าจะเกิดการสะสมพลังงานภายในระบบเก็บสะสมพลังงาน จะมีทิศกระแสไฟฟ้าตรงข้ามในรูปที่ 4.14 และ V_{ess} คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางเทียบกับรางวิ่ง

4.3.4 การควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบ Piece-wise Linear SOC

แบบจำลองระบบเก็บสะสมพลังงานจำลองเปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าหรือโหลดที่รับกระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดการเบรกของรถไฟฟ้า การทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าหรือรับกระแสไฟฟ้าจะขึ้นกับรูปแบบการควบคุมการทำงาน งานวิจัยนี้ใช้การควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC เป็นการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกและรับเข้าด้วยระดับความต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าของบัสระบบเก็บสะสมพลังงาน และค่าแรงดันไฟฟ้าไว้โหลดระบบไฟฟ้า (Δv) (Ratniyomchai, 2016)



รูปที่ 4.4 การควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC

ดัดแปลงจาก: (Ratniyomchai, 2016)

ระบบเก็บสะสมพลังงานจะเริ่มจ่ายกระแสและรับกระแสเมื่อ Δv มากกว่า Δv_{\min} ของการเริ่มทำงาน และระบบเก็บสะสมพลังงานจะจ่ายกระแสมากที่สุดคงที่เมื่อ Δv มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ Δv_{\max} ดังแสดงในรูปที่ 4.15 การทำงานแบ่งออกเป็น 2 โหมดการทำงานแยกกัน คือ การทำงานในโหมดสะสมพลังงานเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก (Charging mode) และโหมดการจ่ายพลังงาน (Discharging) เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อน ผลต่างแรงดันไฟฟ้า Δv สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.25) รายละเอียดการควบคุมการทำงานของทั้ง 2 โหมดเป็นดังนี้ (Ratniyomchai, 2016)

(1) ระบบเก็บสะสมพลังงานจะจ่ายกระแสไฟฟ้าเมื่อผลต่างแรงดันไฟฟ้า Δv มากกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าจ่ายกระแสต่ำสุด ($\Delta v_{disc,min}$) เมื่อ m_d คือ คุณลักษณะความชันของการจ่าย

กระแสไฟฟ้า และระบบเก็บสะสมพลังงานจะจ่ายกระแสไฟฟ้ามากที่สุด ($I_{disc,max}$) และมีค่าคงที่เมื่อ Δv มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันจ่ายกระแสสูงสุด ($\Delta v_{disc,max}$) โดยที่ $I_{disc,min}$ คือ พิกัดจ่ายกระแสไฟฟ้าต่ำสุดของระบบเก็บสะสมพลังงานในโหมดการจ่ายพลังงาน คุณลักษณะความชันของการจ่ายกระแสไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจ่ายออกของระบบเก็บสะสมพลังงานดังสมการที่ (4.26) – (4.27)

(2) ระบบเก็บสะสมพลังงานจะเริ่มสะสมพลังงานเมื่อผลต่างแรงดันไฟฟ้า Δv มากกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้ารับกระแสไฟฟ้าต่ำสุด ($\Delta v_{char,min}$) และจะรับกระแสไฟฟ้ามากที่สุดและมีค่าคงที่ เมื่อ Δv มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันรับกระแสสูงสุด ($\Delta v_{char,max}$) เมื่อ m_c คือคุณลักษณะความชันของการรับกระแสไฟฟ้า โดยที่ $I_{char,max}$ และ $I_{char,min}$ คือ พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของระบบเก็บสะสมพลังงานในโหมดการสะสมพลังงาน ตามลำดับ คุณลักษณะความชันของการรับกระแสไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ารับเข้าของระบบเก็บสะสมพลังงานดังสมการที่ (4.28) – (4.29)

(3) เมื่อผลต่างแรงดันไฟฟ้า Δv ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขการทำงาน กระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานมีค่าเท่ากับศูนย์ดังสมการที่ (4.30)

$$\Delta v = |V_{no\ load} - V_{ess}| \quad (4.25)$$

กระแสไฟฟ้าจ่ายออกเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อน (Discharging mode)

$$I_{ess} = m_d (\Delta v - \Delta v_{disc,min}) \quad (4.26)$$

$$m_d = \frac{I_{disc,max} - I_{disc,min}}{\Delta v_{disc,max} - \Delta v_{disc,min}} \quad (4.27)$$

กระแสไฟฟ้ารับเข้าเมื่อรถไฟฟ้าทำงานใน โหมดเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (Charging mode)

$$I_{ess} = m_c (\Delta v - \Delta v_{char,min}) \quad (4.28)$$

$$m_c = \frac{I_{char,max} - I_{char,min}}{\Delta v_{char,max} - \Delta v_{char,min}} \quad (4.29)$$

เมื่อระดับแรงดันที่บัสบาร์ไม่อยู่ในเงื่อนไขการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานที่กำหนด กระแสจากโหนดที่ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$I_{ess} = 0 \quad (4.30)$$

4.3.5 การคำนวณผลเฉลยแรงดันด้วยวิธีฉีดกระแสไฟฟ้า (Current injection method)

แบบจำลองระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้รางตัวนำที่สาม ใช้ระดับแรงดันไฟฟ้า 750 V จะจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงเป็นสถานีเรียงกระแสด้วยไดโอดกำลัง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าสามารถไหลออกจากบัสบาร์ขั้วบวกเท่านั้น และไม่สามารถมีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับเข้าที่บัสบาร์ขั้วบวกได้ กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าขึ้นกับความเร็วของการเคลื่อนที่ ส่งผลให้โหลดกำลังไฟฟ้าไม่เป็นเชิงเส้น การคำนวณเพื่อหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่บัสจึงนิยมใช้วิธีการคำนวณแบบวนรอบ วิธีการคำนวณด้วยวิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า (Current injection method) เป็นวิธีการที่เหมาะสมมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความซับซ้อนของการเข้าสู่คำตอบมากกว่าวิธีการหาผลเฉลยด้วยการวนรอบซ้ำอื่น ๆ (กุลวรวานิชพงษ์, 2561) สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสแอร์ตัน วิธีการฉีดกระแสไฟฟ้าใช้วิธีการคำนวณแบบโหนด สมการการไหลของกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่บัส k ใด ๆ นำเสนอตั้งสมการที่ (4.31) - (4.32) สมการดังกล่าวจัดให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ตั้งสมการที่ (4.33) - (4.34)

$$V_k I_{SS,k} - P_{T,k} = V_k \sum_{i=1}^N G_{k,i} V_i \quad (4.31)$$

$$\sum_{i=1}^N G_{k,i} V_i = I_{SS,k} - \frac{P_{T,k}}{V_k} \quad (4.32)$$

โดยที่ V_k คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส k (V)

$I_{ss,k}$ คือ วัสดุสามารถลัดวงจรที่บัส k (กรณีพิจารณาบัสสถานีไฟฟ้า) (A)

$P_{T,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่บัส k (W)

$$[G][V] = [I] \quad (4.33)$$

$$\begin{bmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} & \cdots & G_{1,N} \\ G_{2,1} & G_{2,2} & \cdots & G_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N,1} & G_{N,2} & \cdots & G_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{SS,1} - \frac{P_{T,1}}{V_1} \\ I_{SS,2} - \frac{P_{T,2}}{V_2} \\ \vdots \\ I_{SS,N} - \frac{P_{T,N}}{V_N} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

เมทริกซ์คอนดักซ์แดนซ์ คือ การรวมเมทริกซ์คอนดักซ์แดนซ์ย่อยของแต่ละบัส เมื่อ $[G_s]$ คือ เมทริกซ์ย่อยคอนดักซ์แดนซ์ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน $[G_{pq}]$ คือ เมทริกซ์ย่อยคอนดักซ์แดนซ์ของตัวนำไฟฟ้าระหว่างบัส p ถึงบัส q และ $[G_{pp}]$, $[G_{qq}]$ คือ เมทริกซ์ย่อยคอนดักซ์แดนซ์ระหว่างรางวิ่งถึงกราวด์ที่บัส p และบัส q เมทริกซ์คอนดักซ์แดนซ์ย่อยแสดงในสมการที่ (4.35) – (4.37) ผลรวมของเมทริกซ์คอนดักซ์แดนซ์ย่อยดังสมการที่ (4.38) และเมทริกซ์คอนดักซ์แดนซ์ของแบบจำลองแสดงดังสมการที่ (4.39) (สัมภาวะรูปต์, 2560)

$$[G_s] = \begin{bmatrix} G_s^{(C,C)} & G_s^{(C,R)} \\ G_s^{(R,C)} & G_s^{(R,R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} & -\frac{1}{R_s} \\ -\frac{1}{R_s} & \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_{SE}} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$[G_{pq}] = \begin{bmatrix} G_{pq}^{(C,C)} & G_{pq}^{(C,R)} \\ G_{pq}^{(R,C)} & G_{pq}^{(R,R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{cond}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{rail}} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$[G_{pp}]_{RE} = [G_{qq}]_{RE} = \begin{bmatrix} G_{pp}^{(C,C)} & G_{pp}^{(C,R)} \\ G_{pp}^{(R,C)} & G_{pp}^{(R,R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} G_{RE} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

$$\begin{bmatrix} G_{11}^{(C,C)} & G_{11}^{(C,R)} \\ G_{11}^{(R,C)} & G_{11}^{(R,R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_{cond}} & -\frac{1}{R_s} \\ -\frac{1}{R_s} & \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_{SE}} + \frac{1}{R_{rail}} + \frac{1}{2} G_{RE} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11}^{(C,C)} & G_{11}^{(C,R)} \\ G_{11}^{(R,C)} & G_{11}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{12}^{(C,C)} & G_{12}^{(C,R)} \\ G_{12}^{(R,C)} & G_{12}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} G_{1N}^{(C,C)} & G_{1N}^{(C,R)} \\ G_{1N}^{(R,C)} & G_{1N}^{(R,R)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} G_{21}^{(C,C)} & G_{21}^{(C,R)} \\ G_{21}^{(R,C)} & G_{21}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \begin{bmatrix} G_{N-1,1}^{(C,C)} & G_{N-1,1}^{(C,R)} \\ G_{N-1,1}^{(R,C)} & G_{N-1,1}^{(R,R)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} G_{N1}^{(C,C)} & G_{N1}^{(C,R)} \\ G_{N1}^{(R,C)} & G_{N1}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \cdots & \cdots & \begin{bmatrix} G_{NN}^{(C,C)} & G_{NN}^{(C,R)} \\ G_{NN}^{(R,C)} & G_{NN}^{(R,R)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

การวิเคราะห์ด้วยระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบ multi-conductor system สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้าได้จากสมการ (4.40) สมการการไหลของกำลังไฟฟ้างดสมการที่ (4.41) (สัมภาวะคูปต์, 2560)

$$I_{tr} = \frac{P_{T,k}}{V_k} = \frac{P_{T,k}}{V_{k,C} - V_{k,R}} \quad (4.40)$$

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11}^{(C,C)} & G_{11}^{(C,R)} \\ G_{11}^{(R,C)} & G_{11}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{12}^{(C,C)} & G_{12}^{(C,R)} \\ G_{12}^{(R,C)} & G_{12}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} G_{1N}^{(C,C)} & G_{1N}^{(C,R)} \\ G_{1N}^{(R,C)} & G_{1N}^{(R,R)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} G_{21}^{(C,C)} & G_{21}^{(C,R)} \\ G_{21}^{(R,C)} & G_{21}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \begin{bmatrix} G_{N-1,1}^{(C,C)} & G_{N-1,1}^{(C,R)} \\ G_{N-1,1}^{(R,C)} & G_{N-1,1}^{(R,R)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} G_{N1}^{(C,C)} & G_{N1}^{(C,R)} \\ G_{N1}^{(R,C)} & G_{N1}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \cdots & \cdots & \begin{bmatrix} G_{NN}^{(C,C)} & G_{NN}^{(C,R)} \\ G_{NN}^{(R,C)} & G_{NN}^{(R,R)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{(C)} \\ V_1^{(R)} \\ V_2^{(C)} \\ V_2^{(R)} \\ \vdots \\ V_N^{(C)} \\ V_N^{(R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^{(C)} - \frac{P_{T,1}}{V_1} \\ -I_1^{(R)} + \frac{P_{T,1}}{V_1} \\ I_2^{(C)} - \frac{P_{T,2}}{V_2} \\ -I_2^{(R)} + \frac{P_{T,2}}{V_2} \\ \vdots \\ I_N^{(C)} - \frac{P_{T,N}}{V_N} \\ -I_N^{(R)} + \frac{P_{T,N}}{V_N} \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบวนรอบซ้ำด้วยวิธีนิตกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.16 สรุปขั้นตอนการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

(1) เริ่มต้นการคำนวณผลเฉลยแรงดันที่ตำแหน่งใด ๆ ของรถไฟฟ้ารอบที่ 1 ด้วยการกำหนดแรงดันที่บัสเท่ากับแรงดันไว้โหลด และแรงดันที่รางเท่ากับศูนย์ทุกบัส

(2) สร้างเมทริกซ์คอนดักซ์แดนซ์ของระบบจำลองดังที่กล่าวมาแล้วในสมการที่ (4.35) – (4.39)

(3) กำหนดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายหรือรับเข้าที่บัสของระบบเก็บสะสมพลังงานสำหรับรอบการคำนวณใด ๆ ตามการควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC สำหรับการคำนวณรอบที่ i กำหนดให้กระแสนี้มีค่าเท่ากับศูนย์

(4) สร้างเมทริกซ์กระแสไฟฟ้า

(5) คำนวณหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังสมการที่ (4.34)

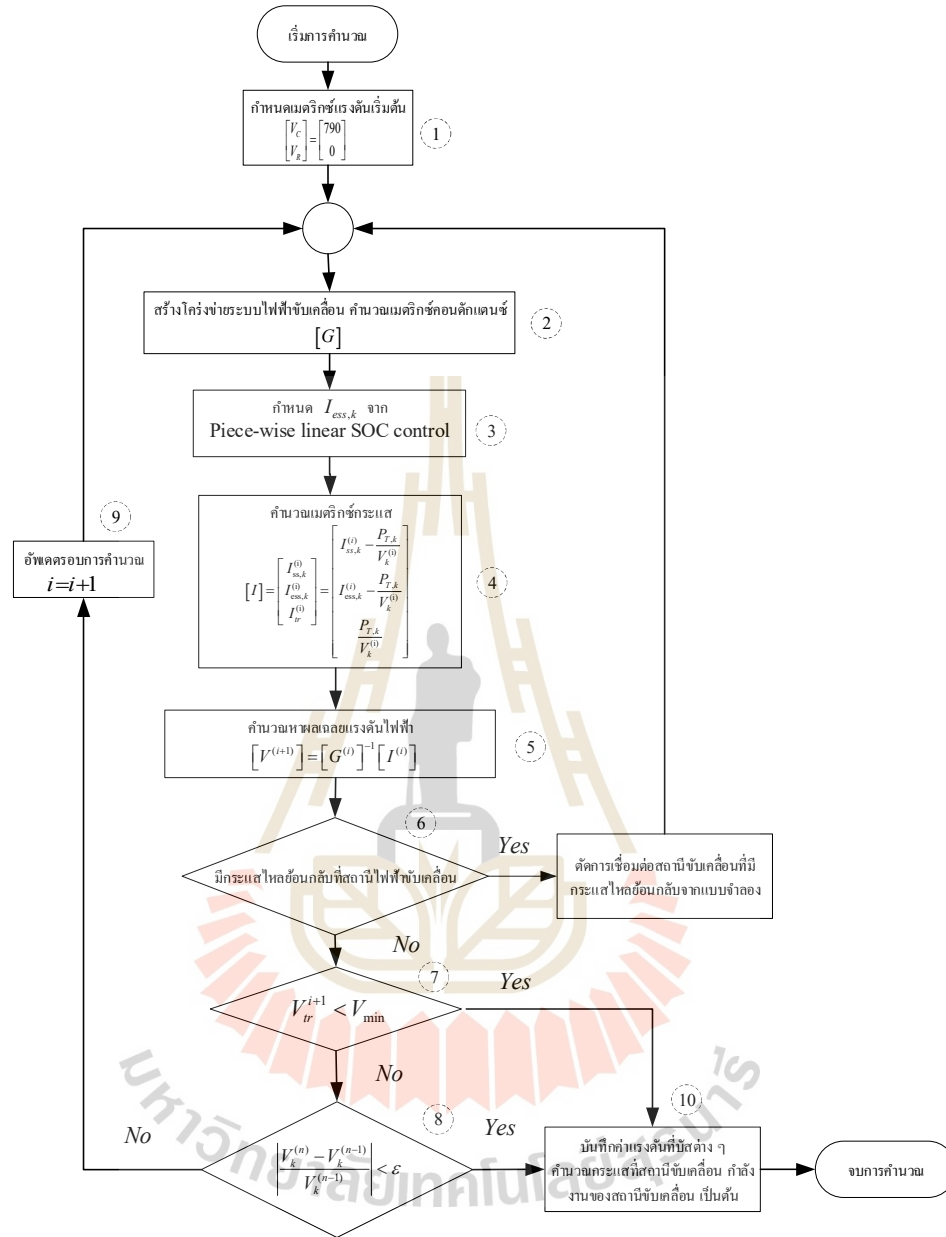
(6) ตรวจสอบค่ากระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลกลับที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนใด ๆ ตัด โหนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนดังกล่าวออกจากแบบจำลอง และกลับไปที่ยันตอนี่ (2) สถานการณ์นี้จะบ่งบอกได้ว่ารถไฟฟ้ากำลังทำงานในโหมดเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรกจ่ายพลังงานย้อนกลับ รถไฟฟ้าจ่ายกระแสให้กับระบบไฟฟ้า ดังนั้นแบบจำลองของรถไฟฟ้าต้องเปลี่ยนเป็นแหล่งจ่ายกระแสนานกับความต้านทานรถไฟฟ้า

(7) ตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าที่บัสรถไฟฟ้าต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าแรงดันต่ำสุดค่าหนึ่ง (V_{min}) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบเก็บสะสมพลังงาน กรณีที่แรงดันต่ำกว่าค่าแรงดันต่ำสุดเข้าไปขั้นตอนที่ (10)

(8) คำนวณความคลาดเคลื่อนระหว่างผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อน การคำนวณจะหยุดลงเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่บัสทุกบัสในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบันมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าที่กำหนด และทำงานในขั้นตอนที่ (10)

(9) กรณีแรงดันไฟฟ้าที่บัสยังมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าค่าที่กำหนด อัปเดตรอบการคำนวณ และการคำนวณจะทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ (2)

(10) บันทึกค่าแรงดันและกระแสในรอบก่อนจะหยุดการคำนวณ และหยุดการคำนวณแบบวนรอบซ้ำ



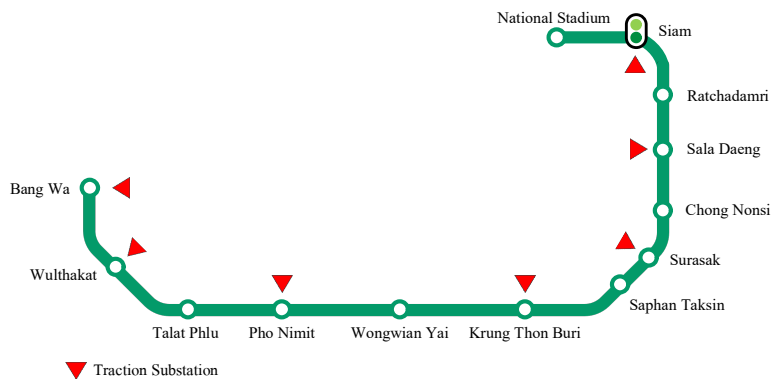
รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน

4.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสายสีลมหนึ่งขบวน

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งขบวน กรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีลม รายละเอียดการสร้างแบบจำลองแสดงในหัวข้อที่ 4.2 – 4.3 เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสายสีลม เคลื่อนที่จากสถานีต้นทางที่สถานีสนามกีฬาแห่งชาติ ถึงสถานีปลายทางที่สถานีบางหว้า และเคลื่อนที่กลับสถานีต้นทางอีกครั้ง รูปที่ 4.17 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสายสีลม พารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าในระบบทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1 รายละเอียดตำแหน่งสถานีและเวลาจอดของรถไฟฟ้าแต่ละสถานีแสดงดังตารางที่ 4.2 ตำแหน่งสถานีผู้โดยสารและสถานีจ่ายไฟฟ้า ขับเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 4.18 ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.19 ระดับความชันของเส้นทางเคลื่อนที่รถไฟฟ้าสายสีลมแสดงดังรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.3 น้ำหนักผู้โดยสารเฉลี่ยที่ใช้ในแบบจำลองชนิด AW3 หมายถึง สถานการณ์ผู้โดยสารเบียดเสียดหรือผู้โดยสาร โดยเฉลี่ย 8 คนต่อตารางเมตร

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าในระบบทดสอบ (SIEMENS, 2012)

Train parameters		
Weight	Tare weight	153 ton
	Load (payload AW3)	75 ton
Movement Feature	Max. speed	80 km/h
	Max. acceleration	0.87 m/s ²
	Max. deceleration	1 m/s ²
Efficiency	Gear, Motor, Inverter	98%, 88%, 98%
Auxiliary power	Constant load	270 kW
Train resistance	A = 4025, B = 118.67, C = 0.871	
Power system parameter		
No load voltage	790 Vdc	
Resistance	Third rail resistance	6.70 mΩ/km (W1-S6)
		8.23 mΩ/km (S6-S12)
	Running rail resistance	17.0 mΩ/km (W1-S6)
		40.46 mΩ/km (S6-S12)
Conductivity to earth	0.1 S/km	
Short-circuit resistance	13.3 mΩ (CEN, S2, S5)	
	14.70 mΩ (S7, S9, S11, S12)	

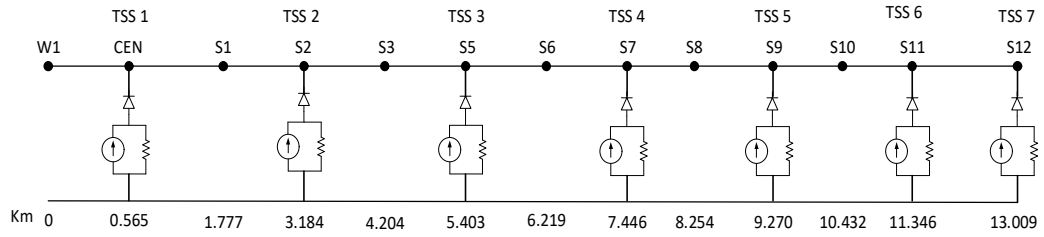


รูปที่ 4.6 รถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ ๖ รอบพระชนมพรรษาสาย ๒ (สายสีลม)

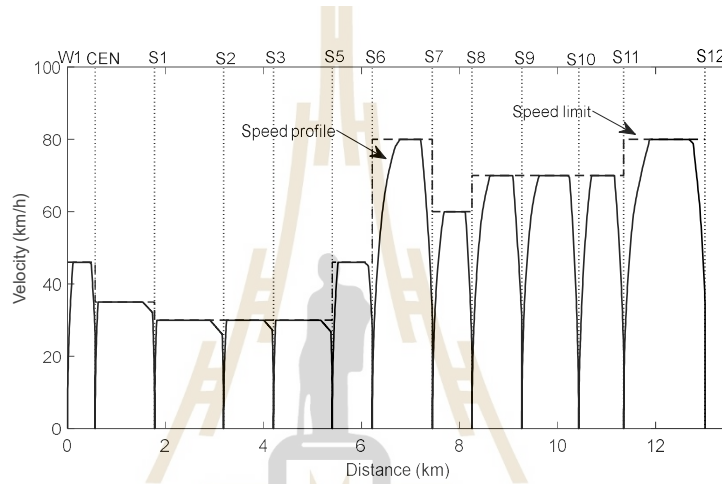
ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งสถานีและตำแหน่งสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน

Station name	Station code	Position (km)	Dwell times (s)
สนามกีฬาแห่งชาติ (National stadium)	W1	0	140
สยาม (Siam)	CEN*	0.565	20
ราชดำริ (Ratchadamri)	S1	1.777	20
ศาลาแดง (Sala Daeng)	S2*	3.184	20
ช่องนนทรี (Chong Nonsi)	S3	4.204	20
สุรศักดิ์ (Surasak)	S5*	5.403	20
สะพานตากสิน (Saphan Taksin)	S6	6.219	20
กรุงธนบุรี (Krung Thon Buri)	S7*	7.446	20
วงเวียนใหญ่ (Wongwian Yai)	S8	8.254	20
โพธิ์นิมิต (Pho Nimit)	S9*	9.270	20
ตลาคพลู (Talat Phlu)	S10	10.432	20
วุฒากาศ (Wulthakat)	S11*	11.346	20
บางหว้า (Bang Wa)	S12*	13.009	140

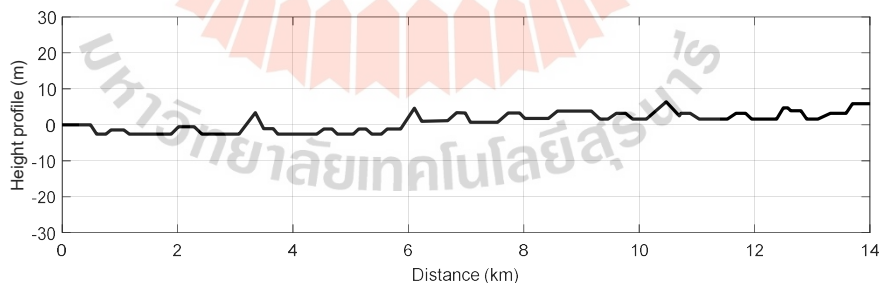
หมายเหตุ * คือ ตำแหน่งที่มีสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งสถานีผู้โดยสารและตำแหน่งสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน



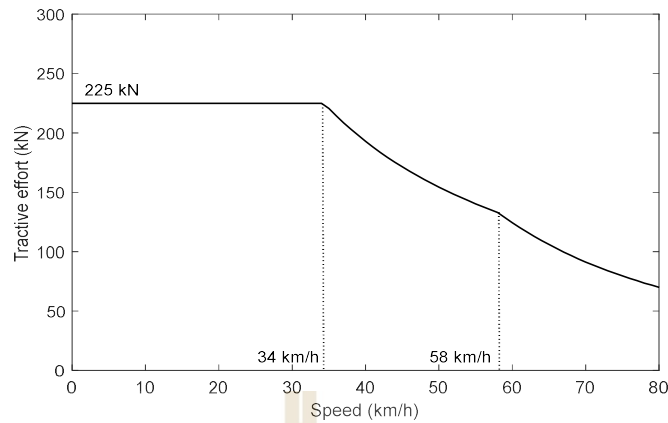
รูปที่ 4.8 ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าเทียบกับตำแหน่ง



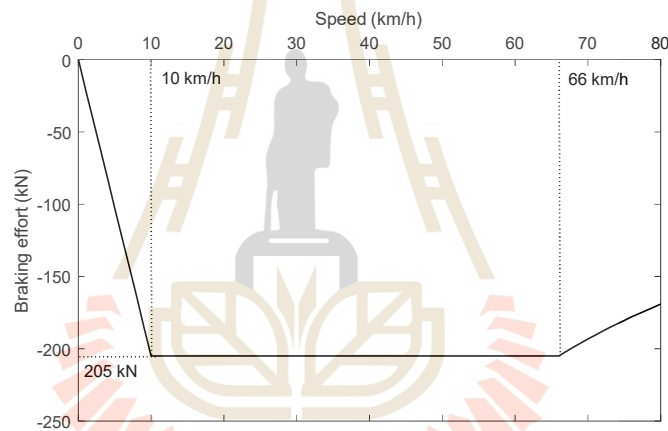
รูปที่ 4.20 ระดับความชันของเส้นทาง

ตารางที่ 4.3 ระดับความชันของเส้นทางเคลื่อนที่รถไฟฟ้าสายสีลม

	Distance (m)	Height (m)		Distance (m)	Height (m)		Distance (m)	Height (m)
1	0	0	26	5632	-1.2	51	11038	1.6
2	491	0	27	5867	-1.2	52	11528	1.6
3	595	-2.6	28	6103	4.6	53	11675	3.2
4	755	-2.6	29	6230	1	54	11842	3.2
5	849	-1.4	30	6682	1.2	55	11950	1.6
6	1066	-1.4	31	6838	3.4	56	12382	1.6
7	1161	-2.6	32	6986	3.3	57	12500	4.7
8	1887	-2.6	33	7074	0.7	58	12578	4.7
9	2019	-0.5	34	7545	0.7	59	12627	3.9
10	2286	-0.5	35	7731	3.3	60	12804	3.9
11	2423	-2.6	36	7928	3.3	61	12902	1.6
12	3066	-2.6	37	8016	1.8	62	13098	1.6
13	3346	3.4	38	8428	1.8			
14	3493	-1.1	39	8585	3.8			
15	3660	-1.1	40	9174	3.8			
16	3738	-2.6	41	9321	1.6			
17	4415	-2.6	42	9458	1.6			
18	4533	-1.2	43	9605	3.2			
19	4680	-1.2	44	9762	3.2			
20	4768	-2.6	45	9887	1.6			
21	5043	-2.6	46	10125	1.6			
22	5141	-1.2	47	10469	6.4			
23	5269	-1.2	48	10694	2.5			
24	5367	-2.6	49	10724	3.2			
25	5534	-2.6	50	10887	3.2			



รูปที่ 4.21 คุณลักษณะแรงฉุดของรถไฟฟ้า



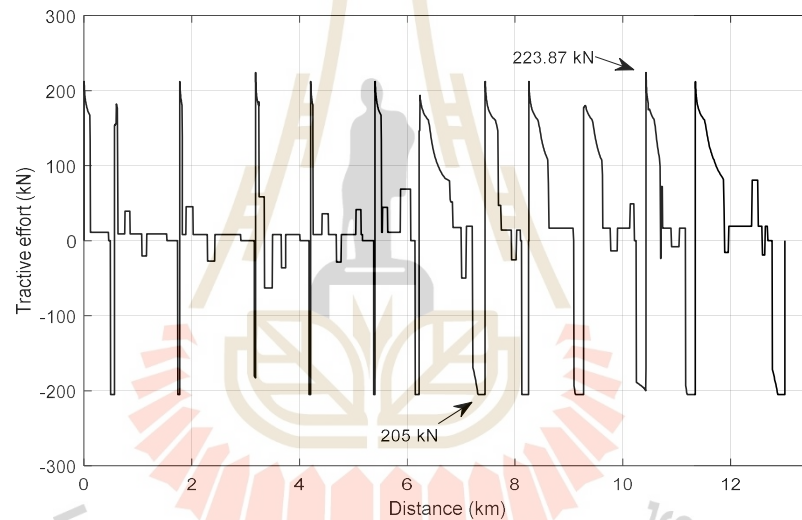
รูปที่ 4.22 คุณลักษณะแรงเบรกของรถไฟฟ้า

คุณลักษณะของแรงฉุดและแรงเบรกของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.21 - 4.22 แรงฉุดสูงสุดของรถไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนเท่ากับ 225 kN และมีแรงเบรกสูงสุดเท่ากับ 205 kN จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งรอบบริการ คือ จำลองรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานีต้นทางถึงสถานีปลายทาง และเคลื่อนที่กลับสถานีต้นทางอีกครั้ง ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า 1 รอบเท่ากับ 52 นาที พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า (E_{train}) การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรวม (E_{cons}) การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแต่ละสถานี (E_{sub}) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานตัวนำไฟฟ้า ($E_{loss,line}$) และพลังงานสูญเสียเนื่องจากการเบรก (E_{waste}) แสดงดังตารางที่ 4.4

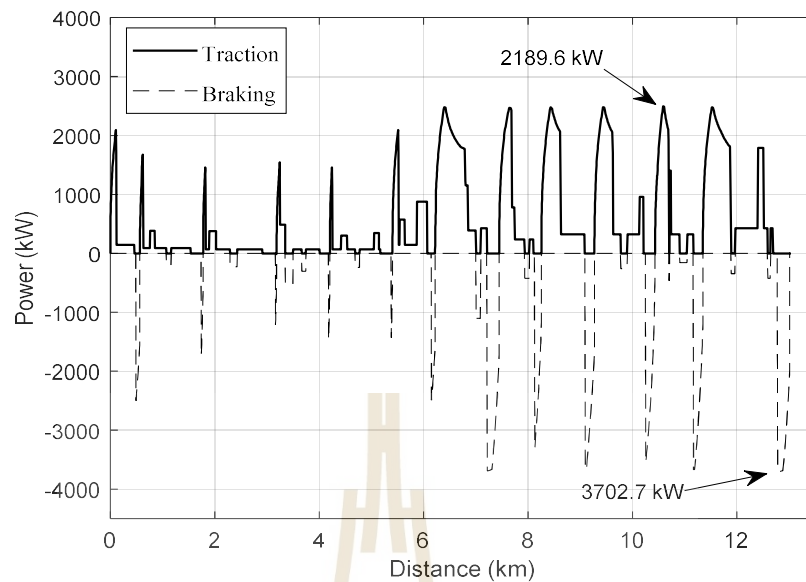
ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งรอบบริการ

E_{train} (kWh)	E_{cons} (kWh)	E_{sub} (kWh)							$E_{loss,line}$ (kWh)	E_{waste} (kWh)
		TSS 1	TSS 2	TSS 3	TSS 4	TSS 5	TSS 6	TSS 7		
592.02	606.66	83.32	84.31	89.69	100.69	99.98	87.56	61.10	14.64	154.68

แรงกดของรถไฟฟ้าเทียบกับตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 4.23 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 223.87 kN และมีแรงเบรกสูงสุดเท่ากับ 205 kN รูปที่ 4.24 แสดงกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนเป็นบวก มีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.18 MW และกำลังไฟฟ้าจากการเบรกเป็นลบ กำลังไฟฟ้าจากการเบรกสูงสุดเท่ากับ 3.70 MW

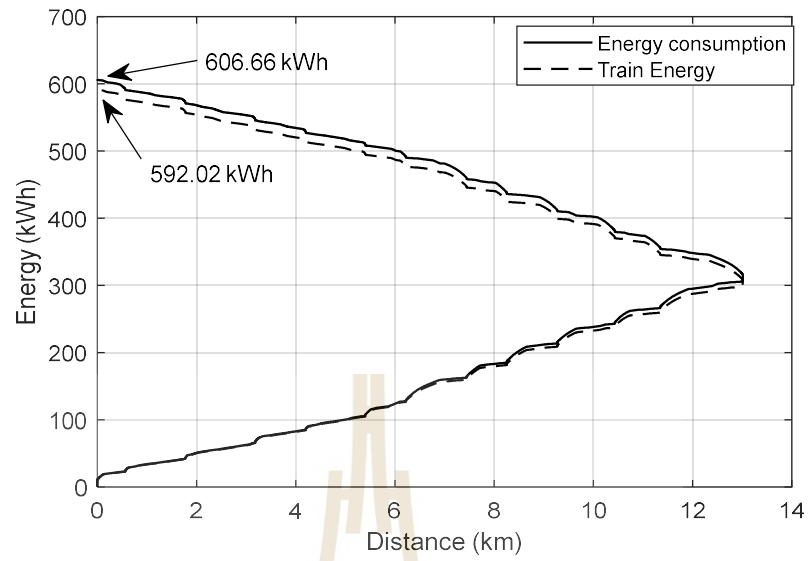


รูปที่ 4.23 แรงกดของรถไฟฟ้าเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ จากสถานี W1 ไป S12

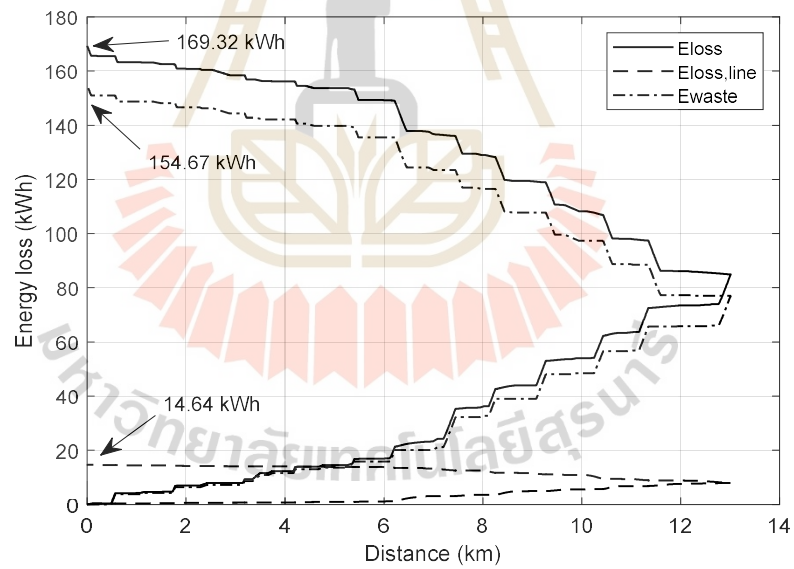


รูปที่ 4.24 กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ จากสถานี W1 ไป S12

การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.25 - 4.26 กำหนดให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จะสะสมการใช้พลังงานไฟฟ้าและมีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้น รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานีต้นทางถึงสถานีปลายทาง การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเท่ากับ 305.70 kWh พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเท่ากับ 297.82 kWh พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมและพลังงานสูญเสียเนื่องจากการเบรกของรถไฟฟ้าเท่ากับ 84.96 kWh และ 77.07 kWh ตามลำดับ เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่กลับสถานีต้นทาง การใช้พลังงานไฟฟ้าสะสมของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 606.66 kWh พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเท่ากับ 592.02 kWh และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมและพลังงานสูญเสียเนื่องจากการเบรกเท่ากับ 169.32 kWh และ 154.67 kWh ตามลำดับ

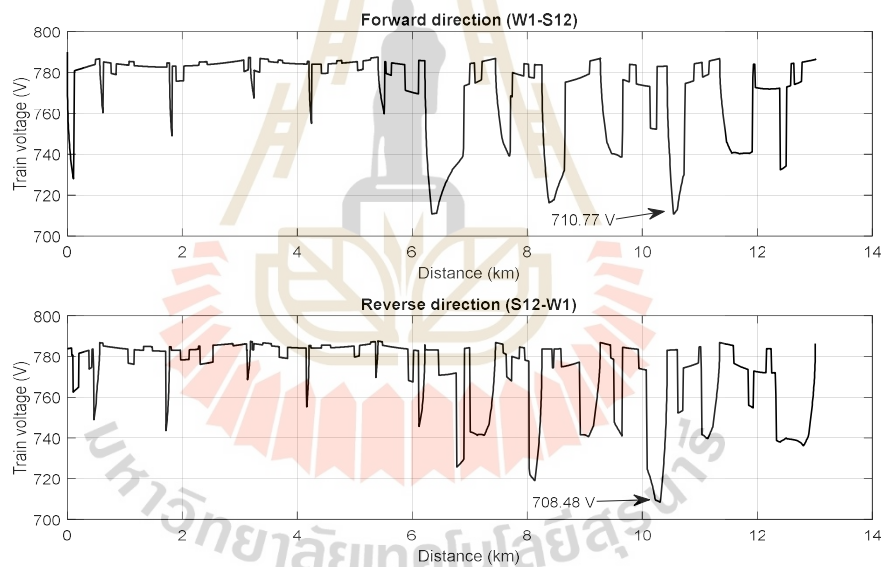


รูปที่ 4.25 การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรวม และพลังงานไฟฟ้ารถไฟ

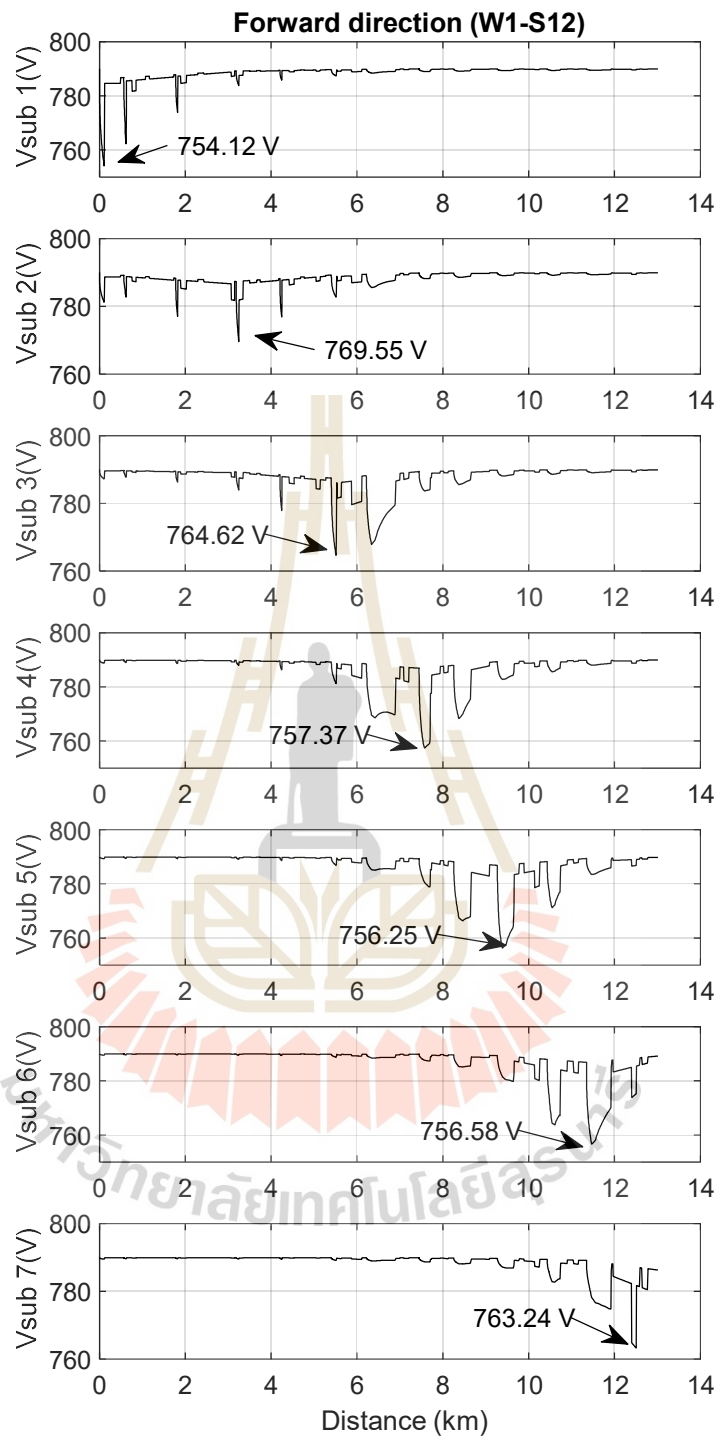


รูปที่ 4.26 พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย

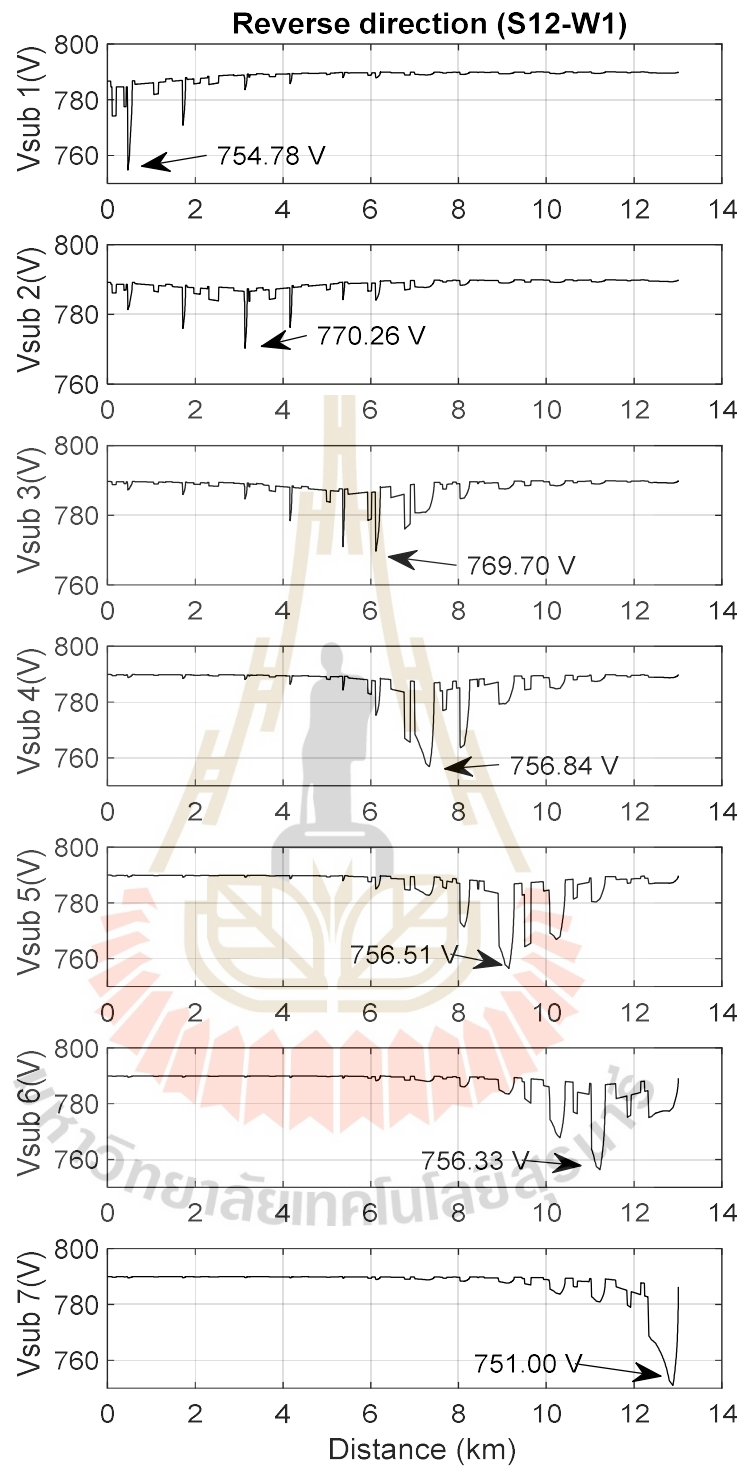
ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งรอบบริการ แรงดันไฟฟ้าที่โนครถไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โนคสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 4.27 – 4.29 แรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งรถไฟฟ้าตลอดการเคลื่อนที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 708.40 V แรงดันไฟฟ้าสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 7 มีแรงดันไฟฟ้าตกสูงสุด เท่ากับ 39 V มีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 751 V แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีแรงดันไฟฟ้าตกสูงเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่งเพื่อเคลื่อนที่ออกจากสถานีผู้โดยสาร เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่ง กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่อยู่ใกล้ตำแหน่งรถไฟฟ้าจะมีค่าสูง กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12 และเคลื่อนที่จากสถานีไฟฟ้า S12 ไป W1 แสดงดังรูปที่ 4.30 - 4.31 ตามลำดับ ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 1 จ่ายกำลังไฟฟ้าสูง เนื่องจากที่สถานี W1 ไม่มีสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 1 ที่ตำแหน่งสถานี CEN ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 2033.92 kW เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ออกจากสถานี W1



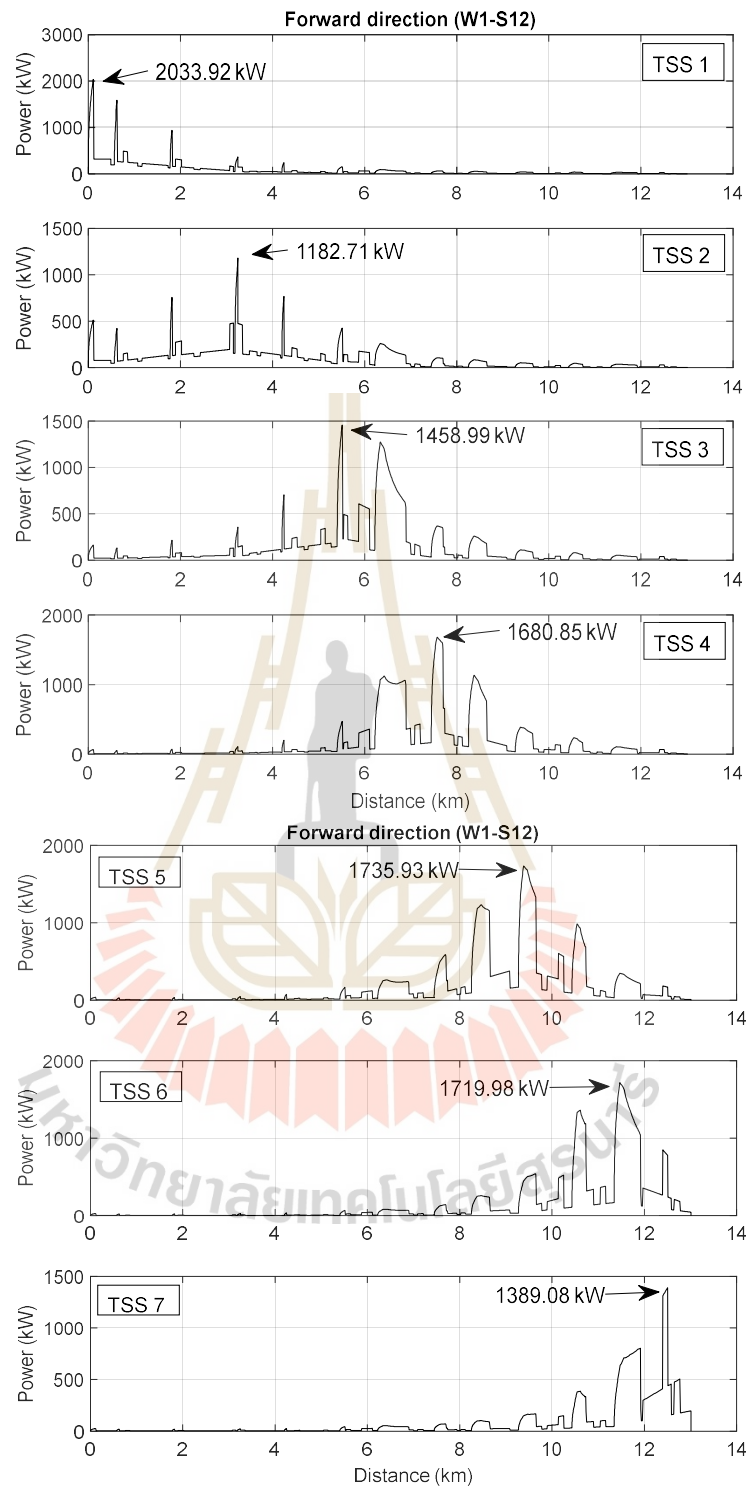
รูปที่ 4.27 แรงดันไฟฟ้าที่โนครถไฟฟ้า



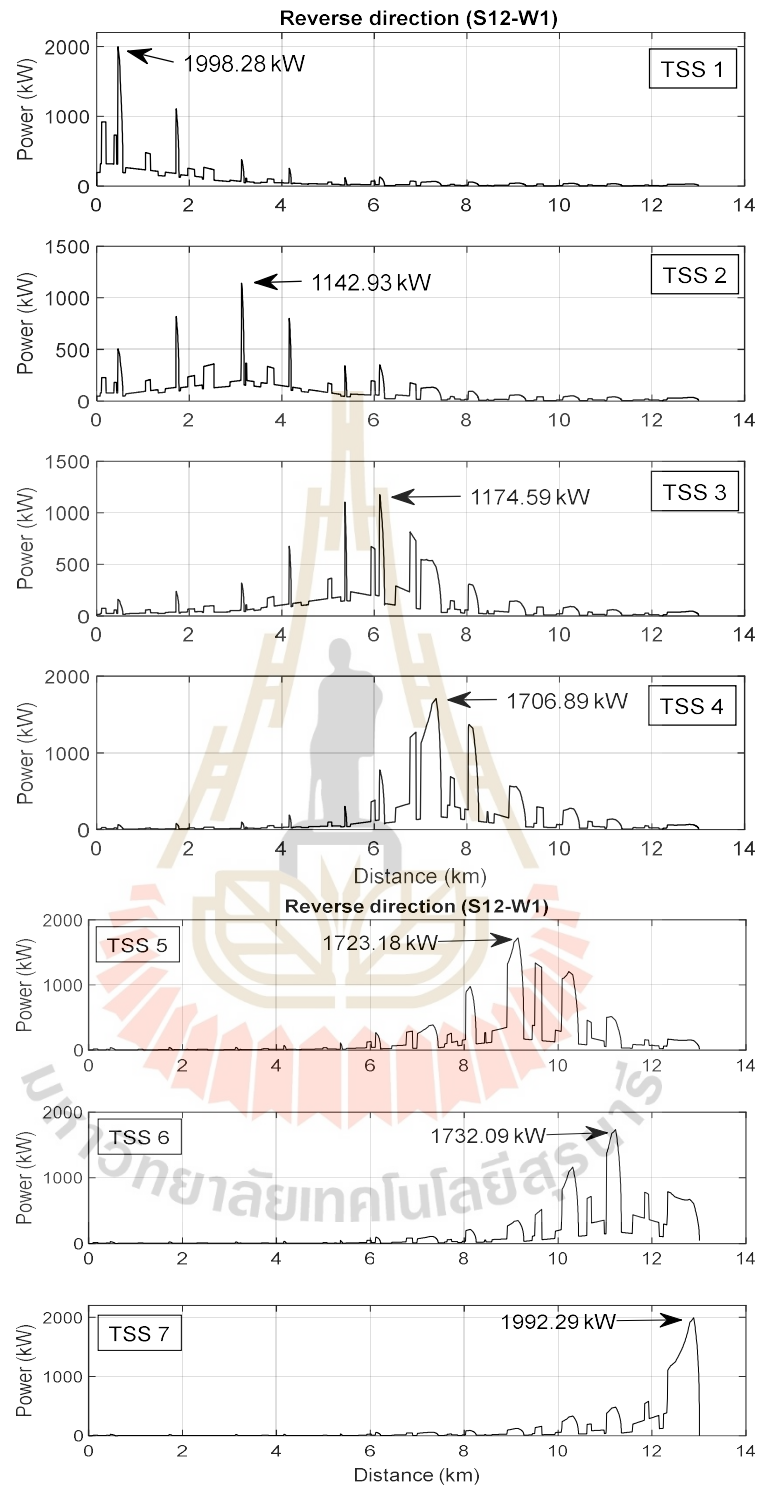
รูปที่ 4.28 แรงดันไฟฟ้าที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12



รูปที่ 4.29 แรงดันไฟฟ้าที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1



รูปที่ 4.30 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า
เคลื่อนที่จาก W1 ไป S12



รูปที่ 4.31 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จาก S12 ไป W1

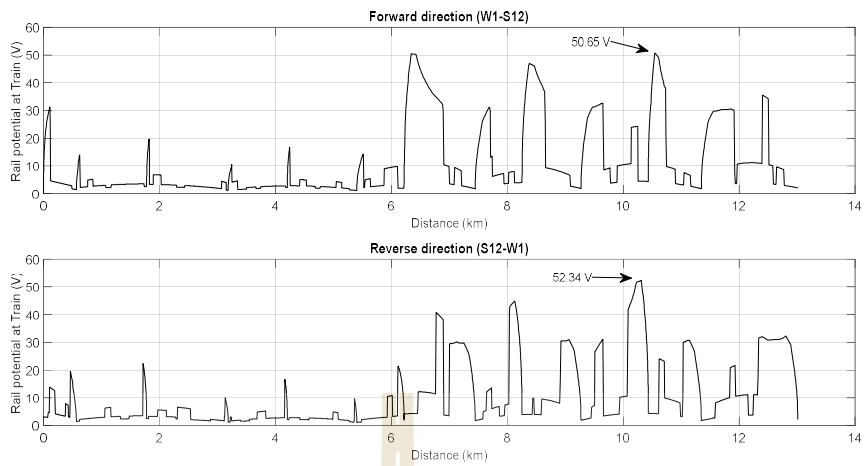
4.5 การประมาณค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลผ่านรางวิ่งไปยังดิน

ระบบบรคไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้รางวิ่งเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ค่าความต้านทานจากรางวิ่งไปยังดินส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าย้อนกลับส่วนหนึ่งผ่านไปยังดินเพื่อไหลย้อนกลับไปที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสไฟฟ้าไหลออกจากรางวิ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลไปยังโลหะในโครงสร้าง หรือ โลหะที่อยู่ใต้ดินอื่น ๆ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนในโลหะที่มีการสัมผัสกับดินเนื่องจากกระแสไฟฟ้ารั่วไหล มาตรฐาน EN 50122-2 แนะนำให้กระแสไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ยต่อหน่วยความยาวไม่ควรเกินค่า 2.5 mA/m (กระแสรั่วไหลเฉลี่ยต่อหน่วยความยาวของ 1 รางวิ่ง) เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายของรางบรคไฟฟ้าในช่วงเวลา 25 ปี (EN 50122-2, 2010) สำหรับระบบบรคไฟฟ้าที่มี 2 รางวิ่ง กระแสรั่วไหลเฉลี่ยต่อหน่วยความยาวไม่ควรเกิน 5 mA/m แบบจำลอง Multi-conductor system ที่ใช้เป็นแบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียว (One-layer grounding model) ซึ่งเป็นแบบจำลองพื้นฐานตามมาตรฐาน EN 50122-2 คำนวณแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งและกระแสรั่วไหลลงดินโดยไม่พิจารณาโครงสร้างทางยกระดับ และแรงดันไฟฟ้ารางวิ่งที่เกิดขึ้นต้องน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่สามารถเข้าถึงได้สูงสุดในระยะเวลาน้อยกว่า 300 วินาที หรือแรงดันไม่เกิน 120 V สำหรับระบบบรคไฟฟ้ากระแสตรง (ชูจิต, 2561) การประมาณค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลต่อหน่วยความยาวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.42)

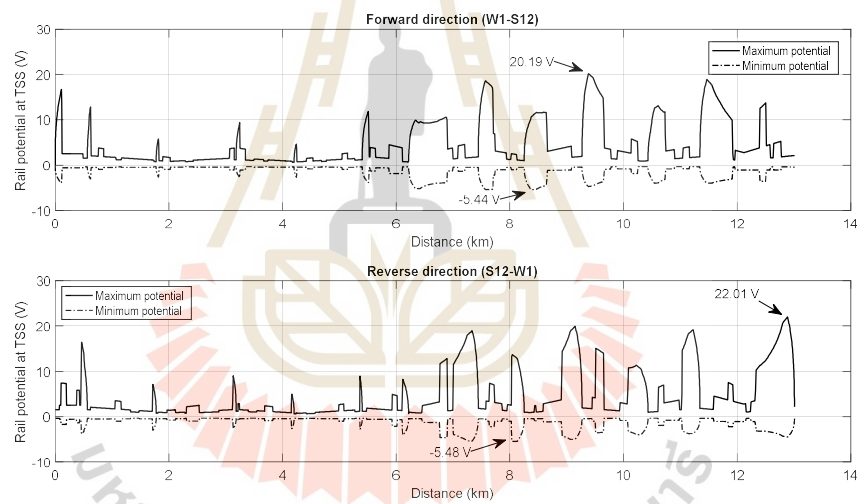
$$I_{str} = U_{RE} \times G'_{RE} \quad (4.42)$$

โดยที่ I_{str} คือ กระแสไฟฟ้ารั่วไหลที่ไหลจากรางต่อหน่วยความยาว
 U_{RE} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ราง (V)
 G'_{RE} คือ ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของรางวิ่งกับดินต่อหน่วยความยาว (S / km)

รูปที่ 4.32 และ รูปที่ 4.33 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้ารางวิ่งที่ตำแหน่งบรคไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งสูงสุดและต่ำสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งบรคไฟฟ้า มีค่าสูงสุดเท่ากับ 52.34 V แรงดันรางวิ่งสูงสุดและต่ำสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเท่ากับ 22.01 V และ -5.48 V ตามลำดับ แรงดันรางวิ่งที่เกิดขึ้นต่ำกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน



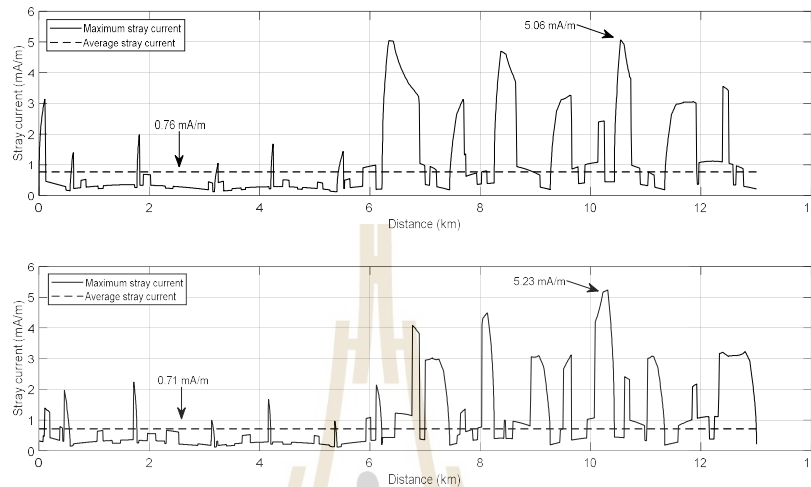
รูปที่ 4.32 แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งโนครดไฟฟ้า



รูปที่ 4.33 แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งสูงสุดและต่ำสุดที่โนคสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน
เทียบกับตำแหน่งรถไฟฟ้า

รูปที่ 4.34 แสดงกระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดและกระแสไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ยของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 5.23 mA/m จากการประมาณค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลผ่านรางวิ่งไปยังดินดังสมการที่ (4.42) กระแสไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ยเท่ากับ 0.73 mA/m กระแสไฟฟ้ารั่วไหลมีค่าสูงเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่ง เนื่องจากเมื่อรถไฟฟ้าเร่งเพื่อเคลื่อนที่ออกจากสถานี กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนมีค่าสูง ส่งผลให้มีการใช้กระแสไฟฟ้าสูง และเกิด

กระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงเช่นเดียวกัน ดังนั้น กระแสไฟฟ้ารั่วไหลมีค่าสูงซ้ำ ๆ ทุกครั้งที่รถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่ง



รูปที่ 4.34 กระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดและการไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ย

4.6 สรุป

การสร้างแบบจำลองและการจำลองการทำงานของรถไฟฟ้าที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 เป็นขั้นต้นของการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมการทำงานของรถไฟฟ้า การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ระดับแรงดันไฟฟ้าที่โนด แรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่ง หรือกระแสรั่วไหลที่อาจเกิดขึ้นจากการประมาณด้วยการคำนวณในแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยรายละเอียดการสร้างแบบจำลองในบทนี้จะถูกนำไปใช้เพื่อศึกษาการหาตำแหน่งและขนาดเหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง ซึ่งเป็นประเด็นศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ รายละเอียดจะกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 5

ตำแหน่งและขนาดเหมาะสมที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุ ยิ่งยวดแบบบริมทาง

5.1 บทนำ

การศึกษาการใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางของรถไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้านั้น ตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางเป็นปัจจัยที่สำคัญ และขนาดความจุที่เหมาะสมของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานเป็นอีกหนึ่งอย่างที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากขนาดความจุของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่ใหญ่อาจหมายถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูง ในบทนี้กล่าวถึงการพิจารณาขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบบริมทางที่เหมาะสม และการพิจารณาคำหนดติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเหมาะสมที่สุดจากการลดลงของการใช้พลังงานของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรก หากตำแหน่งเหมาะสมที่สุดต่างกัน 2 กรณี คือ จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานทุก ๆ 1 km และใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่พิจารณาผลของสถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีค่าสุดท้ายใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นเป็นเงื่อนไขบังคับ เพื่อให้ระบบเก็บสะสมพลังงานพร้อมสำหรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเสมอและไม่ประจุพลังงานจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเมื่อมีสถานะประจุต่ำ

5.2 ขนาดความจุที่เหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทาง

การพิจารณาขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบบริมทาง พิจารณาขนาดเหมาะสมที่สุดจากการจ่ายพลังงานจริงของตัวเก็บประจุยิ่งยวด การออกแบบขนาดความจุจึงพิจารณาจากการจ่ายพลังงานมากที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งใด ๆ ตลอดเส้นทางเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า เพื่อไม่ให้ขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีขนาดความจุใหญ่เกินความต้องการใช้งานจริง และยังสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด พลังงานที่สะสมภายในระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.1)

$$E_{sc} = \frac{1}{2} c_{sc} v_{sc}^2 \quad (5.1)$$

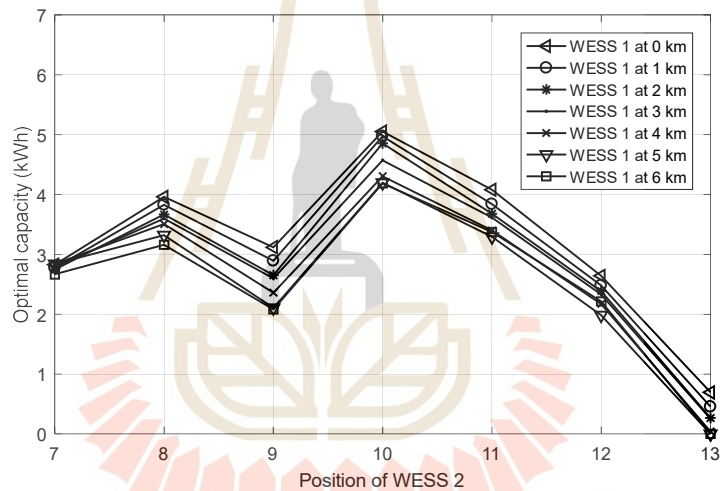
การจ่ายพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดนิยมจ่ายพลังงานให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีแรงดันไฟฟ้าไม่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด หรือจ่ายพลังงานให้สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีค่าไม่ต่ำกว่า 25% ดังนั้น ความลึกของการคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 75% เพื่อการใช้งานของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่เหมาะสม และมีขนาดความจุไม่ใหญ่เกินกว่าการใช้งานจริงมากจนเกินไป พิจารณาขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยให้พลังงานจ่ายออกต่ำสุดที่จ่ายโดยระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่งใด ๆ เป็น 75% ของพลังงานสะสมสูงสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด การหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางเริ่มต้นจากกำหนดให้การใช้พลังงานของระบบเก็บสะสมพลังงานใด ๆ เท่ากับศูนย์ เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานีผู้โดยสารต้นทางไปยังสถานีผู้โดยสารปลายทาง ระบบเก็บสะสมพลังงานทำงานตามการควบคุม พารามิเตอร์การทำงานแบบ Piece-wise Linear SOC ของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางแสดงดังตารางที่ 5.1 พลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานเป็นลบเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานเป็นบวกเมื่อรับกระแสไฟฟ้าจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า 1 รอบการทำงาน (ไป-กลับ) ออกแบบให้พลังงานที่จ่ายออกต่ำสุดของระบบเก็บสะสมพลังงานเท่ากับ 75% ของพลังงานสูงสุดระบบเก็บสะสมพลังงาน จำลองติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางจำนวน 2 ชุด เมื่อชุดที่ 1 ติดตั้งอยู่ระหว่างครึ่งแรกของเขตจ่ายไฟฟ้า หรือที่ตำแหน่ง 0 km – 6 km และชุดที่ 2 ติดตั้งที่ตำแหน่ง 7 km – 13 km หรือระหว่างครึ่งหลังของเขตจ่ายไฟฟ้า เปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางทุก ๆ 1 km ตัวอย่างเช่น ชุดที่ 1 ติดตั้งที่ตำแหน่ง 0 km ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 2 ที่ตำแหน่ง 7 km – 13 km หรือชุดที่ 1 ติดตั้งที่ตำแหน่ง 1 km จำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 2 ที่ตำแหน่ง 7 km – 13 km เช่นเดียวกัน พลังงานไฟฟ้าจ่ายออกสูงสุดจากผลการจำลองแสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์การควบคุมการทำงานแบบ Piece-wise Linear SOC

m_d	Discharging				m_c	Charging			
	$I_{disc,min}$ (A)	$I_{disc,max}$ (A)	$\Delta v_{disc,min}$ (V)	$\Delta v_{disc,max}$ (V)		$I_{char,min}$ (A)	$I_{char,max}$ (A)	$\Delta v_{char,min}$ (V)	$\Delta v_{char,max}$ (V)
6.40	0	1000	2	158	6.27	10	1000	0	158

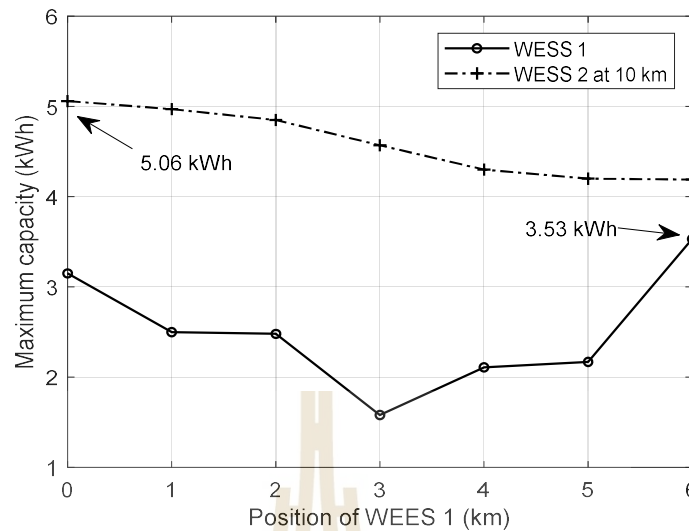
ตารางที่ 5.2 พลังงานจ่ายออกสูงสุดและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบริมทาง 2 ชุด

Position (km)		$E_{disc,max}$ (kWh)		Optimal capacities (kWh)	
WESS 1	WESS 2	WESS 1	WESS 2	WESS 1	WESS2
0	10	2.34	3.79	3.15	5.06
1	10	1.87	3.73	2.50	4.97
2	10	1.85	3.64	2.48	4.85
3	10	1.17	3.43	1.58	4.57
4	10	1.56	3.23	2.11	4.30
5	10	1.58	3.15	2.17	4.20
6	10	2.60	3.14	3.53	4.19



รูปที่ 5.1 ขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบริมทางชุดที่ 2

ขนาดความจุตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 2 ติดตั้งที่ตำแหน่ง 10 km ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ขนาดความจุระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 1 เมื่อติดตั้งชุดที่ 2 ที่ตำแหน่ง 10 km แสดงดังรูปที่ 5.2 ขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดใหญ่ที่สุดที่เท่ากับ 3.53 kWh และ 5.06 kWh สำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เพื่อการออกแบบขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้สามารถจ่ายพลังงานได้สูงสุดในทุกกรณี ขนาดความจุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบริมทาง 2 ชุด เท่ากับขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใหญ่ที่สุดของทุกกรณีที่จำลอง คือ 3.53 kWh และ 5.06 kWh สำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.2 ผลการออกแบบขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบริมทาง 2 ชุด

5.3 ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด

การศึกษาการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้า มีการศึกษาทั้งแบบติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถไฟฟ้า และการศึกษาการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอยู่กับที่ ซึ่งการติดตั้งแบบอยู่กับที่อาจหมายถึงการติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน หรือการติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งใด ๆ ระหว่างเส้นทางรถเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งแบบอยู่กับที่จะขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงาน เช่น การติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งที่เกิดแรงดันไฟฟ้าตกมากเพื่อชดเชยแรงดัน (Nishimura, et al., 2011) การติดตั้งที่ตำแหน่งใด ๆ เพื่อการใช้ขนาดของอุปกรณ์เก็บพลังงานน้อยที่สุด ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนการติดตั้งต่ำ หรือการติดตั้งตำแหน่งที่ส่งผลให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบน้อยที่สุด (Ratniyomchai et al., 2015) เป็นต้น งานวิจัยนี้พิจารณาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (E_{cons}) น้อยที่สุด และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการเบรก (E_{waste}) น้อยที่สุด

พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการเบรกที่ไม่สามารถเก็บสะสมพลังงานได้ตลอดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า พลังงานดังกล่าวจะถูกทำให้สูญเสียผ่านความต้านทานการเบรกในรูปของความร้อน พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการเบรกสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.2) โดยที่ E_b คือ พลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานตลอดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.3) เมื่อ P_b คือ กำลังไฟฟ้าจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน $E_{ess.char}$ และ

P_{char} คือ พลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่เก็บสะสมได้ของระบบเก็บสะสมพลังงานทั้งหมด ดังสมการที่ (5.4) โดยที่ K คือ จำนวนของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ติดตั้ง

$$E_{waste} = E_b - E_{ess,char} \quad (5.2)$$

$$E_b = \int_{t=0}^T P_b dt \quad (5.3)$$

$$E_{ess,char} = \sum_{k=1}^K \int_{t=0}^T P_{char,k} dt \quad (5.4)$$

พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานภายในตัวนำไฟฟ้ารางที่สาม ($E_{loss,line}$) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.5) โดยที่ N คือ จำนวนสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน i_{sub} และ i_{ess} คือ กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และกระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงาน ตามลำดับ v_{sub} และ v_{ess} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งระบบเก็บสะสมพลังงาน ตามลำดับ และ v_t คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งรถไฟฟ้า

$$E_{loss,line} = \sum_{n=1}^N \int_{t=0}^T i_{sub,n} \times (v_{sub,n} - v_t) dt + \sum_{k=1}^K \int_{t=0}^T i_{ess,k} \times (v_{ess,k} - v_t) dt \quad (5.5)$$

การทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน คือ การรับกระแสไฟฟ้า หรือการจ่ายกระแสไฟฟ้า ตามการควบคุมการทำงานดังที่กล่าวมาแล้วนั้น กำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานใด ๆ เมื่อมีการรับกระแสไฟฟ้า (P_{char}) กระแสไฟฟ้ามักเป็นลบ และกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า (P_{disc}) กระแสไฟฟ้ามักเป็นบวก สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.6) – (5.7) โดยที่ η_{ess} คือ ประสิทธิภาพของระบบเก็บสะสมพลังงาน งานวิจัยนี้พิจารณาค่าประสิทธิภาพของระบบเก็บสะสมพลังงานโดยประมาณเท่ากับ 95%

$$P_{char} = i_{ess} v_{ess} \times \eta_{ess} \quad (5.6)$$

$$P_{disc} = \frac{i_{ess} v_{ess}}{\eta_{ess}} \quad (5.7)$$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานแสดงดังสมการที่ (5.8)

$$P_{ess} = \begin{cases} i_{ess} v_{ess} \times \eta_{ess} & \text{if } i_{ess} < 0 \\ \frac{i_{ess} v_{ess}}{\eta_{ess}} & \text{if } i_{ess} > 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

พลังงานไฟฟ้าที่สะสมภายในระบบเก็บสะสมพลังงานที่เวลาใด ๆ คำนวณได้ดังสมการที่ (5.10)

$$E_{ess}(t+1) = E_{ess}(t) - P_{ess}(t+1) \times \Delta t \quad (5.10)$$

พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวม (E_{loss}) ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการเบรก และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานตัวนำไฟฟ้ารางที่สาม ดังสมการที่ (5.11)

$$E_{loss} = E_{waste} + E_{loss, line} \quad (5.11)$$

การหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง เป็นการจำลองติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่งใด ๆ เพื่อหาตำแหน่งที่ระบบเก็บสะสมพลังงานช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้า และสามารถเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานได้ เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และช่วยลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการเบรก พิจารณาการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (%Energy saving) ดังสมการที่ (5.11) (Ciccarelli et al., 2011) และการลดลงของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการเบรก (%Loss reduction) ดังสมการที่ (5.12) ตามลำดับ โดยที่ $E_{cons, base}$ และ $E_{waste, base}$ คือ การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกกรณีไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงาน อ้างอิงพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรก ตารางที่ 4.4

$$\% \text{Energy saving} = \left[1 - \frac{E_{cons}}{E_{cons, base}} \right] \times 100 \quad (5.11)$$

$$\% \text{Loss reduction} = \left[1 - \frac{E_{waste}}{E_{waste, base}} \right] \times 100 \quad (5.12)$$

จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง กรณีศึกษา รถไฟฟ้าสายสีลม รายละเอียดแสดงในบทที่ 4 กำหนดตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานชุดแรกอยู่ระหว่างครึ่งแรกของเขตจ่ายไฟฟ้า หรือที่ตำแหน่ง 0 km – 6 km และชุดที่ 2 อยู่ในระยะทางครึ่งหลังของเขตจ่ายไฟฟ้า หรือที่ตำแหน่ง 7 km – 13 km เปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งทุก ๆ 1 km ขนาดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเท่ากับ 3.53 kWh และ 5.06 kWh กำหนดสถานะประจุเริ่มต้นของตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้ง 2 เท่ากับ 100% การใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (E_{cons}) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรก (E_{waste}) พลังงานเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานที่สะสมได้ (E_{char}) พลังงานไฟฟ้าจ่ายโดยระบบเก็บสะสมพลังงาน (E_{disc}) ความลึกการคายประจุสูงสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (DOD_{max}) การประหยัดพลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (%Energy saving) และการลดลงของพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (%Loss reduction) แสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การจำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด

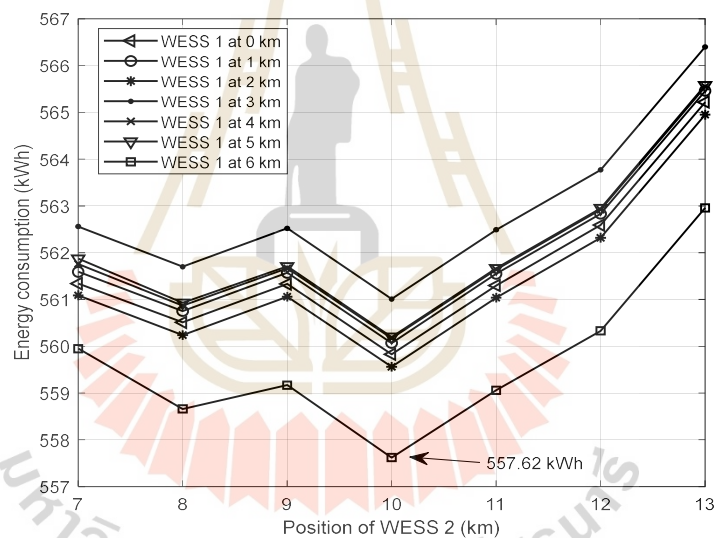
Position (km)		E_{cons} (kWh)	E_{waste} (kWh)	E_{char} (kWh)	E_{disc} (kWh)	DOD_{max} (%)		Energy saving (%)	Loss reduction (%)
WESS1	WESS2					WESS1	WESS2		
0	7	561.34	109.18	11.14	11.98	54.84	47.95	7.47	29.42
	8	560.51	108.22	12.00	12.84	54.84	48.60	7.61	30.04
	9	561.33	109.05	11.32	12.17	54.84	23.17	7.47	29.50
	10	559.83	107.59	12.59	13.43	54.84	41.45	7.72	30.45
	11	561.30	109.06	11.27	12.12	54.84	28.21	7.48	29.49
	12	562.59	110.43	10.02	10.87	54.84	47.83	7.26	28.61
	13	565.22	113.21	7.47	8.32	54.84	44.55	6.83	26.81
1	7	561.59	109.74	10.73	11.80	43.08	45.09	7.43	29.06
	8	560.75	108.74	11.60	12.67	42.84	48.05	7.57	29.70
	9	561.57	109.53	10.93	11.99	42.77	29.17	7.43	29.19
	10	560.07	108.07	12.19	13.25	42.77	41.45	7.68	30.13
	11	561.55	109.55	10.88	11.94	42.77	28.21	7.44	29.17
	12	562.83	110.93	9.63	10.69	42.77	47.83	7.22	28.29
	13	565.46	113.71	7.08	8.14	42.77	44.55	6.79	26.49

ตารางที่ 5.3 การจำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด (ต่อ)

Position (km)		E_{cons}	E_{waste}	E_{char}	E_{disc}	DOD_{max} (%)		Energy saving (%)	Loss reduction (%)
WESS1	WESS2	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	WESS1	WESS2		
2	7	561.09	109.57	10.86	12.26	51.97	47.52	7.51	29.16
	8	560.24	108.47	11.81	13.14	50.08	48.15	7.65	29.87
	9	561.06	109.30	11.14	12.46	50.08	29.17	7.52	29.34
	10	559.56	107.80	12.40	13.73	50.13	41.45	7.76	30.31
	11	561.04	109.26	11.09	12.41	50.13	28.20	7.52	29.37
	12	562.32	110.63	9.84	11.17	50.13	47.83	7.31	28.48
	13	564.95	113.41	7.29	8.61	50.13	44.55	6.88	26.68
3	7	562.56	110.59	9.97	10.83	35.81	43.53	7.27	28.51
	8	561.70	109.20	11.22	11.71	28.81	47.79	7.41	29.40
	9	562.52	109.96	10.56	11.04	28.73	29.17	7.28	28.91
	10	561.01	108.48	11.82	12.30	28.73	41.45	7.52	29.87
	11	562.49	109.95	10.50	10.99	28.72	28.21	7.28	28.92
	12	563.77	111.32	9.26	9.26	28.73	47.83	7.07	28.03
	13	566.40	114.11	6.70	7.19	28.73	44.55	6.64	26.23
4	7	561.76	110.06	10.36	11.61	42.95	47.61	7.40	28.85
	8	560.87	108.27	12.04	12.53	37.14	47.42	7.55	30.00
	9	561.67	109.08	11.35	11.88	37.11	29.17	7.42	29.48
	10	560.17	107.58	12.62	13.15	37.12	41.45	7.66	30.45
	11	561.64	109.03	11.31	11.83	37.12	28.21	7.42	29.51
	12	562.92	110.41	10.07	10.59	37.12	47.83	7.21	28.62
	13	565.55	113.19	7.51	8.03	37.12	44.54	6.78	26.82
5	7	561.87	110.00	10.39	11.53	47.60	47.72	7.38	28.89
	8	560.93	108.73	11.65	12.50	40.59	46.33	7.54	29.71
	9	561.71	108.58	11.86	11.86	36.81	29.16	7.41	29.80
	10	560.20	107.02	13.14	13.14	36.31	41.45	7.66	30.81
	11	561.67	108.49	11.83	11.83	36.56	28.21	7.42	29.86
	12	562.95	109.84	10.59	10.59	36.56	47.83	7.21	28.99
	13	565.58	112.62	8.03	8.04	35.56	44.55	6.77	27.19

ตารางที่ 5.3 การจำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด (ต่อ)

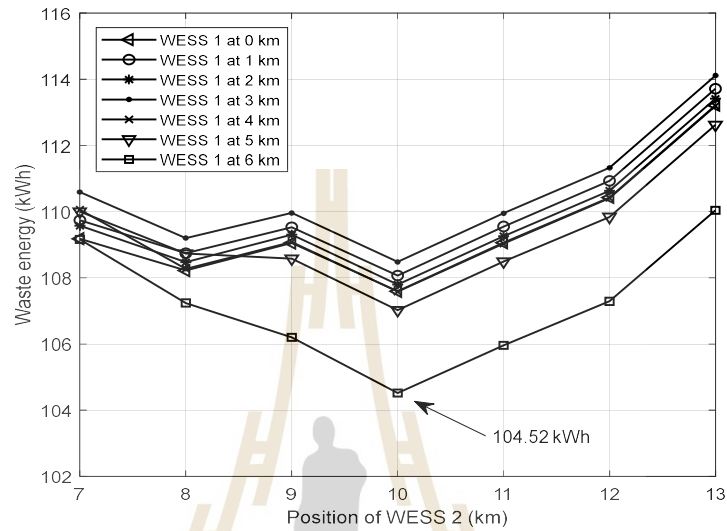
Position (km)		E_{cons} (kWh)	E_{waste} (kWh)	E_{char} (kWh)	E_{disc} (kWh)	DOD_{max} (%)		Energy saving (%)	Loss reduction (%)
WESS1	WESS2					WESS1	WESS2		
6	7	559.95	109.16	11.16	13.29	74.98	46.52	7.70	29.43
	8	558.66	107.24	12.98	14.53	74.98	46.07	7.91	30.67
	9	559.17	106.20	13.95	14.17	73.24	38.13	7.83	31.34
	10	557.62	104.52	15.48	15.48	70.76	49.78	8.08	32.43
	11	559.06	105.96	14.20	14.20	70.99	28.21	7.85	31.50
	12	560.33	107.29	12.97	12.97	70.99	47.83	7.64	30.64
	13	562.96	110.04	10.42	10.42	70.99	44.55	7.20	28.86



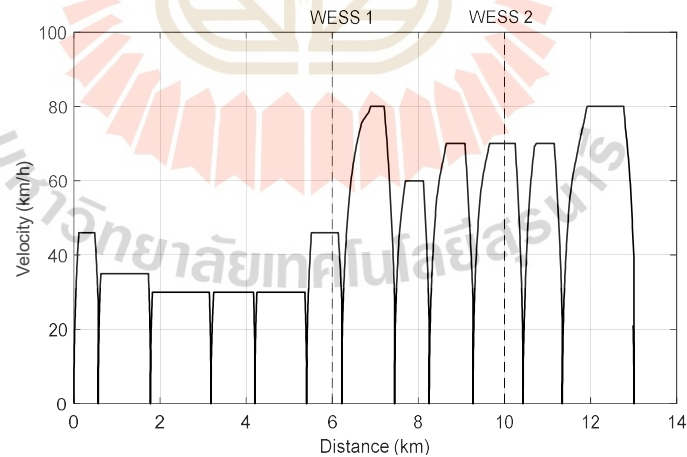
รูปที่ 5.3 การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน

ผลการจำลองติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด ดังตารางที่ 5.3 ตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด ที่ส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนลดลงสูงสุด เมื่อติดตั้งที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแสดงดังรูปที่ 5.3 – 5.4 การประหยัดพลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสูงสุด 8.08% และการลดลง

ของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกสูงสุดเท่ากับ 32.43% เมื่อติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าและตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.4 พลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกเทียบกับตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน

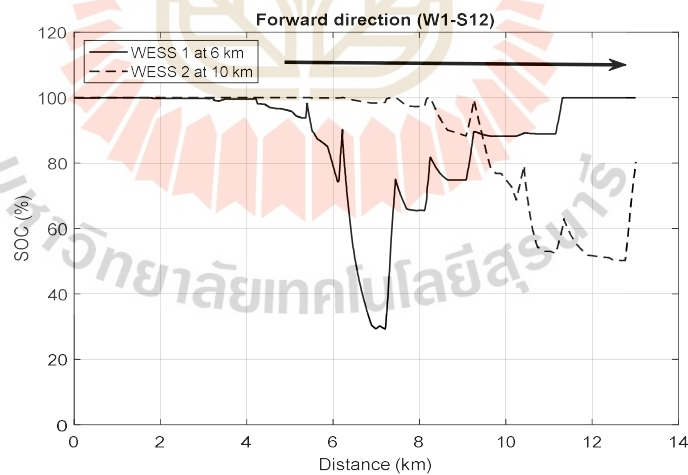


รูปที่ 5.5 ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าและตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km

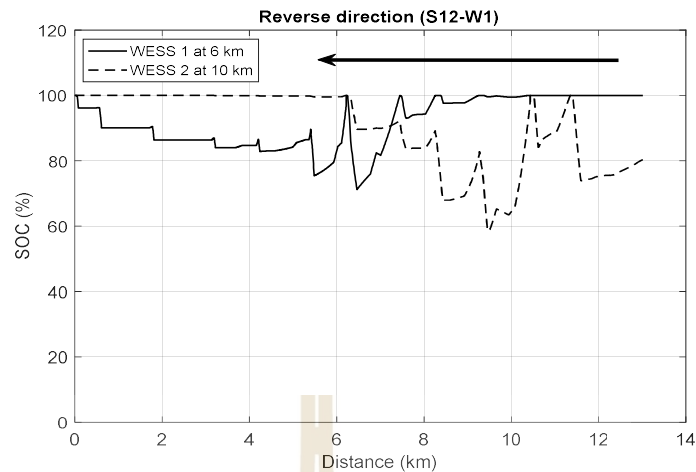
ตารางที่ 5.4 การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km

Case	E_{sub} (kWh)							E_{cons} (kWh)	$E_{loss,line}$ (kWh)	E_{waste} (kWh)
	TSS1	TSS2	TSS3	TSS4	TSS5	TSS6	TSS7			
without WESSs	83.32	84.31	89.69	100.69	99.98	87.56	61.10	606.66	14.64	154.68
with WESSs	78.41	77.33	80.92	92.66	90.10	80.37	57.83	557.62	14.17	104.52
% Reduction	5.89	8.28	9.77	7.98	9.88	8.21	5.36	8.08	3.24	32.43

เปรียบเทียบผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากรณีไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงานและกรณีมีระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนใด ๆ (E_{sub}) การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรวม (E_{cons}) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานตัวนำไฟฟ้ารางที่สาม ($E_{loss,line}$) และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการเบรก (E_{waste}) แสดงดังตารางที่ 5.4 การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 5 (S9) หรือที่ตำแหน่ง 9.27 km จากสถานีผู้โดยสาร W1 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนลดลงสูงสุด 9.88 kWh คิดเป็น 9.88%



รูปที่ 5.6 สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า กรณี WESSs ติดตั้งที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12

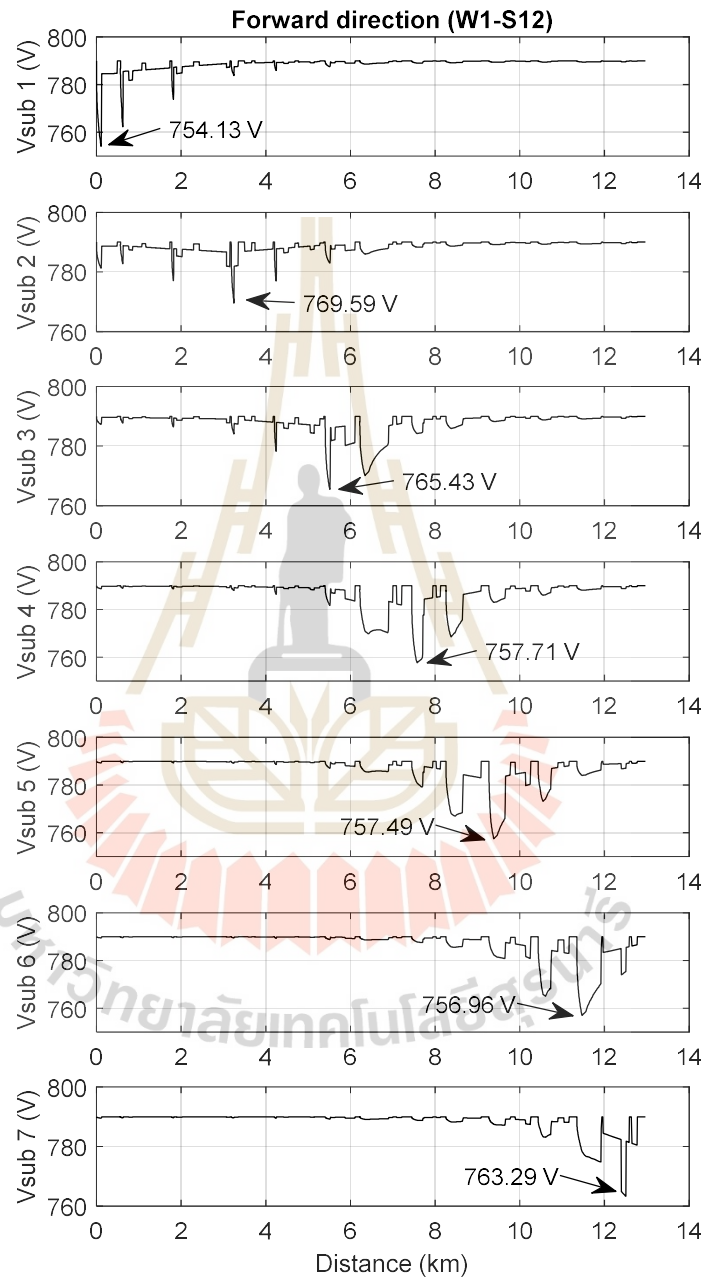


รูปที่ 5.7 สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า กรณี WESSs ติดตั้งที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1

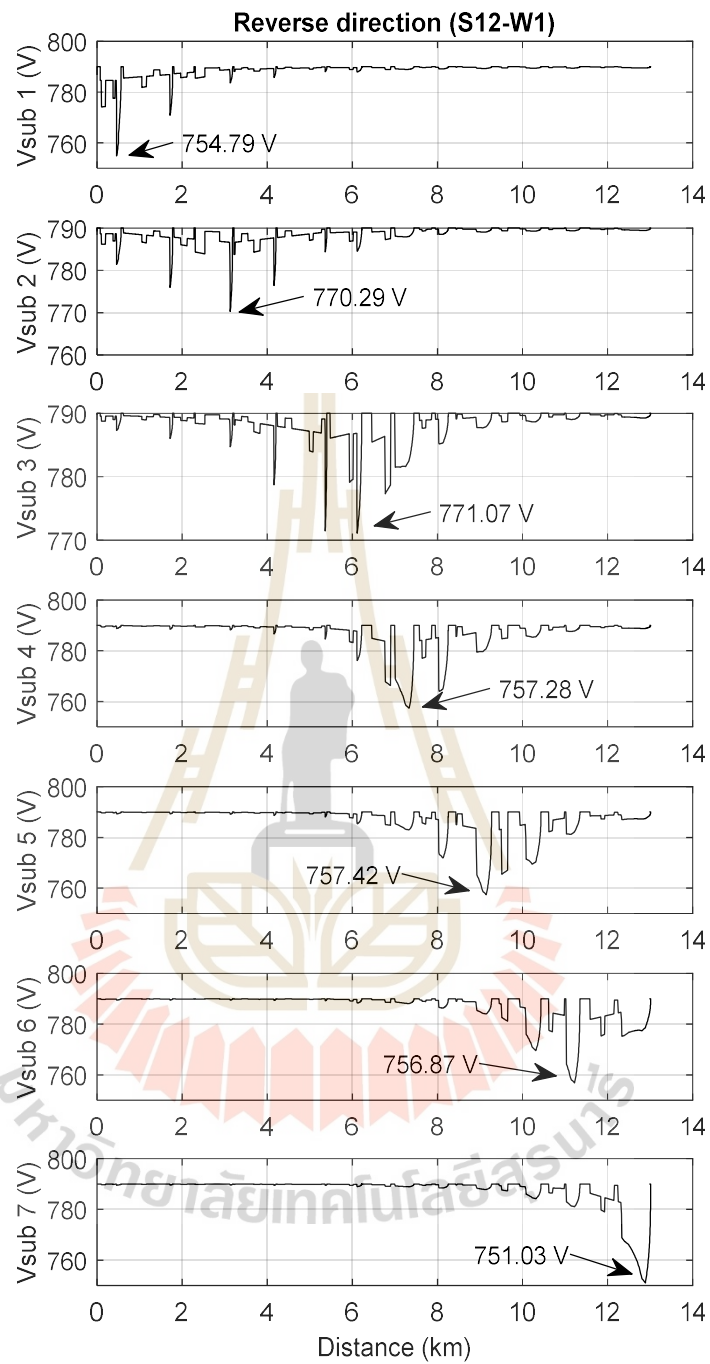
การเปลี่ยนแปลงสถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดชุดที่ 1 ติดตั้งที่ตำแหน่ง 6 km และชุดที่ 2 ติดตั้งที่ตำแหน่ง 10 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า กรณีรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12 และเคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1 แสดงดังรูปที่ 5.6 - 5.7 ตามลำดับ ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางชุดที่ 1 และ 2 มีค่าสถานะประจุสุดท้ายเมื่อเคลื่อนที่กลับมาที่สถานี W1 เท่ากับ 100% แรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 5.8 - 5.9 แรงดันไฟฟ้าตกสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 7 มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 751.03 V สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 5 สามารถชดเชยแรงดันไฟฟ้าตกได้สูงสุดเท่ากับ 1.17 V เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงาน มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 757.42 V

แรงดันไฟฟ้าที่โนครถไฟฟ้าตลอดการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 5.10 แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 508.34 V แรงดันไฟฟ้าที่โนครถไฟฟ้าต่ำเนื่องจากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน ส่งผลให้สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในระบบถูกตัดออก และรถไฟฟ้าในแบบจำลองเป็นแหล่งจ่ายพลังงานซึ่งมีโวลตรับกระแสไฟฟ้าเป็นระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง เมื่อรถไฟฟ้าจ่ายพลังงานให้กับระบบเก็บสะสมพลังงาน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่โนครถไฟฟ้าลดลง กำหนดให้รถไฟฟ้าจ่ายพลังงานให้แรงดันไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 500 V จากข้อกำหนดตามมาตรฐานแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้ากระแสตรงระดับแรงดัน 750 V ดังตารางที่ 3.3 แรงดันไฟฟ้าที่โนครบบเก็บสะสมพลังงานตลอดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.11 - 5.12 แรงดันไฟฟ้าที่โนครบบเก็บสะสมพลังงานมีค่าต่ำตาม โนครถไฟฟ้าเมื่อทำงาน

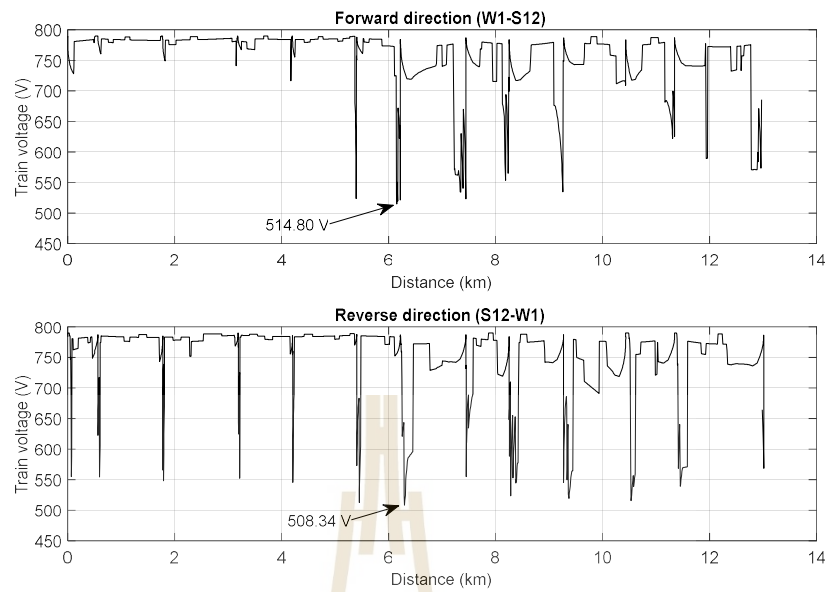
ในโหมดเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน ระบบเก็บสะสมพลังงานมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 500.16 V และ 500.27 V สำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 6 และ 10 km ตามลำดับ



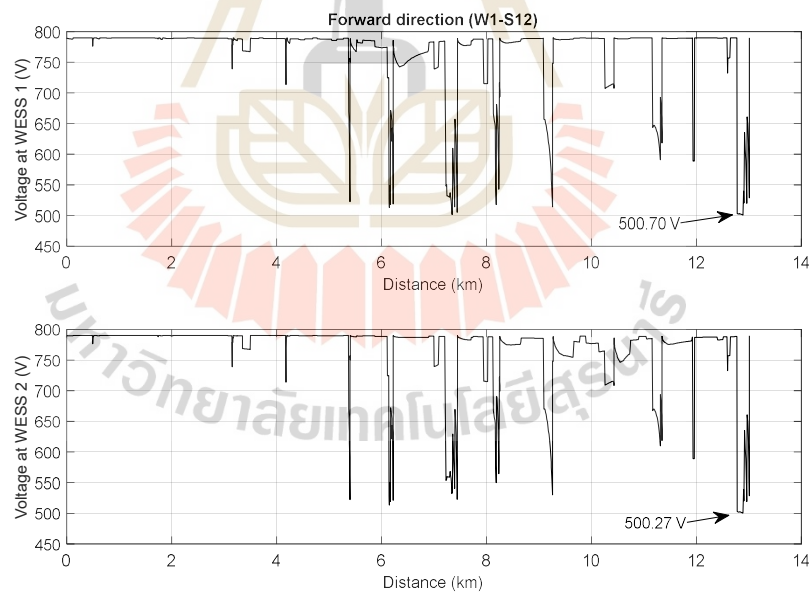
รูปที่ 5.8 แรงดันไฟฟ้าที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6 และ 10 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12



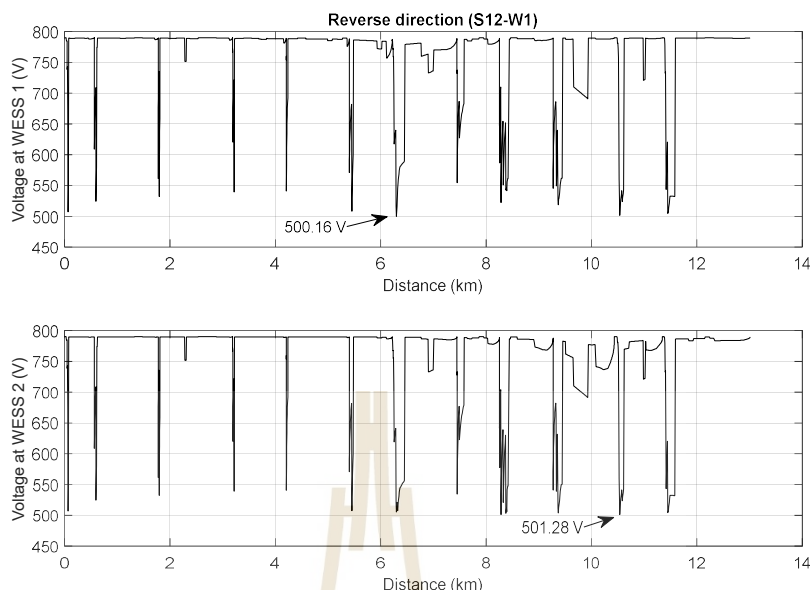
รูปที่ 5.9 แรงดันไฟฟ้าที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6 และ 10 km
เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1



รูปที่ 5.10 แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6 และ 10 km



รูปที่ 5.11 แรงดันไฟฟ้า โหนด WESSs ติดตั้งที่ 6 และ 10 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12

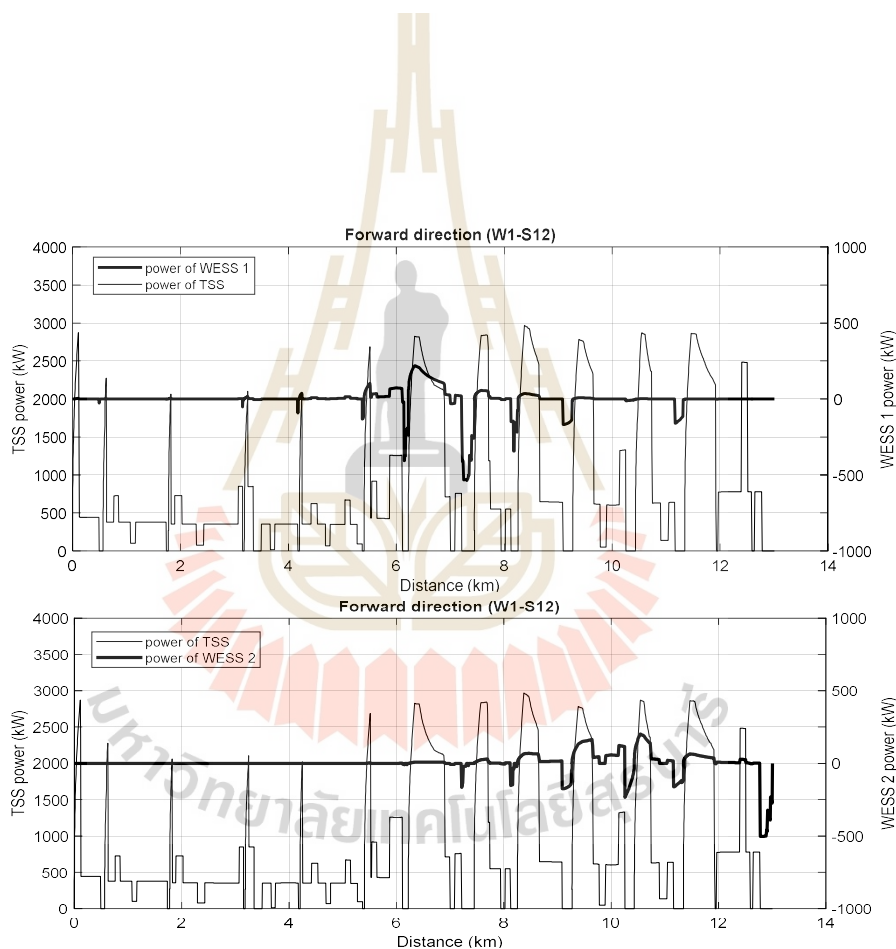


รูปที่ 5.12 แรงดันไฟฟ้าโนด WESSs ติดตั้งที่ 6 และ 10 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1

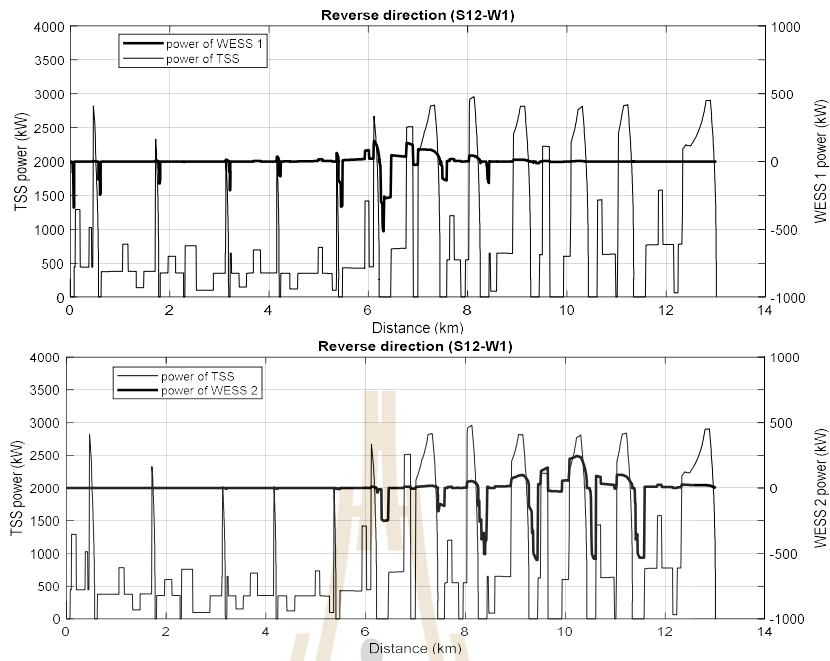
ช่วงแรกของการเคลื่อนที่ออกจากสถานี W1 ของรถไฟฟ้า ระบบเก็บสะสมพลังงานมีสถานะประจุเท่ากับ 100% และไม่สามารถรับพลังงานจากการเบรกได้ รถไฟฟ้าจ่ายพลังงานจากการเบรกผ่านความต้านทานการเบรก และไม่จ่ายพลังงานย้อนกลับเข้าสู่ระบบ ดังนั้นในช่วงแรกของการเคลื่อนที่ สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนไม่ถูกตัดออกจากระบบ ไฟฟ้าขับเคลื่อน ส่งผลให้แรงดันที่โนดรถไฟฟ้าและ โนดระบบเก็บสะสมพลังงานมีค่าเท่ากับแรงดันที่โนดสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน โดยแรงดันไฟฟ้าที่โนดรถไฟฟ้าและ โนดระบบเก็บสะสมพลังงานมีค่าต่ำเมื่อรถไฟฟ้าเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน และระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถรับกระแสไฟฟ้าจากการเบรกได้

กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมที่ทำงานตามพารามิเตอร์ควบคุมการทำงานที่กำหนด เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า กรณีเคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12 และเคลื่อนที่จาก S12 ไป W1 แสดงดังรูปที่ 5.13 - 5.14 ระบบเก็บสะสมพลังงานทำงานเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่โนดของระบบเก็บสะสมพลังงานเป็นไปตามเงื่อนไขควบคุมการทำงาน และระบบเก็บสะสมพลังงานจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากเมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ภายในรัศมี 3.5 km จากตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน ระบบเก็บสะสมพลังงานจ่ายกระแสสูงเมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ในระยะครึ่งหลังของเส้นทางทำให้บริการ เนื่องจากช่วงสถานีในครึ่งหลังรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ส่งผลให้มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 6 km จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 219.47 kW ในขณะที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจ่าย

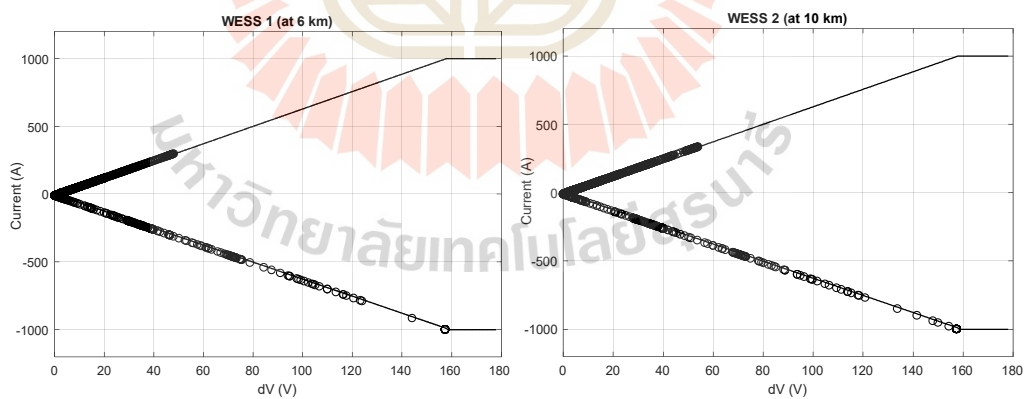
กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 2967.78 kW หรือระบบเก็บสะสมพลังงานจ่ายกำลังไฟฟ้าคิดเป็น 7.39 % ของกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในขณะนั้น ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 10 km สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 245.78 kW



รูปที่ 5.13 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งที่ 6 และ 10 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12



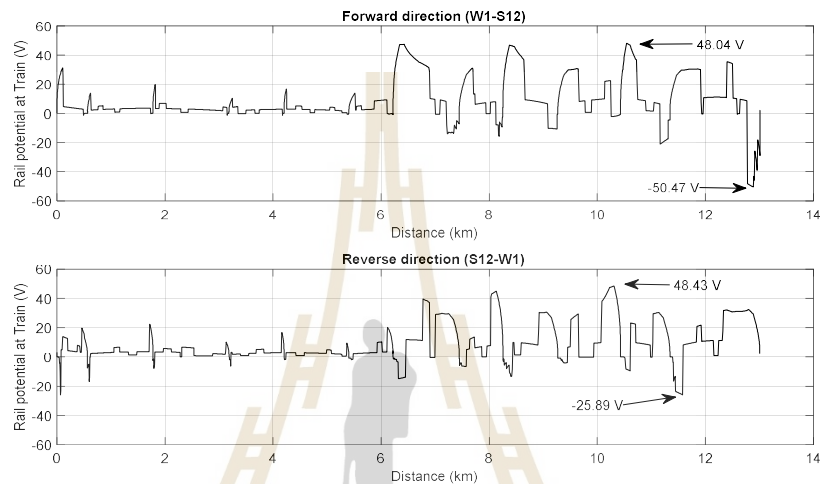
รูปที่ 5.14 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งที่ 6 และ 10 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1



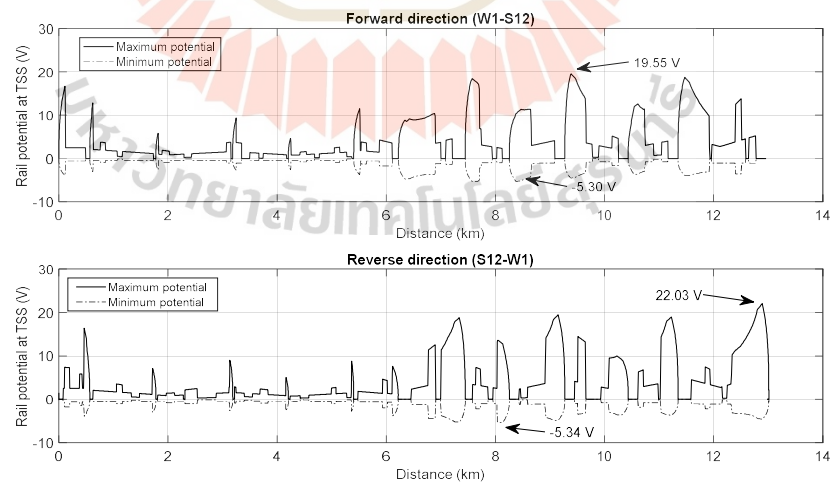
รูปที่ 5.15 ลักษณะการควบคุม Piece-wise linear และกระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานกรณี ติดตั้ง WESSs ที่ 6 km และ 10 km

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากรณีติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km กระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานตามการควบคุม Piece-wise linear SOC

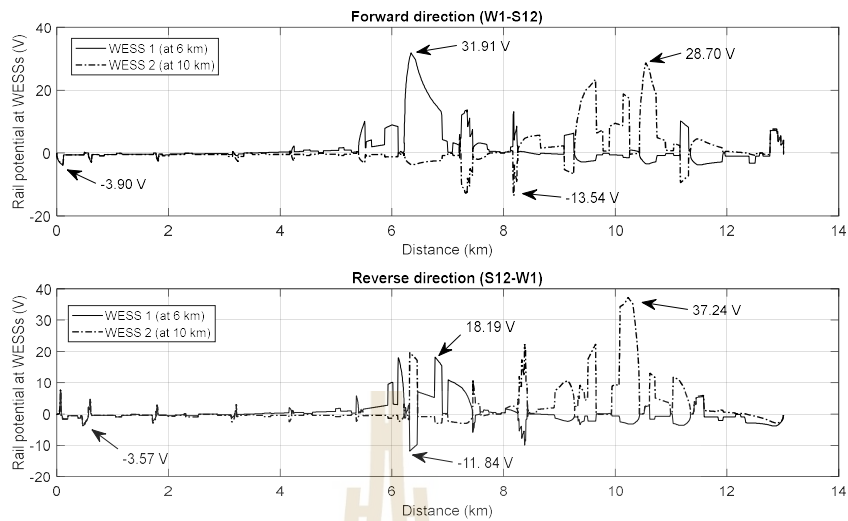
แสดงดังรูปที่ 5.15 ระบบเก็บสะสมพลังงานจ่ายกระแสไฟฟ้าออกสูงสุดเท่ากับ 295.63 A และ 333.69 A สำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km ตามลำดับ ระบบเก็บสะสมพลังงานทั้งสองตำแหน่งมีกระแสไฟฟ้ารับเข้าสูงสุดเท่ากับ 1000 A ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานจ่ายออกและรับเข้าเป็นไปตามคุณลักษณะความชันตามพารามิเตอร์การควบคุมการทำงานที่กำหนด



รูปที่ 5.16 แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งที่โนดรถไฟ ภาณี WESSs ติดตั้งที่ 6 km และ 10 km

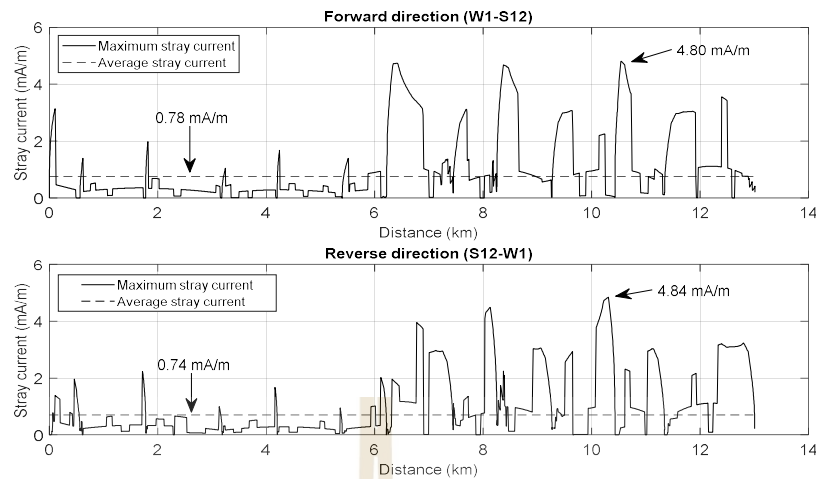


รูปที่ 5.17 แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งสูงสุดและต่ำสุดที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งรถไฟ ภาณีติดตั้ง WESSs ที่ 6 km และ 10 km



รูปที่ 5.18 แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งที่โนด WESSs กรณีติดตั้งที่ 6 km และ 10 km

แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งที่โนดรถไฟฟ้าลดการเคลื่อนที่กรณีติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 6 km และ 10 km มีค่าสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 48.43 V และ -50.47 V ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.16 แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและตำแหน่งระบบเก็บสะสมพลังงานแสดงดังรูปที่ 5.17 – 5.18 ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 22.03 V และ -5.34 V ตามลำดับ ที่ตำแหน่งระบบเก็บสะสมพลังงานมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งสูงเมื่อรถไฟเคลื่อนที่อยู่ใกล้ตำแหน่งระบบเก็บสะสมพลังงานใด ๆ ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 6 km มีแรงดันรางวิ่งต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ -11.84 V และ 31.91 V ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 10 km มีค่าแรงดันรางวิ่งสูงสุดเท่ากับ 37.24 V และมีค่าแรงดันรางวิ่งต่ำสุดเท่ากับ -13.54 V แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งโนดรถไฟ และแรงดันไฟฟ้ารางวิ่งในระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าไม่เกินข้อกำหนดมาตรฐาน กระแสไฟฟ้ารั่วไหลตลอดการเคลื่อนที่ของรถไฟมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.76 mA/m กรณีมีระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนมีกระแสไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ยค่าสูงกว่ากรณีไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงาน คิดเป็น 4.11% กระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดและกระแสไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ย เทียบกับตำแหน่งรถไฟฟ้ากรณีระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งที่ 6 km และ 10 km แสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 กระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดและการไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ย เทียบกับตำแหน่งรถไฟฟ้า
กรณีติดตั้ง WESSs ที่ 6 km และ 10 km

5.4 ตำแหน่งเหมาะสมที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางโดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

การหาตำแหน่งเหมาะสมที่สุด โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่นำเทคนิคการคำนวณที่ชาญฉลาด เช่น จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm: GA) หรือการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เป็นต้น เข้ามาเป็นเครื่องมือในการหาค่าเหมาะที่สุด งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคเป็นเครื่องมือในการหาตำแหน่งเหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวมีความซับซ้อนน้อย และการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคเป็นระบบที่มีการแบ่งปันข้อมูลร่วมกัน จึงทำให้มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าเหมาะสมที่สุดได้อย่างรวดเร็ว (ศรีแก้ว, 2552)

5.4.1 การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization)

การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค เป็นการคำนวณที่มีอัลกอริทึมที่ลอกเลียนธรรมชาติของสัตว์ที่มีพฤติกรรมอยู่เป็นฝูง คือ การเคลื่อนที่เป็นฝูง หรือการแยกตัวออกจากฝูงในบางครั้ง และสามารถกลับมารวมกลุ่มกันอีกครั้ง เช่น ฝูงนก เป็นต้น การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคเริ่มด้วยการสุ่มประชากรเริ่มต้น และหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยการปรับปรุงประชากรดังกล่าวในแต่ละรอบของการคำนวณ การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคประกอบด้วยอนุภาคย่อย แต่ละอนุภาคเป็นตัวแทนของคำตอบที่

ต้องการค้นหา อนุภาคดังกล่าวเคลื่อนที่ในปริภูมิค้นหา โดยตำแหน่งของแต่ละอนุภาคจะเปลี่ยนไปตามข้อมูลของสภาวะแวดล้อมที่เคลื่อนที่ผ่านมา ค่าตอบของกลุ่มอนุภาคจะเคลื่อนที่ไปตามอนุภาคที่มีค่าตอบใกล้เคียงค่าเหมาะที่สุด เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่จนเจอคำตอบที่ดีที่สุดแล้ว อนุภาคมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่รอบจุดนั้น ๆ (ศรีแก้ว, 2552) การเคลื่อนที่ของอนุภาคแสดงดังรูปที่ 5.20 อัลกอริทึมพื้นฐานของการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสรุปได้ดังต่อไปนี้

- (1) ทำการสุ่มตำแหน่งแต่ละอนุภาคในกลุ่มประชากร (\bar{p}_i) ที่มีมิติเท่ากับขนาดของตัวแปรที่ต้องการค้นหา และสุ่มความเร็วของแต่ละอนุภาค (\bar{v}_i) ดังนั้นความเร็วหรือเวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) จะมีขนาดเท่ากับขนาดของตำแหน่ง ตำแหน่งของอนุภาคจะเปลี่ยนไปตามผลรวมของเวกเตอร์ตำแหน่งและเวกเตอร์ความเร็วดังสมการที่ (5.13)

$$\bar{p}_i(t) = \bar{p}_i(t-1) + \bar{v}_i(t) \quad (5.13)$$

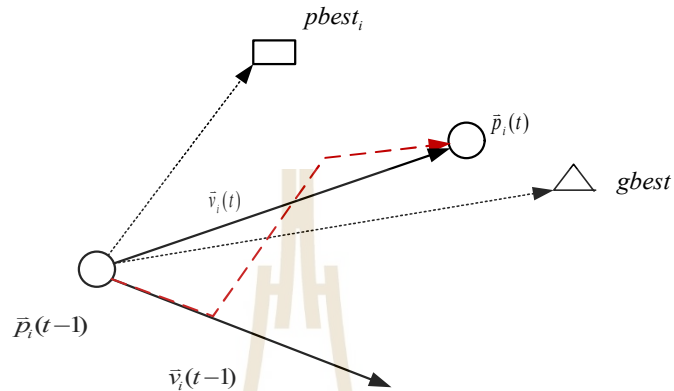
- (2) ประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละอนุภาค อนุภาคที่เหมาะสมที่สุดจะถูกบันทึกเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคไว้ เช่น
 - กรณีที่ความเหมาะสมของอนุภาคใด ๆ มีค่าดีกว่า (มีค่าน้อยกว่า) ความเหมาะสมดีที่สุดของกลุ่มอนุภาคที่บันทึกไว้ก่อนหน้านี้ จะบันทึกตำแหน่งและค่าความเหมาะสมของอนุภาคดังกล่าวเป็นค่าความเหมาะสมดีที่สุดแบบวงกว้าง (global best fitness: $gbest$)
 - กรณีที่ความเหมาะสมของอนุภาคใด ๆ มีค่าดีกว่าความเหมาะสมดีที่สุดของอนุภาคนั้น ๆ จะบันทึกตำแหน่งและค่าความเหมาะสมดีที่สุดของอนุภาค (personal best fitness: $pbest_i$)
- (3) ทำการปรับค่าความเร็วของอนุภาคดังสมการที่ (5.14) โดยที่ ρ_p และ ρ_g เป็นตัวแปรสุ่ม $\bar{p}_{gbest,j}$ คือ ค่าความเหมาะสมดีที่สุดแบบวงกว้าง และ $\bar{p}_{pbest,i}$ คือ ค่าความเหมาะสมดีที่สุดของอนุภาค

$$\bar{v}_i(t) = \bar{v}_i(t-1) + \rho_p [\bar{p}_{pbest,i} - \bar{p}_i(t)] \dots + \rho_g [\bar{p}_{gbest} - \bar{p}_i(t)] \quad (5.14)$$

- (4) ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคใด ๆ ดังสมการที่ (5.15)

$$\bar{p}_i(t) = \bar{p}_i(t-1) + \bar{v}_i(t) \quad (5.15)$$

- (5) ทำการปรับค่าตัวแปรเวลา $t = t + 1$
- (6) วนรอบการคำนวณซ้ำทั้งหมดจนกระทั่งผู้เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในกลุ่ม หรือเป็นไปตามเงื่อนไขหยุดที่ยอมรับได้



รูปที่ 5.20 แผนภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคใน PSO

5.4.2 ตำแหน่งเหมาะสมที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด ด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

การหาตำแหน่งเหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งที่ส่งผลให้ระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานได้เพื่อลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียให้น้อยที่สุด การหาตำแหน่งเหมาะสมที่สุดโดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (5.16) และมีเงื่อนไขบังคับดังสมการที่ (5.17) – (5.22)

$$\text{Minimize } E = \sum_{n=1}^N \int_0^T v_{sub,n}(t) i_{sub,n}(t) dt + E_{waste} \quad (5.16)$$

โดยที่ $v_{sub,n}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ n
 $i_{sub,n}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ n
 N คือ จำนวนสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน
 E_{waste} คือ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรก ดังสมการที่ 5.2

เงื่อนไขบังคับ

$$V_{sub} \leq V_{noload} \quad (5.17)$$

$$U_{min2} \leq V_T \leq U_{max2} \quad (5.18)$$

$$U_{min2} \leq V_{ess} \leq U_{max2} \quad (5.19)$$

$$I_{char,max} \leq I_{ess} \leq I_{disc,max} \quad (5.20)$$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (5.21)$$

$$|SOC_{initial} - SOC_{end}| \leq 1 \quad (5.22)$$

โดยที่	V_{noload}	คือ แรงดันไฟฟ้าไร้โหลด
	V_T	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ โนครถไฟฟ้า
	V_{ess}	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ โนครระบบเก็บสะสมพลังงาน
	I_{ess}	คือ กระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงาน
	SOC	คือ สถานะประจุของระบบเก็บสะสมพลังงาน
	U_{min2} และ U_{max2}	คือ แรงดันไฟฟ้าไม่ถาวรต่ำสุดและสูงสุดตามมาตรฐาน EN 50163
	SOC_{min} และ SOC_{max}	คือ สถานะประจุต่ำสุดและสูงสุดของระบบเก็บสะสมพลังงาน
	$SOC_{initial}$ และ SOC_{end}	คือ สถานะประจุเริ่มต้นและสุดท้ายของ WESS
	$I_{char,max}$ และ $I_{disc,max}$	คือ กระแสไฟฟ้ารับเข้าและจ่ายออกสูงสุดของระบบเก็บสะสมพลังงาน

พิจารณาสถานะประจุสุดท้ายของตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีค่าใกล้เคียงค่าสถานะประจุเริ่มต้นเมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งสถานีผู้โดยสารต้นทางอีกครั้งเป็นเงื่อนไขบังคับ เป็นการทำให้อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานพร้อมสำหรับการทำงาน หรือสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าช่วยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้เสมอเมื่อรถไฟฟ้าเริ่มเคลื่อนที่ออกจากสถานีผู้โดยสารต้นทาง ใช้ระเบียบวิธีการปรับโทษค่าตอบที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ (Penalty method) โดยการ

คูณด้วยค่าพารามิเตอร์ที่มีค่ามาก ๆ เพื่อปรับให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าสูง เมื่อตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานดังกล่าวมีค่าสถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสุดท้ายไม่เท่ากับสถานะประจุเริ่มต้น และตำแหน่งดังกล่าวจะไม่ถูกนำมาเป็นคำตอบ เนื่องจากกระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดจะพิจารณาจุดที่มีคำตอบค่าต่ำ ๆ (กุลวรวานิชพงษ์, 2550)

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี PSO

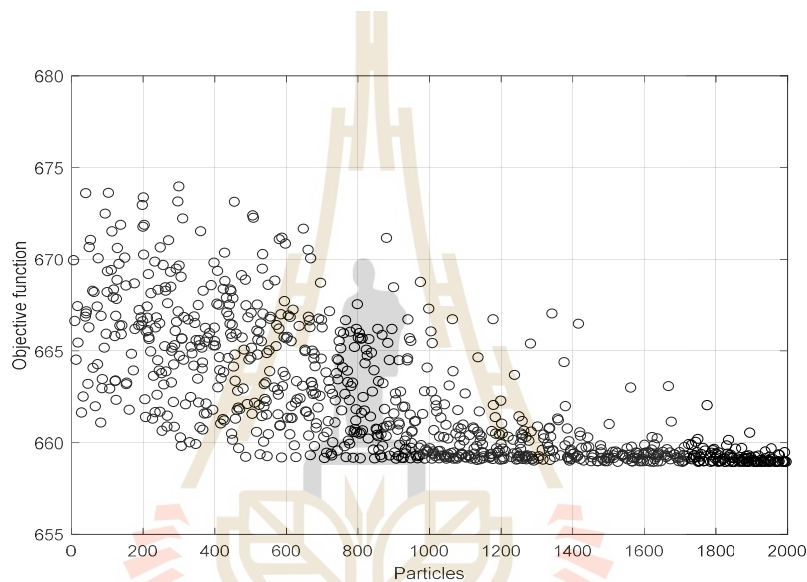
Number of particles in the swarm.	SwarmSize	20
Number of variables in problem.	nvars	2
Vector or array of lower bounds.	lb	0
Vector or array of upper bounds.	ub	13000
Maximum number of iterations	MaxIterations	100

ตารางที่ 5.6 ผลการหาค่าตำแหน่งเหมาะที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด ด้วยวิธี PSO

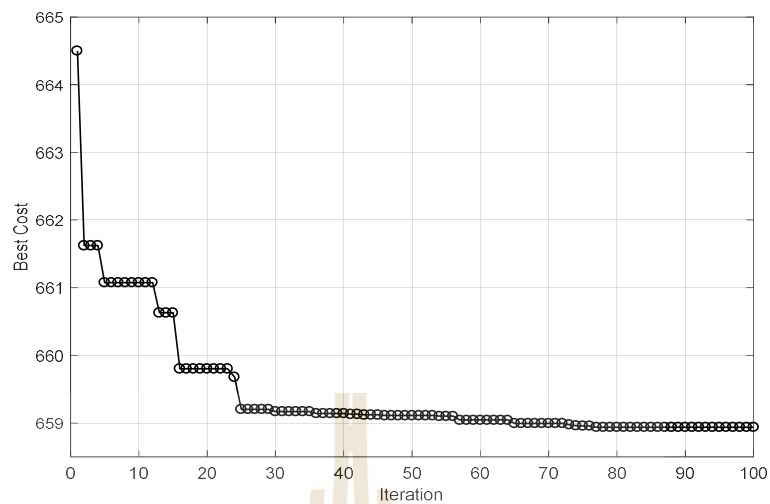
Repeat	Positions (m)		Objective value	E_{cons} (kWh)	E_{waste} (kWh)	Time (min)
	WESS 1	WESS 2				
1	10529	6719	659.31	556.06	103.25	4.45
2	6814	10503	659.00	555.90	103.06	4.48
3	6818	10494	658.97	555.90	103.06	4.49
4	10491	6774	659.25	556.04	103.21	4.56
5	6817	10496	658.97	555.91	103.07	5.00
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D)			0.17			

พารามิเตอร์การหาค่าตำแหน่งเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของอนุภาคแสดงดังตารางที่ 5.5 ตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ตำแหน่ง (nvars = 2) จำนวนของฝูงอนุภาคเท่ากับ 20 (SwarmSize = 20) และตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางอยู่ภายในระยะทาง 0 km ถึง 13 km ของเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดชุดที่ 1 และชุดที่ 2 เท่ากับ 3.53 kWh และ 5.06 kWh ตามลำดับ กำหนดสถานะประจุเริ่มต้น ($SOC_{initial}$) ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเท่ากับ 100% กำหนดจำนวนรอบในการคำนวณสูงสุดในแต่ละครั้งเท่ากับ 100 รอบ ข้อมูลของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ Intel(R) Core(TM) i7-7700 CPU @ 3.60GHz, 32.0 GB of RAM and 64-bit Operating System ผลการหาค่าฟังก์ชันดีที่สูงสุด 5 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 5.6 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำสุด 2 ครั้ง ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งเป็นผลรวมของการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการเบรกมี

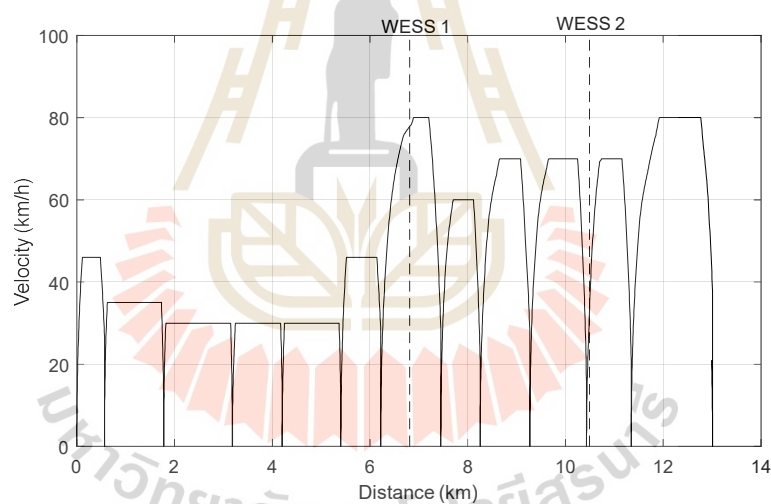
ค่าต่ำสุดเท่ากับ 658.97 kWh ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีการกระจายตัวของข้อมูล หรือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เท่ากับ 0.17 โดยตำแหน่งเหมาะสมที่สุดทั้ง 2 ครั้งมีตำแหน่งใกล้เคียงกัน ให้ตำแหน่งเหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง คือ ที่ตำแหน่ง 6818 m และ 10494 m จากสถานี W1 สำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ตามลำดับ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอนุภาคและค่าความเหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างจากผลการหาค่าตำแหน่งเหมาะสมที่สุดครั้งที่ 3 แสดงในรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 ตามลำดับ ตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์อยู่ในช่วง 673.94 – 658.97 kWh



รูปที่ 5.21 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอนุภาคจากการหาค่าตำแหน่งเหมาะสมที่สุดครั้งที่ 3



รูปที่ 5.22 ค่าความเหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างจากการหาดำเนินงานที่เหมาะสมที่สุดครั้งที่ 3



รูปที่ 5.23 ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าและตำแหน่งติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km

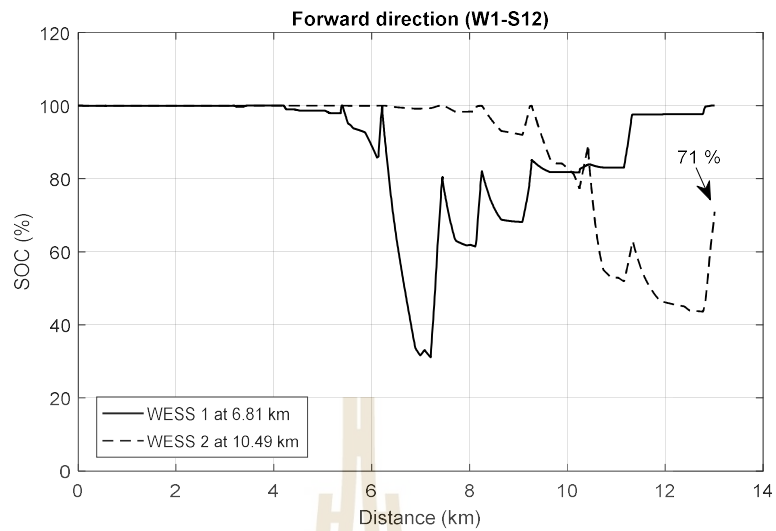
จำลองติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางติดตั้งที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km เปรียบเทียบผลการจำลองกรณีไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงาน และกรณีมีระบบเก็บสะสมพลังงาน การใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนใด ๆ (E_{sub}) การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรวม (E_{cons}) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานตัวนำไฟฟ้า ($E_{loss,line}$) และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการเบรก (E_{waste}) แสดงดังตารางที่ 5.7 การใช้

พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนลดลง 50.76 kWh คิดเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเท่ากับ 8.37% การใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงสูงสุด 9.72% หรือประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 8.51 kWh พลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกลดลง 33.37% ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าและตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานจากการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO แสดงดังรูปที่ 5.23

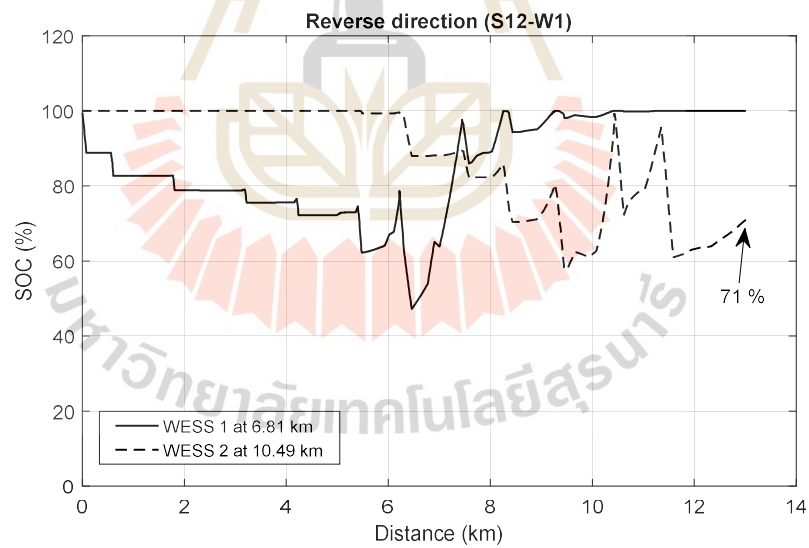
ตารางที่ 5.7 การใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย กรณีติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km

Case	E_{sub} (kWh)							E_{cons} (kWh)	$E_{loss,line}$ (kWh)	E_{waste} (kWh)
	TSS1	TSS2	TSS3	TSS4	TSS5	TSS6	TSS7			
without WESSs	83.32	84.31	89.69	100.69	99.98	87.56	61.10	606.66	14.64	154.68
with WESSs	78.44	77.51	81.79	91.07	90.59	79.05	57.46	555.90	13.78	103.06
% Reduction	5.86	8.07	8.81	9.55	9.40	9.72	5.96	8.37	5.88	33.37

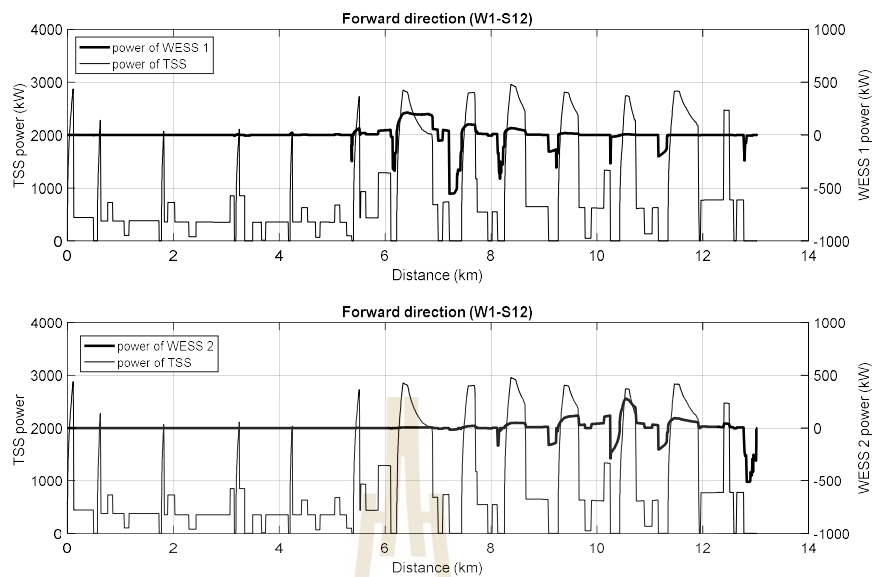
สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า กรณีรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12 และเคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1 แสดงดังรูปที่ 5.24 – 5.25 กำหนดสถานะประจุเริ่มต้นของตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้ง 2 ชุด มีค่าเท่ากับ 100% ที่สถานีต้นทาง W1 เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ถึงสถานี S12 ระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 1 และ 2 มีสถานะประจุเท่ากับ 100% และ 71% ตามลำดับ รถไฟฟ้าเคลื่อนที่กลับที่สถานี W1 สถานะประจุสุดท้ายของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีค่าเท่ากับ 100% ซึ่งมากเท่ากับค่าเริ่มต้น



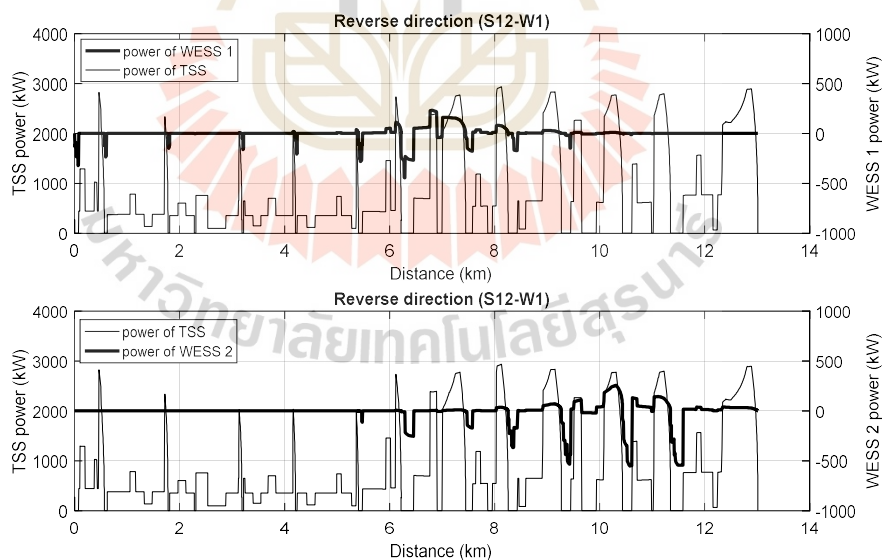
รูปที่ 5.24 สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า
กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km เคลื่อนที่จาก
สถานี W1 ไป S1



รูปที่ 5.25 สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า
กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km เคลื่อนที่จาก
สถานี S12 ไป W1

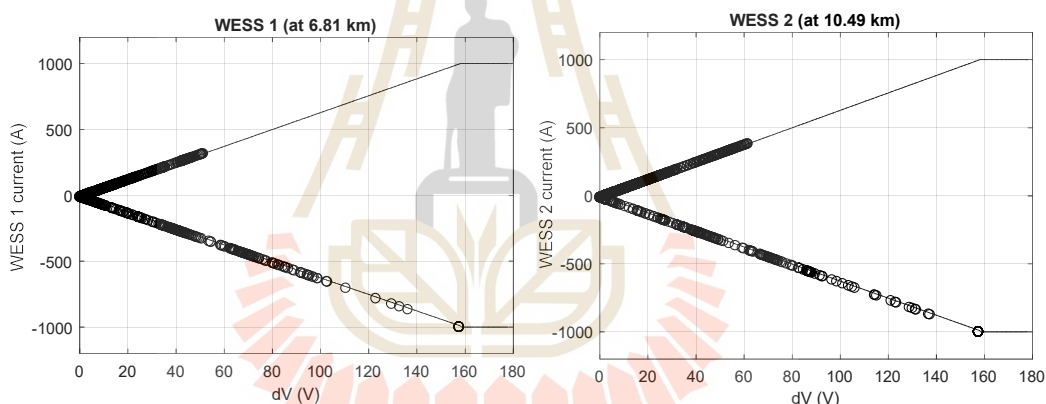


รูปที่ 5.26 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงาน ติดตั้งที่ 6.81 km และ 10.49 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12



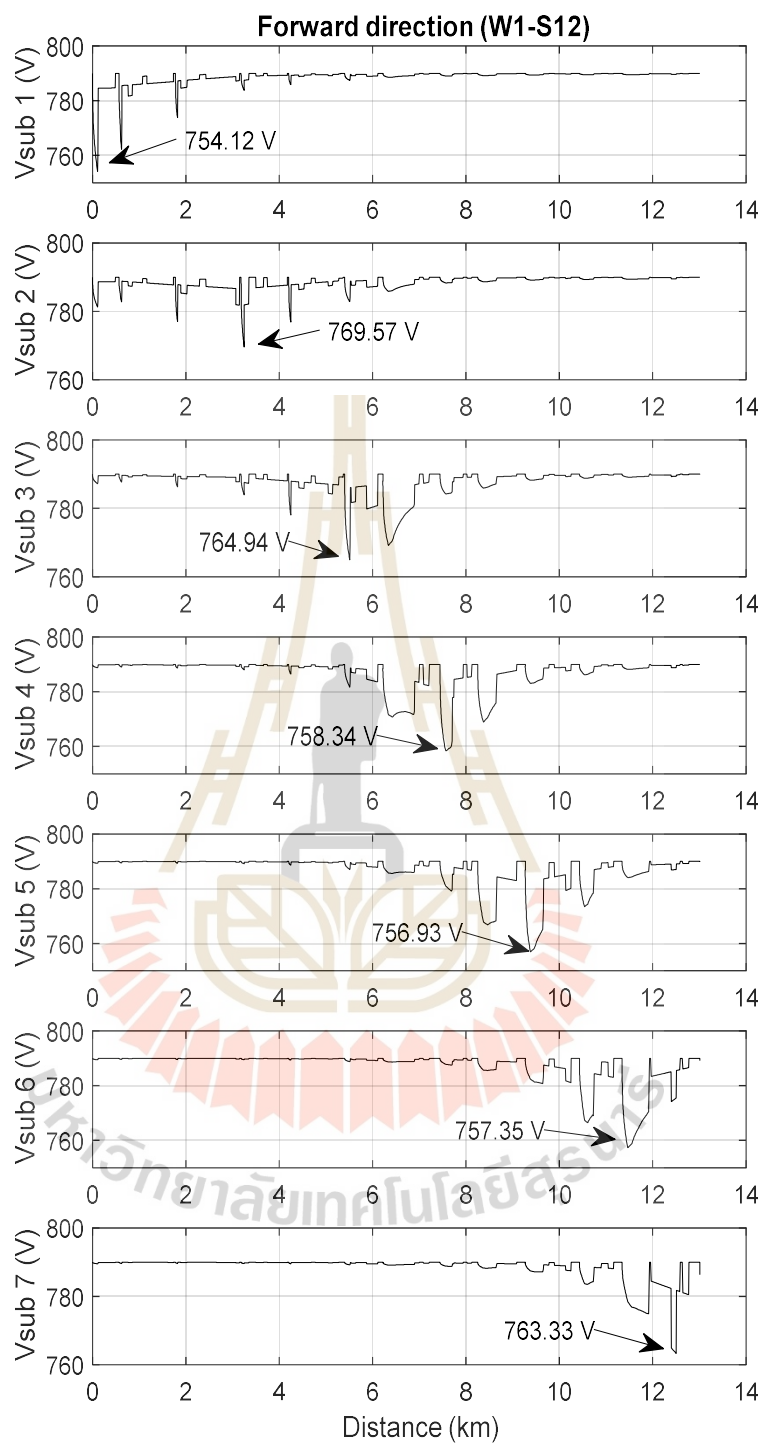
รูปที่ 5.27 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงาน ติดตั้งที่ 6.81 km และ 10.49 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1

กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานเมื่อติดตั้งที่ 6.81 km และ 10.49 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า กรณีรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12 และเคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1 แสดงดังรูปที่ 5.26 – 5.27 ระบบเก็บสะสมพลังงานจ่ายกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก และรับกำลังไฟฟ้าจากการเบรกมีค่าเป็นลบ ที่ตำแหน่ง 6.81 km ระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 1 จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 233.14 kW และรับกำลังไฟฟ้าจากการเบรกสูงสุดเท่ากับ 554.85 kW ระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 2 ที่ตำแหน่ง 10.49 km จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 277.03 kW และรับกำลังไฟฟ้าจากการเบรกสูงสุดเท่ากับ 554.24 kW กระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานตามพารามิเตอร์ควบคุมการทำงาน Piece-wise linear SOC ที่กำหนดแสดงในรูปที่ 5.28 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกสูงสุดของระบบเก็บสะสมพลังงานเท่ากับ 379.89 A เกิดขึ้นที่ระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 2 ติดตั้งที่ตำแหน่ง 10.49 km และกระแสไฟฟ้ารับเข้าของระบบเก็บสะสมพลังงานสูงสุดเท่ากับ 1000 A

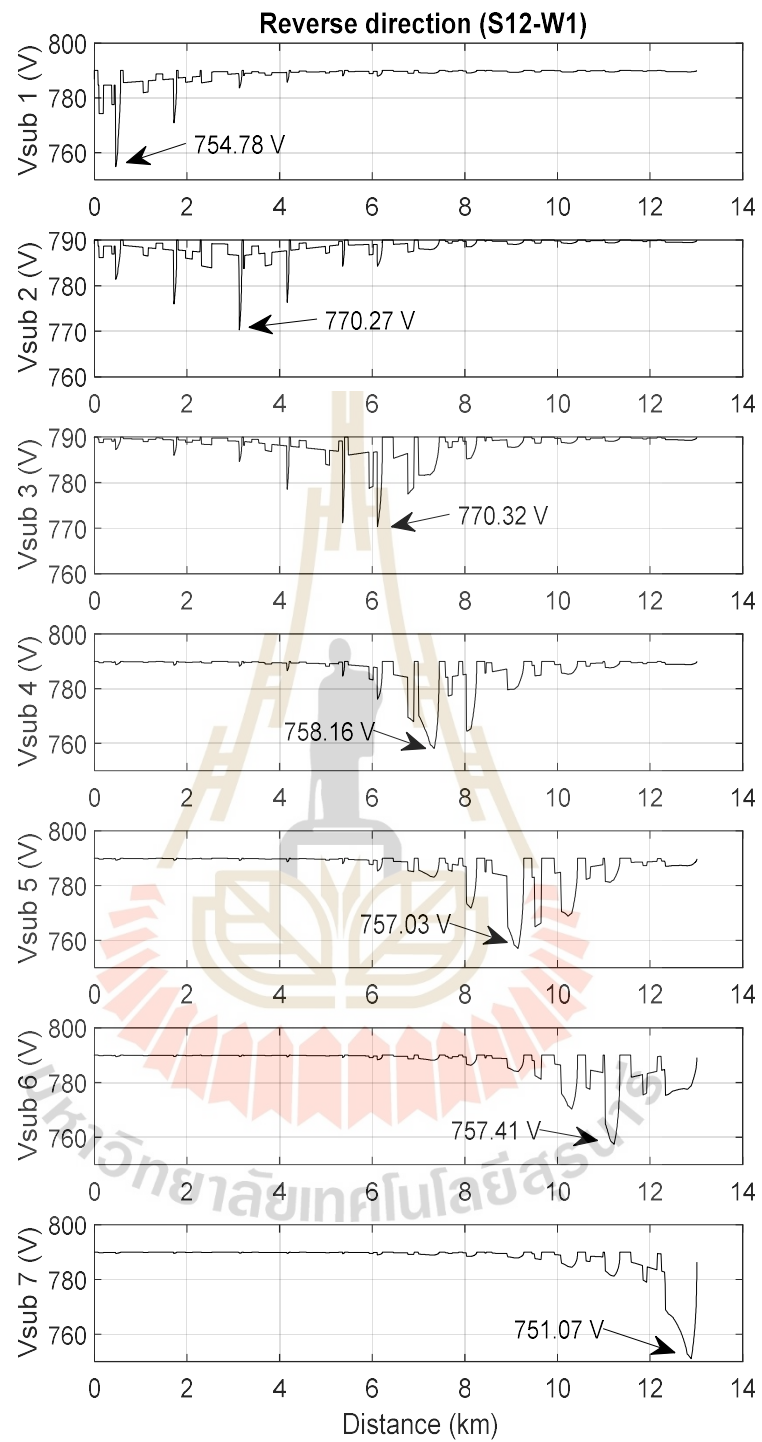


รูปที่ 5.28 ลักษณะการควบคุม Piece-wise linear และกระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงาน กรณีติดตั้ง WESSs ที่ 6.81 km และ 10.49 km

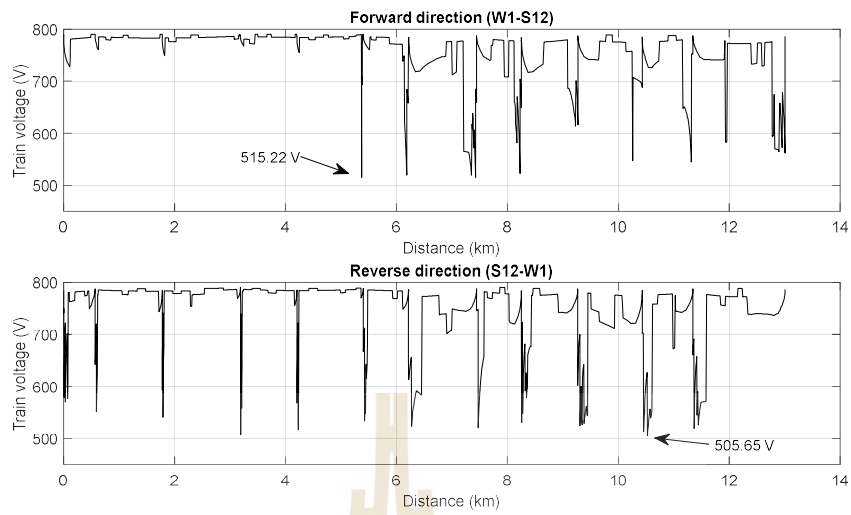
แรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.29 และ 5.30 กรณีติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12 และเคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1 ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าตกสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 7 มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 751.07 V สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 4 สามารถชดเชยแรงดันไฟฟ้าตกได้สูงสุดเท่ากับ 1.31 V เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงาน



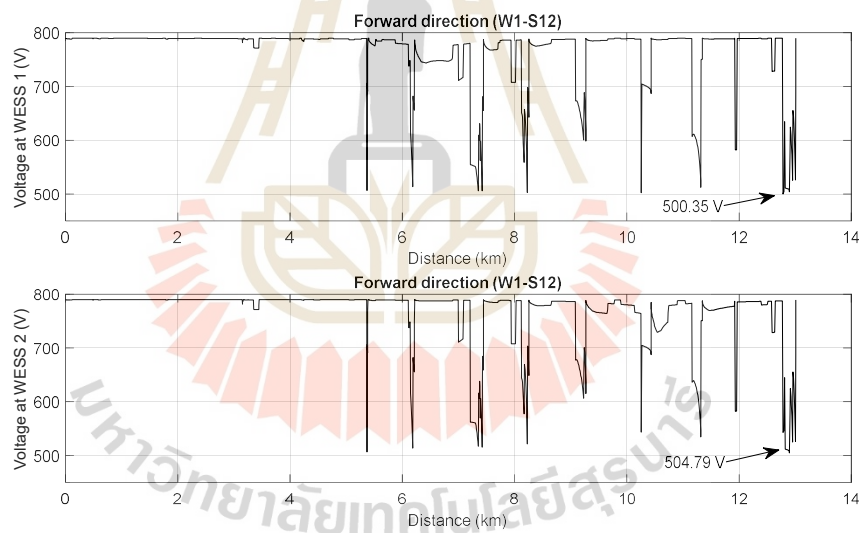
รูปที่ 5.29 แรงดันไฟฟ้าที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12



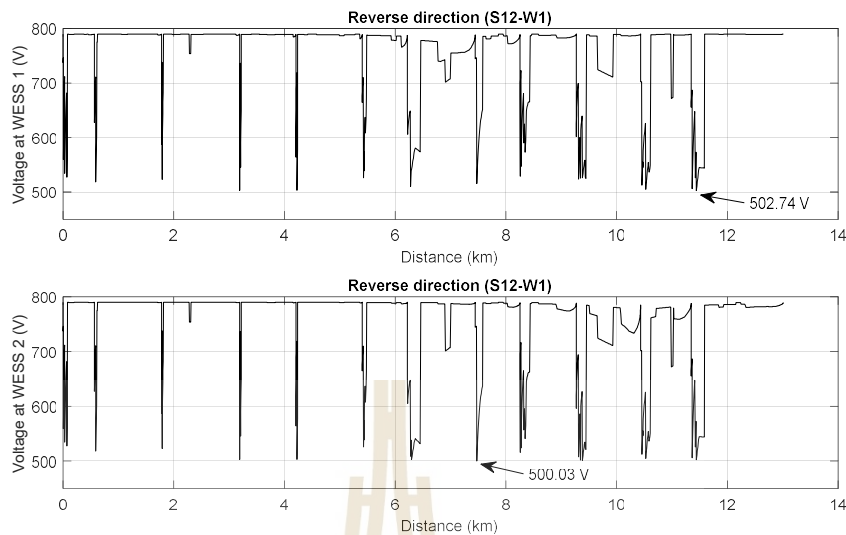
รูปที่ 5.30 แรงดันไฟฟ้าที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่รถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1



รูปที่ 5.31 แรงดันไฟฟ้าที่โนครดไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ 6.81 km และ 10.49 km

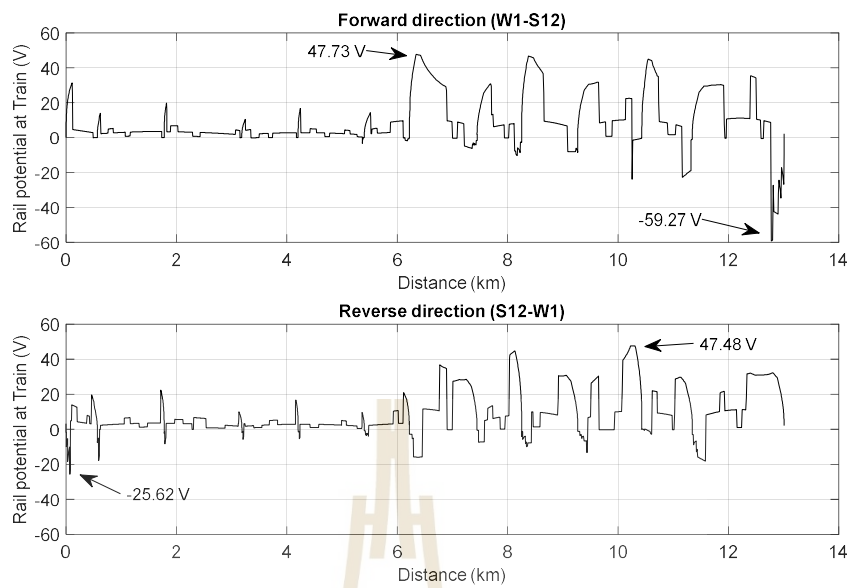


รูปที่ 5.32 แรงดันไฟฟ้าโนค WESSs ติดตั้งที่ 6.81 km และ 10.49 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่
รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12

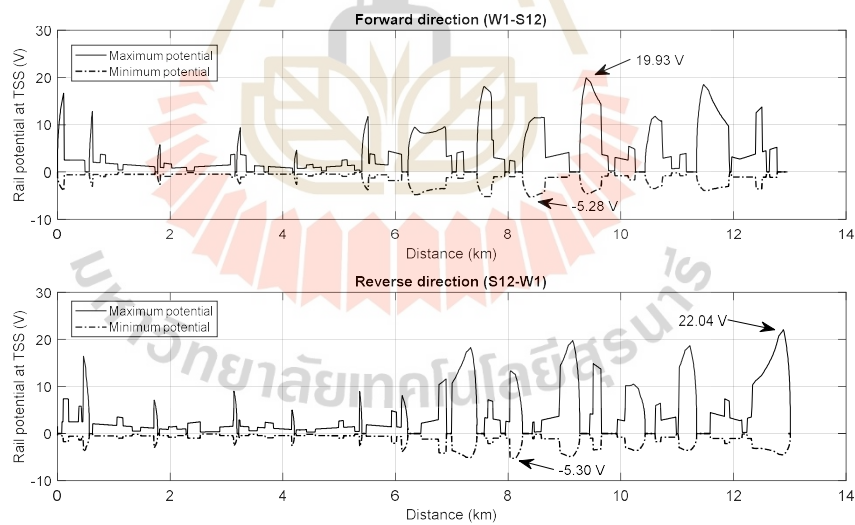


รูปที่ 5.33 แรงดันไฟฟ้าโนด WESSs ติดตั้งที่ 6.81 km และ 10.49 km เทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า เคลื่อนที่จากสถานี S12 ไป W1

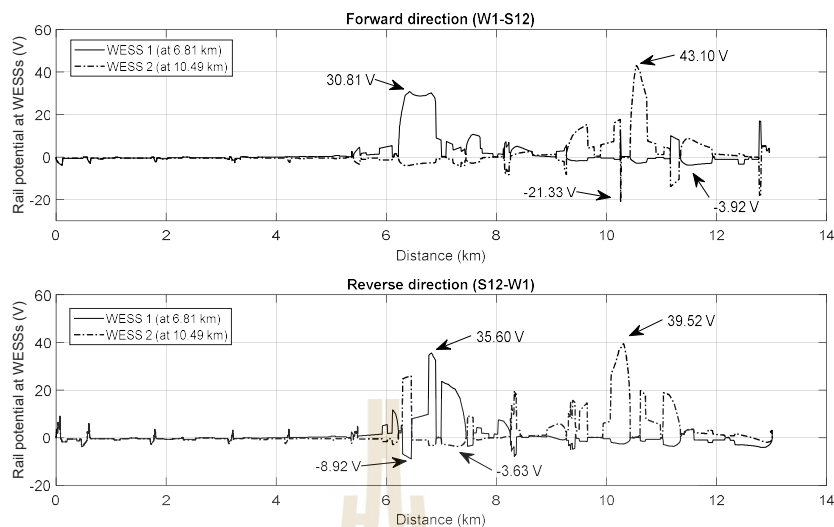
แรงดันไฟฟ้าที่โนดรถไฟฟ้ามหานครติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km แสดงดังรูปที่ 5.31 แรงดันไฟฟ้าที่โนดรถไฟฟ้ามหานครไฟฟ้าต่ำเมื่อรถไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าขณะที่ทำงานในโหมดเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 505.65 V รูปที่ 5.32 - 5.33 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่โนดระบบเก็บสะสมพลังงานเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่โนดระบบเก็บสะสมพลังงานต่ำเมื่อรับกระแสไฟฟ้าจากรถไฟฟ้าเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 500.03 V แรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งที่ตำแหน่งรถไฟฟ้าตลอดการเคลื่อนที่กรณีติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km แสดงดังรูปที่ 5.34 แรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งโนดรถไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ -49.27 V และ 47.48 V ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.35 มีแรงดันไฟฟ้าที่แรงวิ่งสูงสุดเท่ากับ 22.04 V และแรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งต่ำสุดเท่ากับ -5.30 V ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 6.81 km มีแรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ -8.92 V และ 35.60 V ตามลำดับ ระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง 10.81 km มีแรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ -21.33 V และ 43.10 V ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งที่โนดระบบเก็บสะสมพลังงานเทียบกับตำแหน่งเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.36 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าแรงวิ่งในระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนไม่เกินข้อกำหนดตามมาตรฐาน



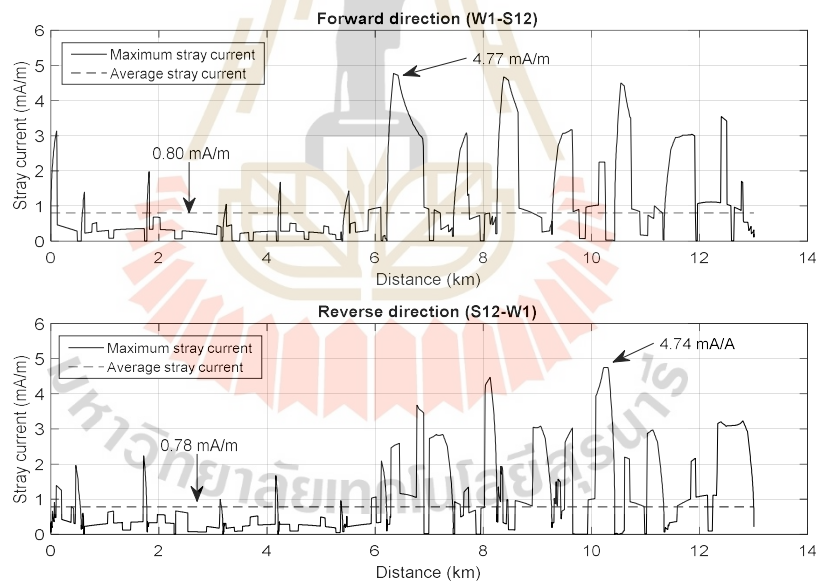
รูปที่ 5.34 แรงดันไฟฟ้ารบกวนที่โนดรถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km



รูปที่ 5.35 แรงดันไฟฟ้ารบกวนสูงสุดและต่ำสุดที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งรถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km



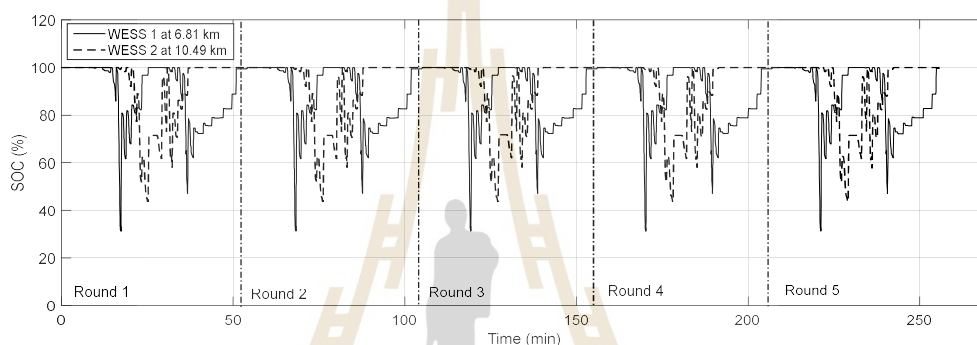
รูปที่ 5.36 แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งที่ โหนด WESSs กรณีติดตั้งที่ 6.81 km และ 10.49 km



รูปที่ 5.37 กระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดและการไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ย เทียบกับตำแหน่งรถไฟฟ้า กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km

กระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดและกระแสไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ย เทียบกับตำแหน่งรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.37 กระแสไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ยตลอดการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.79 mA/m กรณีระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km กระแสไฟฟ้ารั่วไหลเฉลี่ย

มากกว่ากรณีไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงาน คิดเป็น 8.22 % ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวนเคลื่อนที่ 5 รอบการทำงาน กรณีระบบเก็บสะสมพลังงานขนาดความจุ 3.53 kWh และ 5.06 kWh ติดตั้งที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km ตามลำดับ กำหนดสถานะประจุเริ่มต้นเท่ากับ 100 % ผลการจำลองเมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่กลับมาที่สถานีผู้โดยสารต้นทาง สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 100% ดังแสดงในรูปที่ 5.38 ระบบเก็บสะสมพลังงานทำงานในรูปแบบเดิมซ้ำ ๆ เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ออกจากสถานี W1 โดยระบบเก็บสะสมพลังงานพร้อมสำหรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าในทุกรอบการทำงาน



รูปที่ 5.38 สถานะประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ 5 รอบการทำงาน กรณีติดตั้ง WESSs ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km

5.5 สรุป

ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ในบทนี้เป็นการจำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางเพื่อทราบถึงพฤติกรรมการทำงานและประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่งที่พิจารณา จากผลการจำลองกรณีศึกษา รถไฟฟ้าสายสีลมหนึ่งขบวน ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางจากการหาตำแหน่งติดตั้งต่างกัน 2 วิธี ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วงกิโลเมตรที่ 6 ถึงกิโลเมตรที่ 11 จากสถานีผู้โดยสารต้นทางของเส้นทางเคลื่อนที่รถไฟฟ้า โดยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางอยู่ในช่วงที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งแบบริมทางที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ศึกษาการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดด้วยการสร้างแบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง กรณีศึกษา รถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ 6 รอบพระชนมพรรษา สาย 2 หรือ รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม พิจารณาขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ติดตั้งตำแหน่งใด ๆ โดยให้พลังงานไฟฟ้างดงกล่าวเป็น 75% ของพลังงานสะสมสูงสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด พิจารณาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่สามารถช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุด และลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานได้มากที่สุด จำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวนด้วยการคำนวณโดยโปรแกรม MATLAB

งานวิจัยนี้ได้นำความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีการศึกษามาแล้วในอดีตจากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมมาเป็นแนวทางในการศึกษาและนำมาประยุกต์เพื่อสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า เป็นแนวทางสำหรับการพิจารณาดำเนินการติดตั้งและขนาดความจุที่เหมาะสมที่สุดของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการดำเนินงาน จำลองผลเพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกรณีไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงานและกรณีมีระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางในระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน ในบทที่ 4 อธิบายการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวนในรูปแบบ โครงข่ายไฟฟ้าเพื่อการประยุกต์ใช้แบบจำลองสำหรับระบบรถไฟฟ้าหลายขบวนในอนาคต บทที่ 5 เป็นการศึกษาเพื่อหาขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีความเหมาะสมและหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีต่างกัน 2 วิธี คือ การหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดจากการจำลองติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ตำแหน่งใด ๆ โดยเปลี่ยนการติดตั้งทุก ๆ 1 km และวิธีการใช้เทคนิคการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่พิจารณาผลของสถานะประจุสุดท้ายของตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีความใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นเป็นเงื่อนไขบังคับ พิจารณาระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางทั้งหมด 2 ชุด สำหรับรถไฟฟ้าที่ให้บริการทั้งหมด 13 สถานีผู้โดยสาร ระยะทางเคลื่อนที่ 13 km ระหว่างสถานีต้นทางถึงสถานีปลายทาง การจำลองผลพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบ

ริมทางจะอยู่ในตำแหน่งที่รถไฟฟ้ามีความเร็วสูง เนื่องจากรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูง ส่งผลให้เกิดการใช้กำลังไฟฟ้าสูงเช่นเดียวกัน ดังนั้นหากติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่งดังกล่าว ระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้มาก และเมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง พลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานสูงเช่นเดียวกัน ระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถเก็บสะสมพลังงานที่เกิดขึ้นได้มากกว่าระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่งความเร็วรถไฟฟ้าต่ำ

การหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่กล่าวมาแล้วนั้น พิจารณาให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีสถานะประจุสุดท้ายใกล้เคียงกับค่าสถานีประจุเริ่มต้นเมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งสถานีต้นทางเป็นเงื่อนไขบังคับกรณีใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของอนุภาค เพื่อให้ระบบเก็บสะสมพลังงานมีพลังงานไฟฟ้าสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อรถไฟฟ้าให้บริการในครั้งถัดไป และลดการประจุพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบเก็บสะสมพลังงานจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ผลการจำลองพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางอยู่ที่ตำแหน่ง 6.81 km และ 10.49 km ด้วยขนาดความจุตัวเก็บประจุยิ่งยวดเท่ากับ 3.53 kWh และ 5.06 kWh ตามลำดับ การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนลดลง 8.37% พลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกลดลง 33.37% เมื่อเทียบกับกรณีจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่ไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบไฟฟ้า

6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเพียงหนึ่งขบวน ซึ่งในความเป็นจริงนั้น การให้บริการของรถไฟฟ้าแต่ละเส้นทางมีการให้บริการรถไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งขบวน ดังนั้น การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าให้เหมือนกับระบบจริงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวน และการศึกษาการหาตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางในวิทยานิพนธ์เล่มนี้กำหนดพารามิเตอร์การควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานเพียง 1 รูปแบบ ซึ่งพารามิเตอร์ควบคุมการทำงานที่เหมาะสมที่สุดอาจส่งผลให้เกิดการจ่ายกำลังไฟฟ้า และการเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานที่สามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า และช่วยลดพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น

รายการอ้างอิง

- ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์. (2560). กลยุทธ์การตัดค่ายอดสำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.
- ธนัดชัย กุลวรรณิพงษ์. (2550). เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธนัดชัย กุลวรรณิพงษ์. (2561). ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้า. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธวัช ชูจิต. (2561). การศึกษาและการประเมินกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน กระแสตรง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว (2552). ปัญญาเชิงคำนวณ. กรุงเทพมหานคร: จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์.
- Barrero, R., Tackoen, X., & Mierlo, J. V. (2008). Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network. **2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference.**
- Brunet, Y. (2010). **Energy Storage.** London, UK: ISTE Ltd.
- Calderaro, V., Galdi, V., Graber, G., & Piccolo, A. (2013). Siting and sizing of stationary SuperCapacitors in a Metro Network. **AEIT Annual Conference 2013.**
- Castaigns, A., Caron, H., Kharrat, H., Ovalle, A., & Vulturescu, B. (2018). Energy Storage System based on Supercapacitors for a 750 V DC railway power supply. **2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC).** Nottingham, UK: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Ciccarelli, F. (2014). Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems.

- Ciccarelli, F., Iannuzzi, D., & Spina, I. (2013). Comparison of energy management control strategy based on wayside ESS for LRV application. **IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. Vienna, Austria: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Ciccarelli, F., Iannuzzi, D., & Tricoli, P. (2011). Speed-based supercapacitor state of charge tracker for light railway vehicles. **Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications**. Birmingham, UK: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Dubey, G. K. (2005). **Fundamentals of Electrical Drives**. Kanpur: Alpha Science International Ltd.
- Dutta, O., Khodaparastan, M., & Mohamed, A. (2018). Wayside Energy Storage System for Peak Demand Reduction in Electric Rail Systems. **2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)**.
- Elliott, N., Styles, S., & Kumaran, P. (2018). ABB NZ 10 years' experience with ultracapacitors in UPS. **2018 IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES)** (pp. 250-255). Hamilton, New Zealand: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- EN 50122-2. (2010). **Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit -- Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems**. London: UK.
- Finlayson, A., Goodman, C. J., & White, R. D. (2006). Investigation into the computational techniques of power system modelling for a DC railway. **WIT Transaction on The Built Environment**.
- Hayashiya, H. (2017). Recent Trend of Regenerative Energy Utilization in Traction Power Supply System in Japan. **Urban Rail Transit**, 183-191.
- Hayashiya, H., Suzuki, T., Hino, M., Hara, D., Tojo, M., Shimada, S., . . . Takahashi, H. (2015). Effect evaluation of Li-ion battery for regenerative energy utilization in traction power supply system. **2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)**. Geneva, Switzerland: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

- Huggins, R. A. (2010). **Energy Storage**. London: Springer.
- Jia, Z., Yang, Z., Lin, F., & Fang, X. (2014). Dynamic simulation of the DC traction power system considering energy storage devices. **2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)**. Beijing, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- 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**.
- Khodaparastan, M., Mohamed, A. A., & Brandauer, W. (2019). Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, 2831-2847.
- Killer, A., Armstorfer, A., Díez, A. E., & Biechl, H. (2012). Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems. **2012 IEEE Colombian Intelligent Transportation Systems Symposium (CITSS)**. Bogota, Colombia: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied Energy**, 511-536.
- Maher, B. (2005). Ultracapacitors: The Battery-less, High Reliability Back-up Solution. **INTELEC 05 - Twenty-Seventh International Telecommunications Conference** (pp. 321-326). Berlin, Germany: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Nishimura, K., Ogura, K., Matsumura, T., Tonda, C., Yoshiyama, E., Andriani, M., . . . Gianfrancesco, N. (2011). Test Results of a High Capacity Wayside Energy Storage System Using Ni-MH Batteries for DC Electric Railway at New York City Transit. **2011 IEEE Green Technologies Conference (IEEE-Green)**. Baton Rouge, LA, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Okui, A., Hase, S., Shigeeda, H., Konishi, T., & Yoshi, T. (2010). Application of energy storage system for railway transportation in Japan. **The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA** (pp. 3117-3123). Sapporo, Japan: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

- Radcliffe, P., Wallace, J. S., & Shu, L. H. (2010). Stationary applications of energy storage technologies for transit systems. **2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference**. Halifax, NS, Canada: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Ratniyomchai, T. (2016). **Optimal Design and Control of Stationary Electrochemical Double-Layer Capacitors for Light Railways**. Ph.D. Dissertation, University of Birmingham.
- Ratniyomchai, T., Hillmansen, S., & Tricoli, P. (2013). Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. **IET Electrical Systems in Transportation**, 9-20.
- Ratniyomchai, T., Hillmansen, S., & Tricoli, P. (2015). Energy loss minimisation by optimal design of stationary supercapacitors for light railways. **2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)**.
- Robyns, B. (2015). **Energy storage in electric power grids**. London: ISTE ;Hoboken, NJ : Wiley.
- Rufer, A. (2010). Energy storage for railway systems, energy recovery and vehicle autonomy in Europe. **The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -**. Sapporo, Japan: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- SIEMENS. (2012). Power Supply System Engineering Design Input Data for DC Study Submission Number: STAS/X04-PSY/D/104A.
- Sirmelis, U., Zakis, J., & Grigans, L. (2015). Optimal supercapacitor energy storage system sizing for traction substations. **2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)**.
- Turner, A. B. (1984). A Study of Wayside Energy Storage Systems (WESS) for Railway Electrification. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 484-492.
- Yang, Z., Xia, H., Wang, B., & Lin, F. (2014). An overview on braking energy regeneration technologies in Chinese urban railway transportation. **2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)** (pp. 2133-2139). Hiroshima, Japan: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Yongqing, W., Xiaofeng, Z., Fei, Y., & Peng, Z. (2017). Study on charge and discharge control strategy of supercapacitor in photovoltaic system. **The Journal of Engineering**, 1251 - 1253.



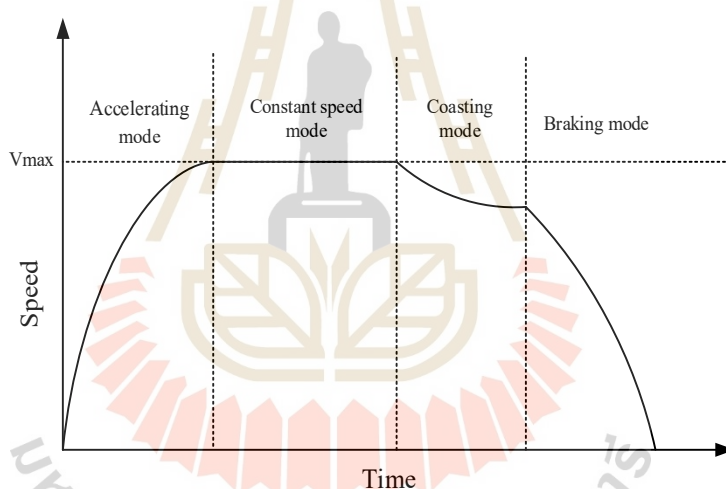
ภาคผนวก ก

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย

การเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย คือ การให้รถไฟฟ้ามีความเร็วลดลงเนื่องจากแรงด้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าก่อนทำงานในโหมดเบรกเพื่อเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร และแรงฉุดของรถไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ($F_T = 0$) ความเร่งมีค่าเป็นลบเนื่องจากแรงด้านการเคลื่อนที่ดังสมการที่ (ก.1) การเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยของรถไฟฟ้าเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยแบ่งโหมดการเคลื่อนที่ออกเป็นทั้งหมด 4 โหมด คือ เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง (accelerating mode) เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (constant speed mode) เคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย (coasting mode) และการเบรก (braking mode) ดังแสดงในรูปที่ ก.1 รายละเอียดการคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน แสดงในบทที่ 4



รูปที่ ก.1 โหมดการทำงานของรถไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย

$$a = -\frac{F_R}{M_{eff}} \quad (\text{ก.1})$$

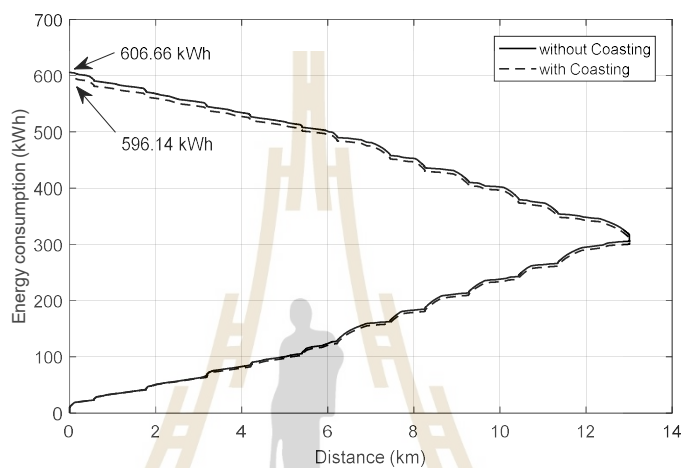
โดยที่ a คือ ความเร่ง (m/s^2)
 F_R คือ แรงต้านทานการเคลื่อนที่ (N)
 M_{eff} คือ มวลประสิทธิภาพ (kg)

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้า การทำงานโหมคเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยของรถไฟไฟฟ้า ในเล่มนี้ พิจารณาระยะทางเริ่มทำงานในโหมคเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยจาก 20% ของระยะห่างระหว่างสถานีผู้โดยสารก่อนหน้าและสถานีผู้โดยสารถัดไป โดยไม่คำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้า เพื่อศึกษาการลดลงของการใช้พลังงานของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเมื่อรถไฟไฟฟ้ามีการทำงานในโหมคเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย พารามิเตอร์ของรถไฟไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีศึกษาสายสีลมแสดงดังหัวข้อที่ 4.4 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้าหนึ่งขบวนที่มีและไม่มีการทำงานที่ด้วยความเฉื่อย พลังงานไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้า (E_{train}) การใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรวม (E_{cons}) การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแต่ละสถานี (E_{sub}) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานตัวนำไฟฟ้า ($E_{loss,line}$) พลังงานสูญเสียเนื่องจากการเบรก (E_{waste}) และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวม (E_{loss}) แสดงดังตารางที่ ก.1

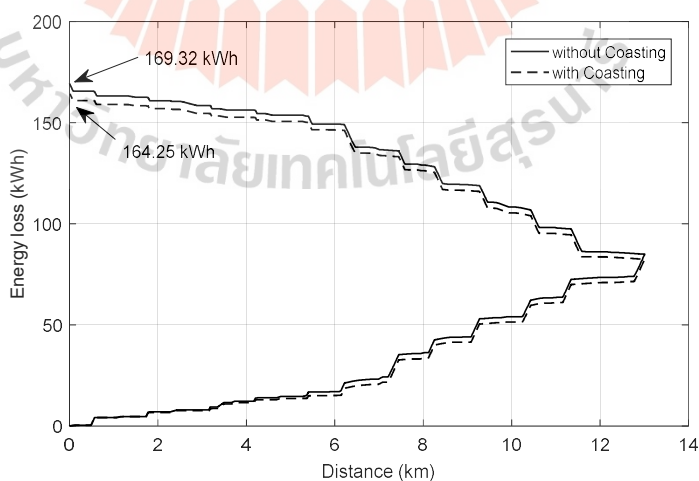
ตารางที่ ก.1 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้า กรณีมีและไม่มีการทำงานในโหมคเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย

		without Coasting	with Coasting	%Reduction
E_{train} (kWh)		592.02	581.63	1.76
E_{cons} (kWh)		606.66	596.14	1.74
E_{sub} (kWh)	TSS 1	83.32	80.63	3.23
	TSS 2	84.31	81.32	3.55
	TSS 3	89.69	87.99	1.90
	TSS 4	100.69	99.81	0.88
	TSS 5	99.98	99.17	0.81
	TSS 6	87.56	86.76	0.92
	TSS 7	61.10	60.46	1.05
$E_{loss,line}$ (kWh)		14.64	14.51	0.92
E_{waste} (kWh)		154.68	149.75	3.19
E_{loss} (kWh)		169.32	164.25	2.99

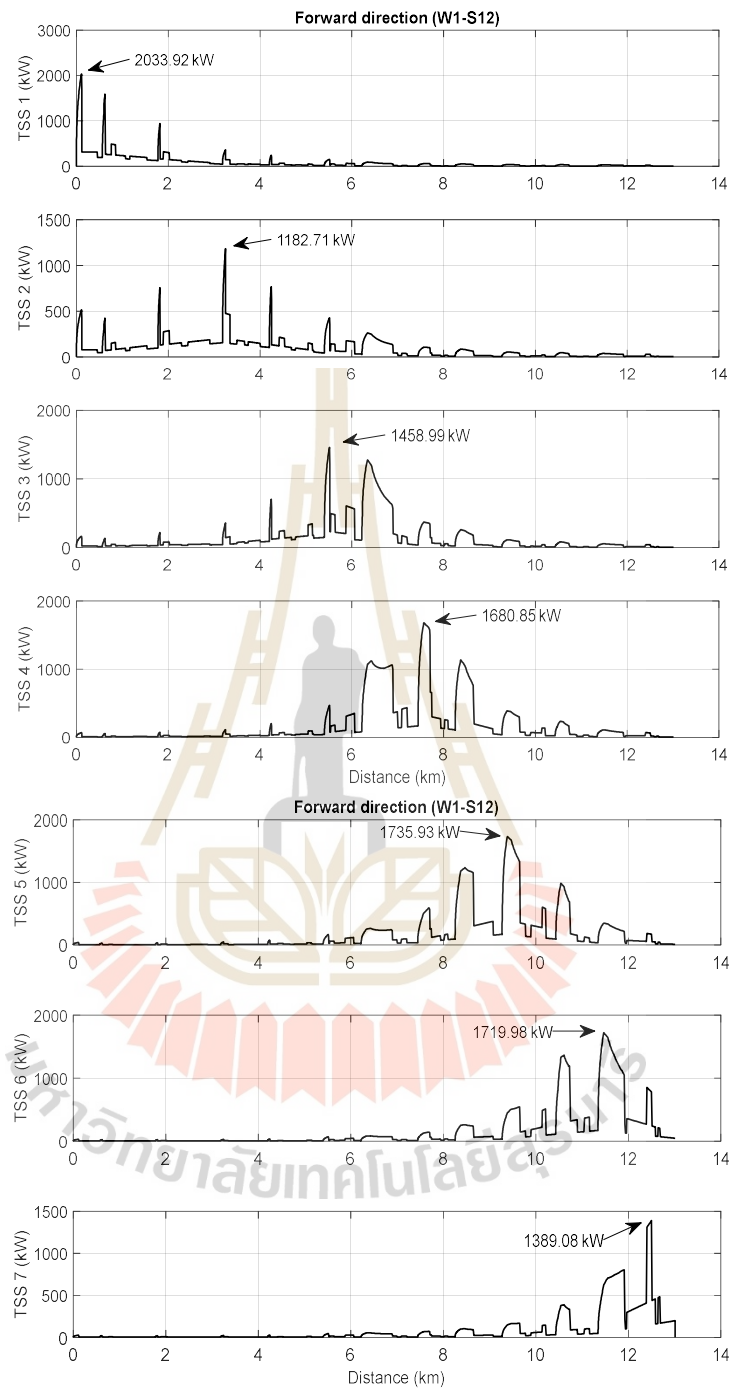
การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย เทียบกับ ตำแหน่งเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ ก.2 และ ก.3 การใช้พลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนของ รถไฟฟ้าเท่ากับ 596.14 kWh เมื่อเคลื่อนที่กลับมาที่สถานีต้นทาง การใช้พลังงานลดลง 1.74% เมื่อ เทียบกับกรณี ไม่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมเท่ากับ 164.25 kWh พลังงานไฟฟ้าสูญเสียลดลง 2.99%



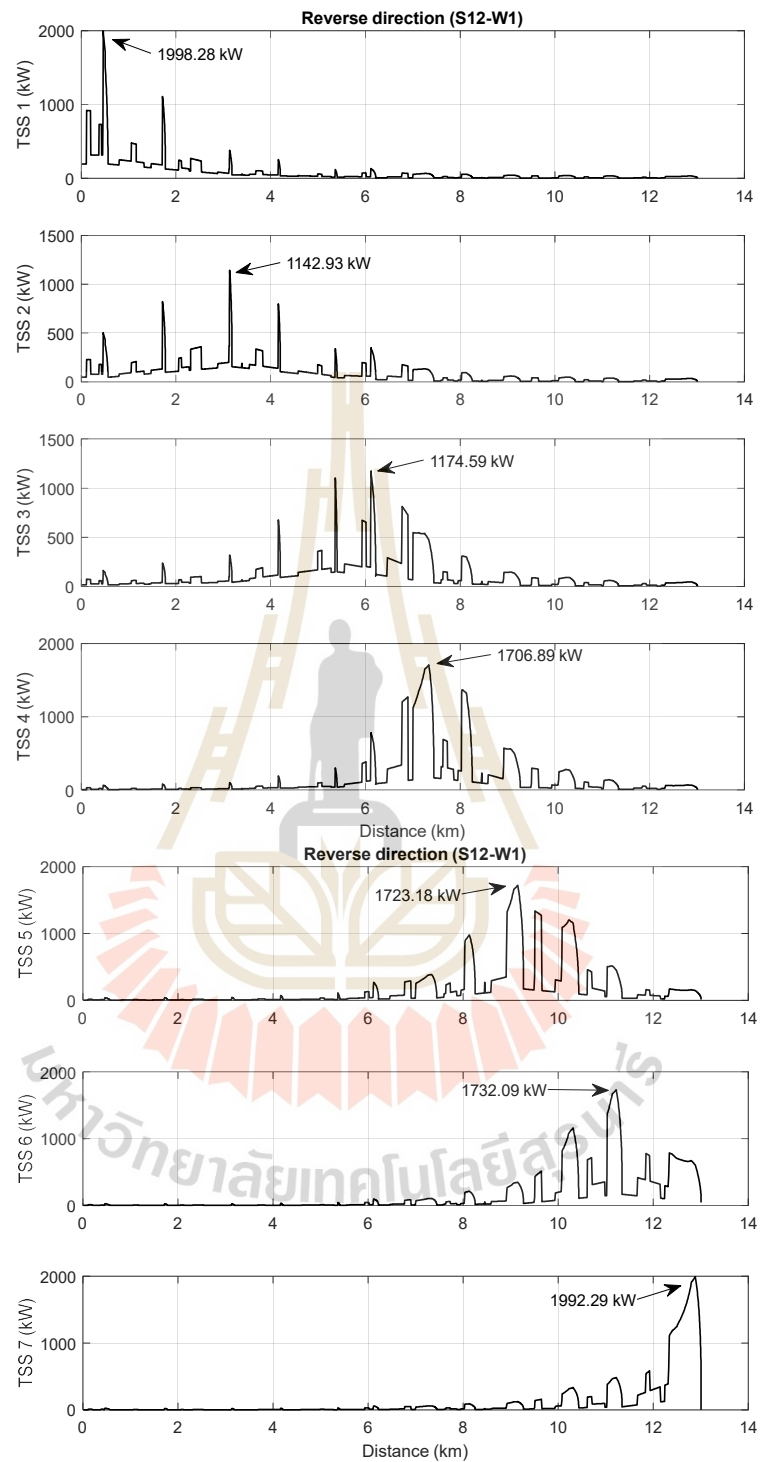
รูปที่ ก.2 การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีมีและ ไม่มีการเคลื่อนที่ ด้วยความเฉื่อย



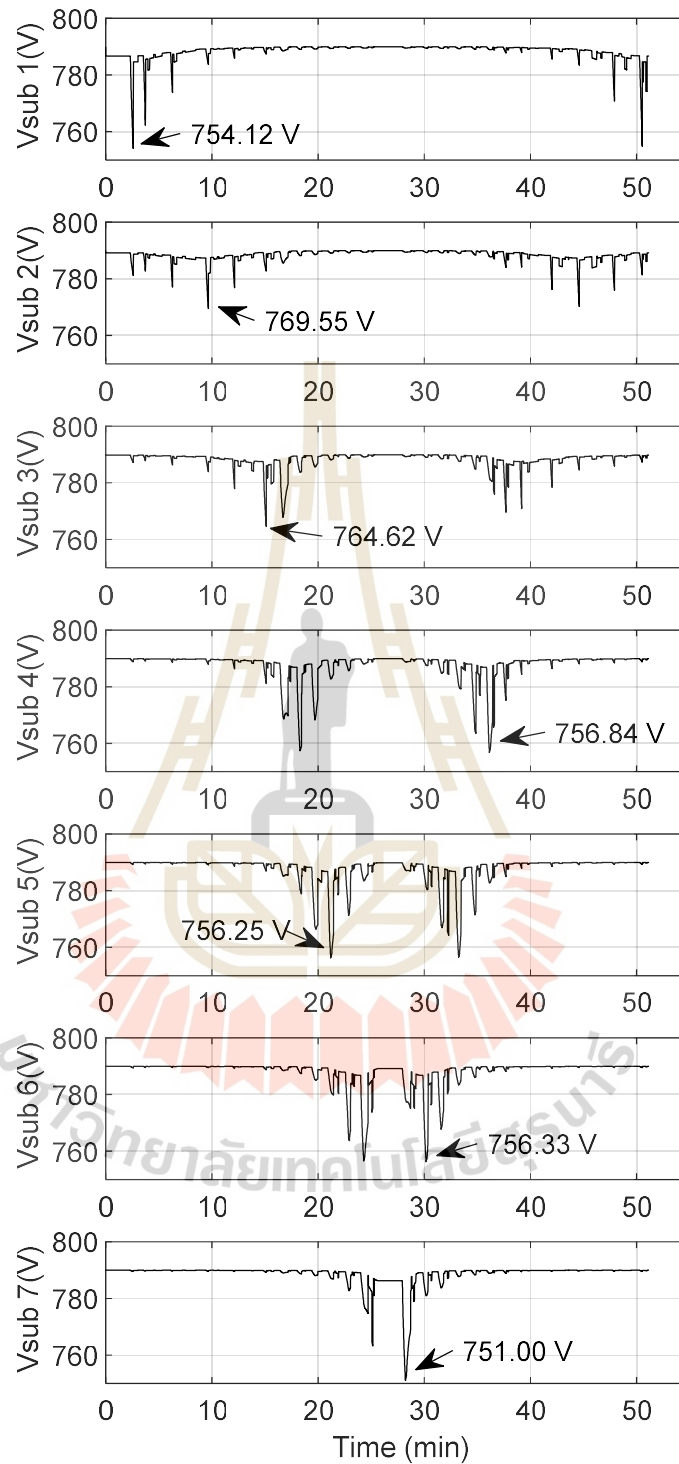
รูปที่ ก.3 พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวม กรณีมีและ ไม่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย



รูปที่ ก.4 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกรณีมีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย
รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จาก W1-S12



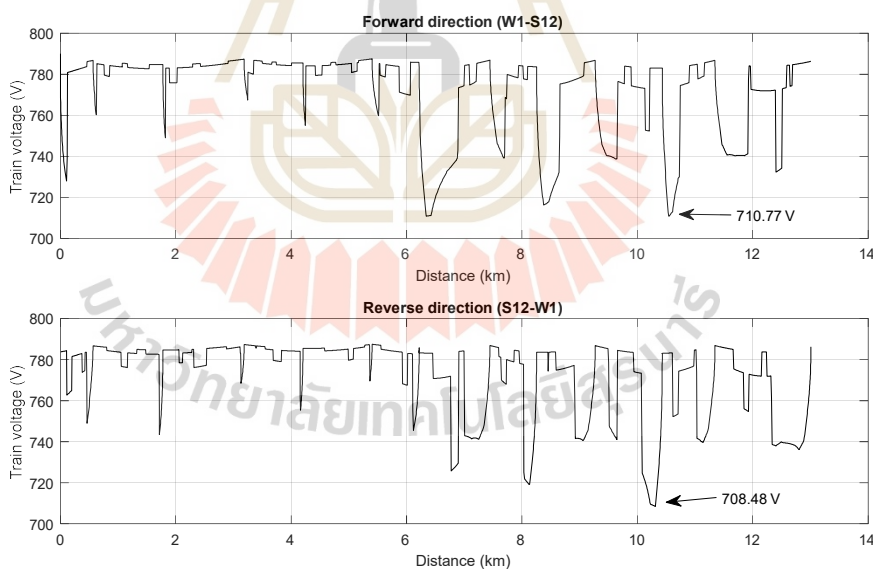
รูปที่ ก.5 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกรณีมีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย
รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จาก S12-W1



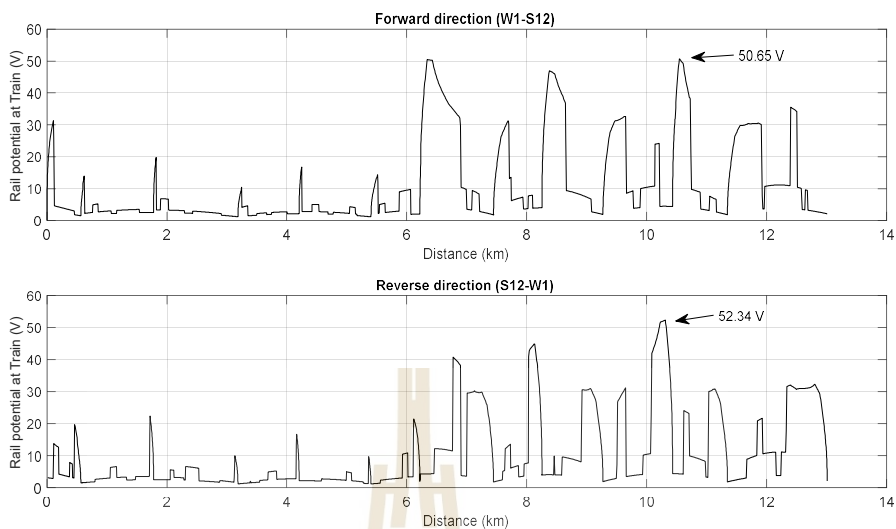
รูปที่ ก.6 แรงดันไฟฟ้าที่โนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีมีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย

กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกรณีมีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานี W1 ไป S12 และเคลื่อนที่จาก S12 ไป W1 แสดงดังรูปที่ ก.4 และ ก.5 ตามลำดับ สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 1 จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 2033.92 kW เกิดขึ้นเมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสภาวะหยุดนิ่งเพื่อเคลื่อนที่ออกจากสถานี W1 ไปที่สถานี CEN ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 2 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงสูงสุดเท่ากับ 3.55% เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย แรงดันไฟฟ้าที่โนครถไฟฟ้าขับเคลื่อนแสดงดังรูปที่ ก.6 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 7 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 751 V เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสภาวะหยุดนิ่งเพื่อเคลื่อนที่จากสถานี S12 ไปที่สถานี S11

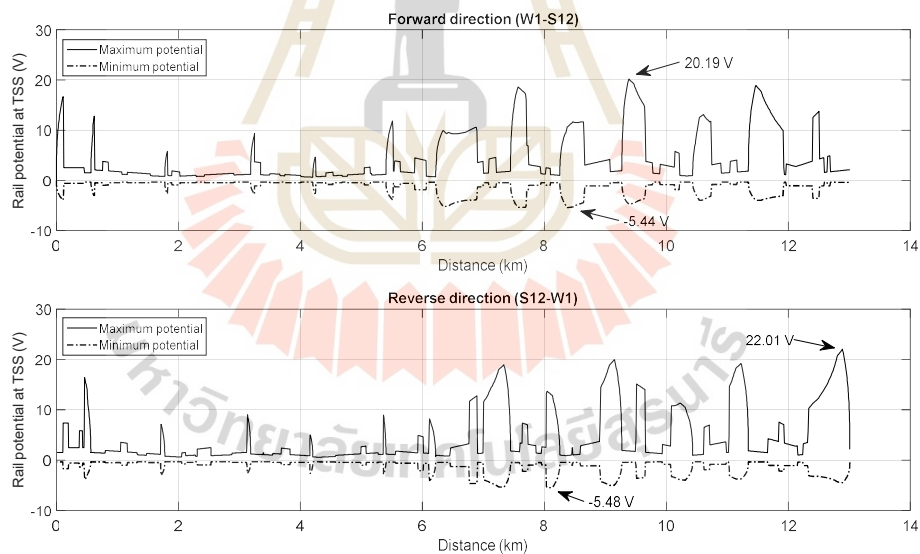
แรงดันไฟฟ้าที่โนครถไฟฟ้า และแรงดันที่รางวิ่งตำแหน่งรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ ก.7 และ ก.8 ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าที่โนครถไฟฟ้ามี่แรงดันต่ำสุดเท่ากับ 708.48 V และมีแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งสูงสุดเท่ากับ 52.34 V แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งสูงสุดและต่ำสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับตำแหน่งรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ ก.9 แรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งสูงสุดและต่ำสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเท่ากับ 22.01 V และ -5.48 V ตามลำดับ



รูปที่ ก.7 แรงดันไฟฟ้าที่โนครถไฟฟ้า กรณีมีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย



รูปที่ ก.8 แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งตำแหน่งรถไฟฟ้า กรณีมีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย



รูปที่ ก.9 แรงดันไฟฟ้ารางวิ่งสูงสุดและต่ำสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับตำแหน่งรถไฟฟ้า กรณีมีการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย



ภาคผนวก ข

ผลการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด ขนาด 3.53 kWh และ 5.06 kWh กรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีลม

Position(km)		E_{train}	E_{cons}	$E_{loss,line}$	E_{waste}	$E_{char,total}$	$E_{disc,total}$	DOD_{max} (%)		SOC_{end} (%)		Energy saving	Loss reduction
WESS1	WESS2	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	WESS1	WESS2	WESS1	WESS2	(%)	(%)
0	7	558.78	561.34	14.48	109.18	11.14	11.98	54.84	47.95	76.06	99.99	7.47	29.42
	8	558.78	560.51	14.52	108.22	12.00	12.84	54.84	48.60	76.01	100.00	7.61	30.04
	9	558.78	561.33	14.58	109.05	11.32	12.17	54.84	23.17	76.02	100.00	7.47	29.50
	10	558.78	559.83	14.41	107.59	12.59	13.43	54.84	41.45	76.03	99.99	7.72	30.45
	11	558.78	561.30	14.55	109.06	11.27	12.12	54.84	28.21	76.02	100.00	7.48	29.49
	12	558.78	562.59	14.59	110.43	10.02	10.87	54.84	47.83	76.02	100.00	7.26	28.61
	13	558.78	565.22	14.70	113.21	7.47	8.32	54.84	44.55	76.02	99.99	6.83	26.81
1	7	558.78	561.59	14.43	109.74	10.73	11.80	43.08	45.09	69.63	100.00	7.43	29.06
	8	558.78	560.75	14.49	108.74	11.60	12.67	42.84	48.05	69.87	100.00	7.57	29.70
	9	558.78	561.57	14.59	109.53	10.93	11.99	42.77	29.17	69.94	100.00	7.43	29.19
	10	558.78	560.07	14.41	108.07	12.19	13.25	42.77	41.45	69.94	99.99	7.68	30.13
	11	558.78	561.55	14.54	109.55	10.88	11.94	42.77	28.21	69.95	100.00	7.44	29.17
	12	558.78	562.83	14.58	110.93	9.63	10.69	42.77	47.83	69.94	100.00	7.22	28.29
	13	558.78	565.46	14.69	113.71	7.08	8.14	42.77	44.55	69.94	99.99	6.79	26.49

ตารางที่ ข.1 การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด ขนาด 3.53 kWh และ 5.06 kWh กรณีศึกษาารถไฟฟ้าสายสีลม (ต่อ)

Position(km)		E_{train}	E_{cons}	$E_{loss,line}$	E_{waste}	$E_{char,total}$	$E_{disc,total}$	DOD_{max} (%)		SOC_{end} (%)		Energy saving	Loss reduction
WESS1	WESS2	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	WESS1	WESS2	WESS1	WESS2	(%)	(%)
2	7	558.78	561.09	14.40	109.57	10.86	12.26	51.97	47.52	60.30	99.99	7.51	29.16
	8	558.78	560.24	14.47	108.47	11.81	13.14	50.08	48.15	62.58	100.00	7.65	29.87
	9	558.78	561.06	14.54	109.30	11.14	12.46	50.08	29.17	62.58	100.00	7.52	29.34
	10	558.78	559.56	14.40	107.80	12.40	13.73	50.13	41.45	62.53	99.99	7.76	30.31
	11	558.78	561.04	14.56	109.26	11.09	12.41	50.13	28.20	62.53	100.00	7.52	29.37
	12	558.78	562.32	14.60	110.63	9.84	11.17	50.13	47.83	62.53	100.00	7.31	28.48
	13	558.78	564.95	14.71	113.41	7.29	8.61	50.13	44.55	62.53	99.99	6.88	26.68
3	7	558.78	562.56	14.42	110.59	9.97	10.83	35.81	43.53	75.69	99.99	7.27	28.51
	8	558.78	561.70	14.47	109.20	11.22	11.71	28.81	47.79	86.29	100.00	7.41	29.40
	9	558.78	562.52	14.59	109.96	10.56	11.04	28.73	29.17	86.36	100.00	7.28	28.91
	10	558.78	561.01	14.44	108.48	11.82	12.30	28.73	41.45	86.36	100.00	7.52	29.87
	11	558.78	562.49	14.57	109.95	10.50	10.99	28.72	28.21	86.37	99.99	7.28	28.92
	12	558.78	563.77	14.61	111.32	9.26	9.26	28.73	47.83	86.36	100.00	7.07	28.03
	13	558.78	566.40	14.72	114.11	6.70	7.19	28.73	44.55	86.36	99.99	6.64	26.23

ตารางที่ ข.1 การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบปริมาตร 2 ชุด ขนาด 3.53 kWh และ 5.06 kWh กรณีศึกษาารถไฟฟ้าสายสีลม (ต่อ)

Position(km)		E_{train}	E_{cons}	$E_{loss,line}$	E_{waste}	$E_{char,total}$	$E_{disc,total}$	DOD_{max} (%)		SOC_{end} (%)		Energy saving	Loss reduction
WESS1	WESS2	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	WESS1	WESS2	WESS1	WESS2	(%)	(%)
4	7	558.78	561.76	14.48	110.06	10.36	11.61	42.95	47.61	67.15	98.21	7.40	28.85
	8	558.78	560.87	14.49	108.27	12.04	12.53	37.14	47.42	86.07	100.00	7.55	30.00
	9	558.78	561.67	14.59	109.08	11.35	11.88	37.11	29.17	84.94	99.99	7.42	29.48
	10	558.78	560.17	14.45	107.58	12.62	13.15	37.12	41.45	85.26	100.00	7.66	30.45
	11	558.78	561.64	14.60	109.03	11.31	11.83	37.12	28.21	85.26	100.00	7.42	29.51
	12	558.78	562.92	14.63	110.41	10.07	10.59	37.12	47.83	85.26	100.00	7.21	28.62
	13	558.78	565.55	14.74	113.19	7.51	8.03	37.12	44.54	85.26	100.00	6.78	26.82
5	7	558.78	561.87	14.54	110.00	10.39	11.53	47.60	47.72	77.26	93.31	7.38	28.89
	8	558.78	560.93	14.47	108.73	11.65	12.50	40.59	46.33	78.38	98.37	7.54	29.71
	9	558.78	561.71	14.58	108.58	11.86	11.86	36.81	29.16	99.79	99.99	7.41	29.80
	10	558.78	560.20	14.48	107.02	13.14	13.14	36.31	41.45	99.98	100.00	7.66	30.81
	11	558.78	561.67	14.62	108.49	11.83	11.83	36.56	28.21	99.99	100.00	7.42	29.86
	12	558.78	562.95	14.67	109.84	10.59	10.59	36.56	47.83	99.99	100.00	7.21	28.99
	13	558.78	565.58	14.79	112.62	8.03	8.04	35.56	44.55	99.99	100.00	6.77	27.19

ตารางที่ ข.1 การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบปริมาตร 2 ชุด ขนาด 3.53 kWh และ 5.06 kWh กรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีลม (ต่อ)

Position(km)		E_{train}	E_{cons}	$E_{loss,line}$	E_{waste}	$E_{char,total}$	$E_{disc,total}$	DOD_{max} (%)		SOC_{end} (%)		Energy saving	Loss reduction
WESS1	WESS2	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	WESS1	WESS2	WESS1	WESS2	(%)	(%)
6	7	558.78	559.95	14.33	109.16	11.16	13.29	74.98	46.52	75.10	75.28	7.70	29.43
	8	558.78	558.66	14.20	107.24	12.98	14.53	74.98	46.07	79.43	83.86	7.91	30.67
	9	558.78	559.17	14.40	106.20	13.95	14.17	73.24	38.13	93.83	100.00	7.83	31.34
	10	558.78	557.62	14.17	104.52	15.48	15.48	70.76	49.78	100.00	100.00	8.08	32.43
	11	558.78	559.06	14.30	105.96	14.20	14.20	70.99	28.21	100.00	100.00	7.85	31.50
	12	558.78	560.33	14.37	107.29	12.97	12.97	70.99	47.83	100.00	100.00	7.64	30.64
	13	558.78	562.96	14.51	110.04	10.42	10.42	70.99	44.55	99.99	99.99	7.20	28.86



ตารางที่ ข.2 ค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี PSO สำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด ขนาด 3.53 kWh และ 5.06 kWh กรณีศึกษาารถไฟฟ้าสายสีลม

Repeat	Position (m)		E_{train} (kWh)	E_{cons} (kWh)	$E_{loss,line}$ (kWh)	E_{waste} (kWh)	$E_{char,total}$ (kWh)	$E_{disc,total}$ (kWh)	DOD_{max} (%)		SOC_{end} (%)		Energy saving (%)	Loss reduction (%)
	WESS1	WESS2							WESS1	WESS2	WESS1	WESS2		
1	10529	6719	558.78	556.06	13.75	103.25	16.75	16.75	75.00	51.24	100.00	100.00	8.34	33.25
2	6814	10503	558.78	555.92	13.77	103.08	16.91	16.93	68.90	56.37	99.48	100.00	8.36	33.36
3	6818	10494	558.78	555.90	13.78	103.06	16.92	16.94	68.68	56.36	99.47	100.00	8.37	33.37
4	10491	6774	558.78	556.04	13.77	103.21	16.78	16.78	75.00	49.33	100.00	99.94	8.34	33.27
5	6817	10496	558.78	555.91	13.79	103.07	16.92	16.94	68.74	56.36	99.31	100.00	8.37	33.37





รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

N. Sutphom, C. Sumpavakup and T. Ratniyomchai (2019). Preliminary Design of Supercapacitor for Stationary Energy Storage in Mass Rapid Transit. **Asian Conference on Engineering and Natural Sciences (ACENS)**. 22-24 January 2019, Hokkaido, Japan. pp.549-555.

นัชพร สุตพรหม และ ทศพล รัตน์นิยมชัย. (2562). ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าโดยพิจารณาพลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานไฟฟ้าแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15, 22-24 พฤษภาคม 2562.

นัชพร สุตพรหม และ ทศพล รัตน์นิยมชัย. (2563). การหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 32 (2).

ACENS-0318
Preliminary Design of Supercapacitor for Stationary Energy Storage in Mass Rapid Transit

Natchaphon Sutphrom^a, Chaiyut Sumpavakup^b, Tosaphol Ratniyomchai^a

^a School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

^b Institute of Research and Development, Suranaree University of Technology, Thailand

E-mail: tosaphol@sut.ac.th

Abstract

Braking energy recuperation in electric transport systems has become a topic of great importance. Energy Storage System (ESS) is employed to store braking energy and supply it later when needed. Thus, increasing transport system efficiency. To store and reuse regenerative braking energy, this paper aims at finding the required capacity of a stationary supercapacitor at each station using the Bangkok Sky Train Silom Line as a case study. A single train simulator is used to simulate one-way train trip with and without energy storage system. Finally, a comparison of energy consumption at each substation is presented.

Keywords: Supercapacitor, stationary energy storage, regenerative braking energy

1. Background

Advantages of having energy storage in electrified railway systems include, contact line peak power reduction and voltage stabilization, train autonomy (on non-electrified route section and during emergency power outage) and, energy saving (braking energy recuperation). Depending on the main purpose, Energy Storage Device (ESD) can be installed either onboard or stationary on trackside (normally at a traction substation). The former is good for train autonomy whereas the latter is preferred when space and weight limits are major concerns. In terms of braking energy, regenerative braking energy is the energy generated from traction motors which temporarily act as generators during braking and convert vehicle kinetic energy into electrical energy. The electrical energy can be used immediately to the train motoring/auxiliaries or stored by ESD to be later fed back to support the vehicle or traction substation. The outstanding characteristic of supercapacitor is high power density, it can be recharged very fast at high power and current, this makes it a good choice for storing braking energy. Another field application, supercapacitor can be applied for pitch angle controlling in renewable energy field and can be power supply when power outage in the field that need high reliable (Yi et. al. 2014). In 2006, JR Shin-Hikita was installed Battery Energy Storage System (BESS) at traction power supply in Japan (Hitoshi H. 2017). In October 2007, supercapacitor energy storage system was installed at 4 substations to absorb regenerative braking energy in Chinese urban railway. Nowadays, several

railway operators employ Energy Storage System (ESS) to reduce train energy consumption (Zhongping et. al. 2014).

2. Methods

This paper study stationary energy storage system (ESS). ESS receives an energy that occurred when a train braking and release an energy stored to support when a train accelerating. Supercapacitor is a device for absorb regenerated energy in this paper. The calculation of the capacity of supercapacitor module and the schematic of a case study are presented as follows:

2.1 The General Concept of Regenerative Braking Energy and ESS

Fig.1 shown the main purpose of this study. ESS receives regenerative braking energy when a train work as a braking phase and then release energy to support a train accelerating when a train work as motoring phase until the minimum state of charge (SOC). A maintain minimum SOC control strategy is to maintain the minimum SOC all the time to prepare ESS ready to receive regenerative braking energy until fully charge. During motoring phase, ESS releases energy to minimum SOC to receive a regenerative braking energy at the new cycle (Tosaphol et. al. 2014).

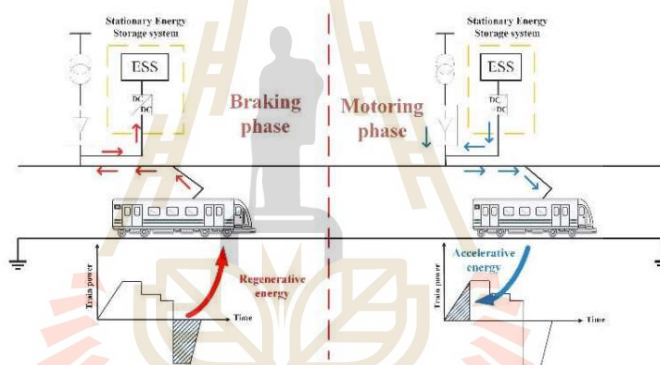


Fig.1: Charging and Discharging of stationary energy storage system

2.2. Required Capacity of Stationary Supercapacitor Packs

In this paper, minimum state of charge (SOC) of the stationary supercapacitor is set to 25%. Thus, if the supercapacitor is fully charged, the energy it can release is only 75% as described by (1). Number of the required supercapacitor modules is determined using (2). A chosen supercapacitor module to be used in the study has a capacitance of 62 F, rated voltage of 129.6 V, a series resistance of 13.2 m Ω and, storage capacity of 144.6 Wh.

$$E_{\text{module}} = 0.75 \cdot \frac{1}{2} CV^2 \quad (1)$$

$$N_{\text{module}} = \frac{E_{\text{reg}}}{E_{\text{module}}} \quad (2)$$

where E_{module} is stored energy in supercapacitor module, C and V are capacitance and voltage of the supercapacitor module respectively, E_{reg} is a regenerative braking energy and, $N_{\text{module,total}}$ is required number of supercapacitor modules.

Given supercapacitor module rated voltage of 129.6 V, five modules are connected in series and number of parallel strings is determined using equation (3). Maximum voltage, maximum current and, equivalent series resistance (ESR) of supercapacitor pack are given by equations (4), (5) and, (6) respectively (Brenna et. al. 2007).

$$N_{\text{parallel}} = \frac{N_{\text{module,total}}}{N_{\text{series}}} \quad (3)$$

$$V_{\text{max}} = N_{\text{series}} \cdot V_{\text{module,rate}} \quad (4)$$

$$I_{\text{max}} = N_{\text{parallel}} \cdot I_{\text{module,rate}} \quad (5)$$

$$ESR_{\text{total}} = \frac{N_{\text{series}}}{N_{\text{parallel}}} \cdot ESR_{\text{module}} \quad (6)$$

where N_{parallel} and N_{series} are number of supercapacitor modules in parallel and in series respectively, ESR_{module} is supercapacitor module ESR, V_{max} , I_{max} and, ESR_{total} are maximum voltage, maximum current and ESR of a supercapacitor pack respectively.

2.3 Schematic of Case Study

The simulation is based on a single train simulator running one-way on the Bangkok BTS Silom line (Chaiyut et. al. 2018). The Bangkok Silom line is as a schematic of traction substation as shown in Fig.2 which has separator gaps both left and right sides end. The Bangkok Silom line has 13 passenger stations and 7 traction substations (TSS), as shown in Fig.3. A capacity of supercapacitor depends on the varied terminal voltage. Thus, a DC link system must have DC-DC converter between ESS and traction substation. A DC-DC converter operates in buck-mode when regenerative braking energy charges to ESS and operates in boost-mode when ESS discharges to traction substation (Albert et. al. 2012).

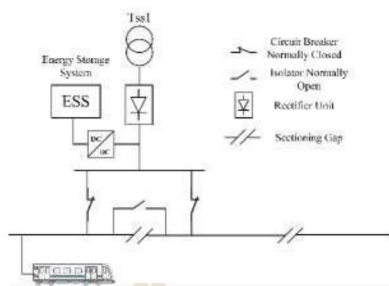


Fig.2: Simplistic schematic of stationary energy storage system

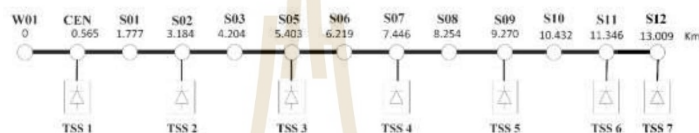


Fig.3: The locations of Silom line traction substation

3. Results

Regenerative braking energy (E_{brake}), number of supercapacitor modules (N_{module}), supercapacitor pack capacitance (C_{total}), supercapacitor pack energy storage capacity (E_{stored}), energy charged to supercapacitor pack ($E_{charged}$), energy discharged from supercapacitor pack to support train acceleration ($E_{discharged}$) and the final SOC of the supercapacitor pack (SOC_{end}) at each traction substation are presented in Table 1. As previously mentioned, minimum SOC of a supercapacitor pack is set to 25%, thus number of supercapacitor modules is determined such that the storage capacity of the supercapacitor pack is 125% of regenerative braking energy. From Table 1 at TSS3, for example, regenerative braking energy of 6.724 kWh, energy stored of 4.687 and energy discharged of 2.091 kWh. It has the final SOC of 48.93 %.

Table 1: Results summary at each traction substation.

Traction Substation	E_{brake} (kWh)	$N_{module,total}$	C_{total} (F)	E_{stored} (kWh)	$E_{charged}$ (kWh)	$E_{discharged}$ (kWh)	SOC_{end} (%)
TSS 1	6.637	75	186	8.136	4.689	3.237	38.39
TSS 2	5.394	60	148.8	6.509	3.772	2.720	37.13
TSS 3	6.724	75	186	8.136	4.687	2.091	48.93
TSS 4	15.306	175	434	18.983	11.384	7.473	40.45
TSS 5	16.548	190	471.2	20.610	12.064	5.698	48.17

TSS 6	7.489	85	210.8	9.220	6.452	0	77.48
TSS 7	9.675	110	272.8	11.932	8.318	0	77.20

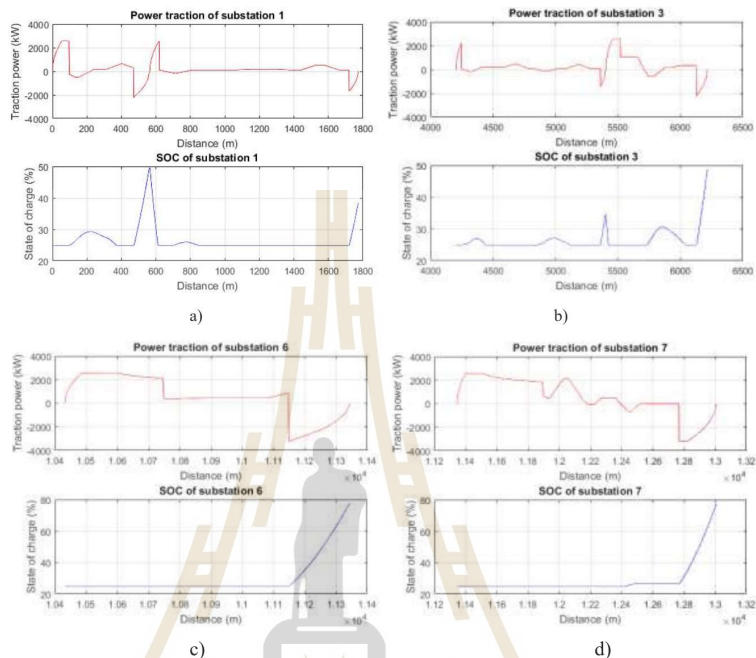


Fig.4: SOC of ESS at traction substation a) TSS 1, b) TSS 3, c) TSS 6 and d) TSS7

As the results, for example, Fig.5 shown SOC of ESS at traction substation 1, 3, 6 and 7, when a train operates in braking phase, it has a regenerative braking energy return to ESS or its energy charged to ESS, thus SOC will increase. Regarding the route of the track between station S10 and S11, a traction power at traction substation 6 in Fig.4c shown that it has a one-time braking thus energy storage system did not discharge to support a train to acceleration, and similarly with traction substation 7 (station S11 to S12 show in Fig. 4d). Thus, energy discharged is zero as shown in Table 1. A comparison of energy consumption with and without ESS is shown in Fig.5

Considering traction substation 4 in Fig. 5, ESS supported the train during the train acceleration is more than other traction substations. An energy required at traction substation 4 decreases of 19.31%. The total energy required in the system decrease with a maximum of 11.80 %.

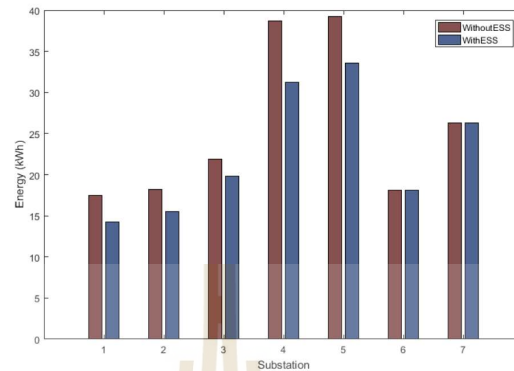


Fig.5: Energy consumption at each substation with and without ESS

Acknowledgments and Legal Responsibility

This paper was supported by School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

4. References

- Albert K., Andreas A., Andrés E. D. and Helmuth B. (2012). Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems. 2012 IEEE Colombian Intelligent Transportation Systems Symposium (CITSS). doi: 10.1109/CITSS.2012.6336687
- Brenna M, Foadelli F, Tironi E, Zaninelli D. (2007). Ultracapacitors application for energy saving in subway transportation system. 2007 International Conference on Clean Electrical Power. doi: 10.1109/ICCEP.2007.384188
- Chaiyut S., Sujin S., Tosaphol R. and Thanatchai K. (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(1), 44-62. doi: <https://doi.org/10.1007/s40998-018-0048-6>
- Hitoshi H. (2017). Recent Trend of Regenerative energy Utilization in Traction power supply system in Japan. Urban Rail Transit, 3(4), 183-191. doi: <https://doi.org/10.1007/s40864-017-0070-4>
- Tosaphol R., Stuart H. and Pietro T. (2014). Recent developments and application of energy storage devices in electrified railway. IET Electrical Systems in Transportation, 4(1), 9-20. doi: 10.1049/jet-est.2013.0031.
- Yi T. and ZhiMei L. (2014). Study on modeling and application of ultracapacitor. 2014 IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA). doi:

10.1109/WARTIA.2014.6976443

Zhongping Y., Huan X., Bin W. and Fei L. (2014). An overview on Braking Energy Regeneration Technologies in Chinese Urban Railway Transportation. 2014. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869883



ECE0022

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15
21-24 พฤษภาคม 2562 จังหวัดนครราชสีมา



ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าโดยพิจารณาพลังงานสูญเสียน้อยที่สุด
ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

Minimized Energy Loss by Optimal Position of Stationary Energy Storage System in the Mass
Transit Systems

นัชพร สุตพรหม และ ทศพล รัตน์นิยมชัย

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
tospahol@sut.ac.th, 044-224400

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าจากการเบรก โดยพิจารณาพลังงานสูญเสียรวมที่มีค่าน้อยที่สุดด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization: PSO) การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 1 ขบวน ระหว่าง 2 สถานี และ 1 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกที่ติดตั้งระหว่างสถานี โดยใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานจากการเบรก ควบคุมการจ่ายประจุไฟฟ้าและเก็บประจุไฟฟ้าด้วยค่ากระแสอ้างอิง จากการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคพบว่า เมื่อพิจารณาเฉพาะพลังงานสูญเสียรวมของรถไฟฟ้าที่เคลื่อนที่จากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานย้อนกลับคือตำแหน่งที่สถานีที่จ่ายไฟฟ้าที่ 2

คำหลัก: พลังงานเบรกย้อนกลับ, อุปกรณ์เก็บพลังงาน, พลังงานสูญเสีย

Abstract

This paper presents an optimal position of stationary energy storage by minimizing energy loss using Particle Swarm Optimization (PSO). A single train simulator is used to simulate one-way train trip between two-passenger stations, including two-substations and one-stationary energy storage. Supercapacitor is an Energy Storage. A referenced line current state control is a strategy to control charging and discharging of energy storage system. The result showed that an optimal position is at the second substation.

Keywords: Regenerative energy, Energy Storage, Energy loss

1. บทนำ

การนำอุปกรณ์เก็บพลังงานมาใช้กับระบบรถไฟฟ้ามีการศึกษาหลากหลายรูปแบบ เช่น การนำแบตเตอรี่ (Batteries) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง ทั้งแบบติดตั้งบนตัวรถไฟฟ้า และติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งระหว่างสถานี การนำล้อดุนกำลัง (Flywheel) เพื่อเก็บพลังงานในรูปพลังงานจลน์ การใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors) เก็บพลังงานย้อนกลับจากการเบรก เป็นต้น [1] การเก็บพลังงาน

ย้อนกลับจากการเบรกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่เป็นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบโดยการลดพลังงานสูญเสียจากการเบรกเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก โดยปกติการเบรกของรถไฟฟ้าจะสูญเสียพลังงานการเบรกในรูปความร้อนผ่านตัวต้านทานการเบรก (rheostatic braking) ดังนั้นการนำพลังงานการเบรคนำกลับมาใช้ใหม่เป็นการลดกำลังสูญเสีย ลดการจ่ายกำลังงานของสถานีจ่ายไฟฟ้า และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

การศึกษาการนำพลังงานการเบรกมาใช้ใหม่เริ่มมีการศึกษา และนำมาใช้จริงในหลากหลายประเทศ เช่น รถไฟใต้ดินที่เมืองลอนดอน (London Underground's Piccadilly line) ประเทศอังกฤษ สามารถถ่ายโอนพลังงานย้อนกลับจากการเบรกเข้าสู่ระบบส่งจ่ายสำหรับรถไฟฟ้ายกได้ถึง 14% [2] และในปี 2007 ประเทศจีนใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานรับพลังงานจากการเบรกสำหรับระบบขนส่งในเมืองปักกิ่ง ระยะทางรวม 27.6 กิโลเมตร [3] คุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าและจ่ายประจุไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว มีอายุการใช้งานที่มากกว่าแบตเตอรี่ จึงทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเหมาะสมนำมาใช้เก็บพลังงานจากการเบรกการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่มีรูปแบบการควบคุมการทำงานขึ้นกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เช่นการนำพลังงานย้อนกลับเข้าสู่จ่ายกำลังงานเมื่อต้องการกำลังงานไฟฟ้าสูง ๆ เพื่อชดเชยการจ่ายกำลังงานของสถานีจ่ายไฟฟ้า หรือการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่เพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบ เป็นต้น [4]

บทความนี้นำเสนอตำแหน่งเพื่อติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานของระบบรถไฟฟ้ายกส่งมวลชน โดยคำนึงถึงกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้น ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค ในส่วนแรกขอบทความกล่าวถึงเงื่อนไขในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ายกและการหาค่าเหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค ส่วนที่สองแสดงรายละเอียดจากการศึกษาและแสดงผลของการจำลอง ส่วนสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์และสรุปผลการศึกษาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน

2. การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ายก

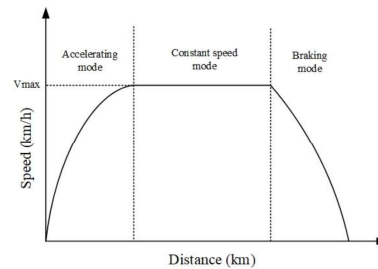
การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ายกแบ่งการทำงานอย่างง่ายเป็น 3 โหมด คือ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่ และโหมดการเบรกดังแสดงในรูปที่ 1 กำลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ายกคำนวณได้จากสมการ (1) – (4) [5] เมื่อรถไฟฟ้ายกทำงานในโหมดเร่งและเบรก กำลังงานที่รถไฟฟ้ายกใช้ สามารถคำนวณได้จากสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$P = \frac{F_T \times v}{\eta} \quad (1)$$

$$P = F_T \times v \times \eta \quad (2)$$

$$F_T = M_{eff} \alpha + F_R \quad (3)$$

$$F_R = A + Bv + Cv^2 \quad (4)$$



รูปที่ 1 โหมดการทำงานของรถไฟฟ้ายก

พิจารณาแรงจลุดรไฟฟ้า (Tractive effort: F_T) คำนวณจากผลรวมระหว่างแรงจลุดรไฟฟ้าและแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ายก (Resistance force: F_R) โดยที่ M_{eff} คือมวลประสิทธิภาพของรถไฟฟ้ายก และ α คือความเร่งของรถไฟฟ้ายก ในขณะที่แรงต้านการเคลื่อนที่ที่สามารถคำนวณได้จากความเร็วรถไฟฟ้ายก v (km/h) และสัมประสิทธิ์เดวิส (Davis coefficients) A (kN), B (kN/km) และ C (kN²/km²) และ η คือประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อน

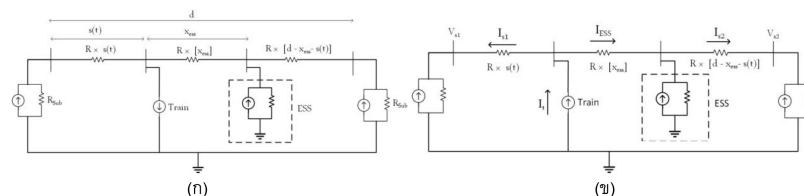
การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า แบบจำลองระบบไฟฟ้าจะเปลี่ยนตามการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ายกในแต่ละวินาทีที่เปลี่ยนไป (t) ความต้านทานในตัวนำไฟฟ้าระหว่างตำแหน่งรถไฟฟ้ายกกับสถานีจ่ายไฟฟ้าก่อนหน้า (R_1) ความต้านทานในตัวนำไฟฟ้าระหว่างตำแหน่งรถไฟฟ้ายกกับตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า (R_2) และความต้านทานในตัวนำไฟฟ้าระหว่างตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้ากับสถานีจ่ายไฟฟ้าถัดไป (R_3) สามารถคำนวณได้จากสมการ (4) – (6) ตามลำดับ โดยที่ R คือค่าความต้านทานในหน่วยโอห์มต่อกิโลเมตร (Ω/km) [6]

$$R_1 = R \times s(t) \quad (4)$$

$$R_2 = R \times (x_{ess}) \quad (5)$$

$$R_3 = R \times [d - x_{ess} - s(t)] \quad (6)$$

เมื่อเพิ่มอุปกรณ์เก็บพลังงานที่ตำแหน่งระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า พิจารณาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเป็นเสมือนแหล่งจ่ายกระแส จาลองขบวนรถไฟฟ้ายกเป็นแหล่งจ่ายกระแสเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก)

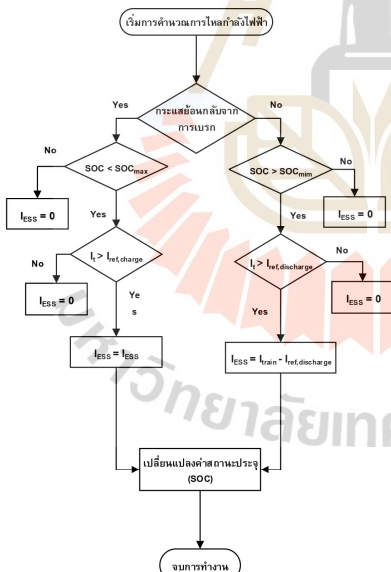


รูปที่ 2 แบบจำลองของระบบรถไฟฟ้า (ก) ระบบปกติ (ข) ระบบเมื่อเกิดการเบรก

และ (ข) อุปกรณ์เก็บพลังงานมีรูปแบบการควบคุมการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3 การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์เก็บพลังงานพิจารณา 2 ค่าคือค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งมีค่ามากกว่ากระแสอ้างอิงการเก็บประจุไฟฟ้า (Charging) หรือจ่ายประจุไฟฟ้า (Discharge) หรือไม่ และระดับประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บพลังงาน (State of charge: SOC) มากกว่าหรือน้อยกว่าระดับประจุอ้างอิงการเก็บประจุและการจ่ายประจุหรือไม่ วัตถุประสงค์หลักของรูปแบบการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์เก็บพลังงานที่อธิบายดังที่กล่าวมาแล้วนั้น คือการใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานช่วยจ่ายกำลังงานที่ค่าความต้องการกำลังงานสูง ๆ (peak power) เพื่อลดการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้า

3. การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization: PSO)

การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคมีรูปแบบการทำงานคล้ายการเคลื่อนที่ของฝูงนกหรือฝูงปลาซึ่งมีการเคลื่อนที่ไปเป็นฝูง ค่าตอบของกลุ่มอนุภาคจะเคลื่อนที่ไปตามอนุภาคที่มีค่าตอบใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมที่สุด การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคประกอบไปด้วยอนุภาคย่อย ๆ แต่ละอนุภาคเป็นตัวแทนของคำตอบที่ต้องการค้นหา ซึ่งเคลื่อนที่ในปริภูมิค้นหา โดยตำแหน่งของแต่ละอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงไปตามข้อมูลของสภาวะแวดล้อมที่เคลื่อนที่เข้ามา [7] ขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 รูปแบบการควบคุมอุปกรณ์เก็บพลังงาน

1. ทำการสุ่มตำแหน่งและความเร็วของแต่ละอนุภาค ในกลุ่มประชากร ตำแหน่งของอนุภาคจะเปลี่ยนไปตามผลรวมของเวกเตอร์ตำแหน่งและเวกเตอร์ความเร็ว

$$\vec{p}_i(t) = \vec{p}_i(t-1) + \vec{v}_i(t)$$
2. ประเมินค่าความเหมาะสมของอนุภาค โดยอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดจะถูกบันทึกเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคไว้
3. ทำการปรับค่าความเร็วของอนุภาค

$$\vec{v}_i(t) = \vec{v}_i(t-1) + \rho_p [\vec{p}_{best,i} - \vec{p}_i(t)] + \rho_g [\vec{p}_{gbest} - \vec{p}_i(t)]$$

โดย ρ_p และ ρ_g เป็นตัวแปรสุ่ม
 \vec{p}_{gbest} ค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง
 $\vec{p}_{best,i}$ ค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของอนุภาคนั้น ๆ
4. ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค

$$\vec{p}_i(t) = \vec{p}_i(t-1) + \vec{v}_i(t)$$
5. ทำการปรับค่าตัวแปรเวลา $t = t + 1$

6. วงรอบการทำงานจนกระทั่งเป็นไปตามเงื่อนไขหยุดที่ยอมรับได้

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคเป็นระบบที่มีหน่วยความจำ โดยมีการแบ่งปันข้อมูลร่วมกันระหว่างอนุภาคทำให้อนุภาคในมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างรวดเร็ว [7]

4. ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า

บทความนี้เลือกตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าโดยคำนึงถึงพลังงานงานสูญเสีย กำลังงานสูญเสียสามารถคำนวณจากผลรวมของกำลังงานสูญเสียจากความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าและกำลังสูญเสียจากค่ากระแสย้อนกลับมาที่สถานีจ่ายไฟฟ้าเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะที่รถไฟฟ้าเบรก ดังสมการที่ (7) –(9) โดยค่ากระแสในสมการอ้างอิงจากรูปที่ 1 (ข) และ R คือความต้านทานในสายส่งในหน่วยโอห์มต่อกิโลเมตร

$$P_{loss} = P_{loss,sub} + P_{loss,line} \tag{7}$$

$$P_{loss,sub} = I_{s1}V_{s1} + I_{s2}V_{s2} \tag{8}$$

$$P_{loss,line} = I_{s1}^2 R_1 + I_{ESS}^2 R_2 + I_{s2}^2 R_3 \tag{9}$$

การจำลองกรณีการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเมือง จำนวน 1 ขบวน เคลื่อนที่ระหว่างสถานีที่ 1 ถึงสถานีที่ 2 ระยะทาง 565 เมตร มี 2 สถานีจ่ายไฟฟ้า และ 1 ตำแหน่งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า พารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าในการจำลองแสดงในตารางที่ 1 และลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4

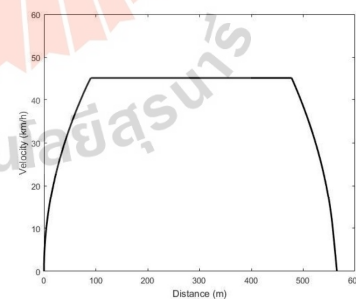
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ขบวนรถไฟฟ้า

Total train mass	228 ton
Rate voltage	750 V
Conductor resistance	8.23 mΩ /Km
Max. speed	80 km/h
Max. acceleration	0.87 m/s ²
Max. deceleration	1.00 m/s ²
Train resistance	A = 4025 B = 118.67 C = 0.871
Efficiency: Gear, motor, inverter	84.52 %

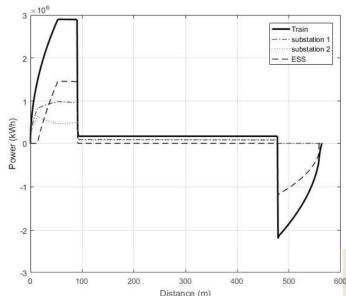
อุปกรณ์เก็บพลังงานจากการเบรกในบทความนี้ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยกำหนดให้มีระดับประจุไฟฟ้าเท่ากับ 100% เมื่อเริ่มเคลื่อนที่จากสถานีที่ 1 เพื่อให้อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าสามารถช่วยจ่ายกำลังงานที่ค่าสูงกว่ากระแสอ้างอิงการจ่ายประจุเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่ง ตารางที่ 2 แสดงค่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของทั้งสองสถานีและพลังงานสูญเสียในระบบเมื่อมีและไม่มีอุปกรณ์เก็บพลังงานจากการหาตำแหน่งที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคด้วยจำนวนอนุภาคเท่ากับ 30 จำนวนรอบการคำนวณเท่ากับ 100 รอบ และขอบเขตของตัวแปรสุ่มตั้งแต่ 0 ถึง 565 เมตร ตำแหน่งที่เหมาะสมคือตำแหน่งสถานีจ่ายไฟฟ้าที่ 2 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของทั้งสองสถานีจ่ายไฟฟ้าเท่ากับ 6.174 kWh และพลังงานสูญเสียในระบบเท่ากับ 1.794 kWh พิจารณาพลังงานสูญเสียเมื่อมีและไม่มีอุปกรณ์เก็บพลังงานจากการเบรกกรณีมีอุปกรณ์เก็บพลังงานจากการเบรกสามารถลดพลังงานสูญเสียได้สูงถึง 55% และลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้า 28% จากการช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า

ตารางที่ 2 ค่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าและพลังงานสูญเสีย

Position of ESS (m)	Total energy consumption (kWh)		Total energy loss (kWh)	
	Without ESS	With ESS	Without ESS	With ESS
0	8.637	6.180	4.005	2.228
100	8.637	6.179	4.005	2.227
200	8.637	6.179	4.005	2.232
300	8.637	6.178	4.005	2.263
400	8.637	6.177	4.005	2.241
500	8.637	6.175	4.005	2.136



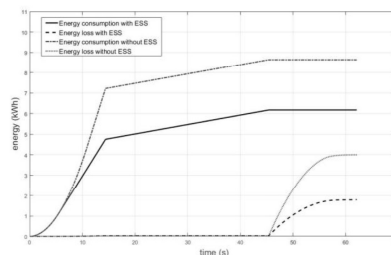
รูปที่ 4 ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า



รูปที่ 5 กำลังงานของรถไฟฟ้า สถานีจ่ายไฟฟ้า และกำลังงานที่จ่ายโดยอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า

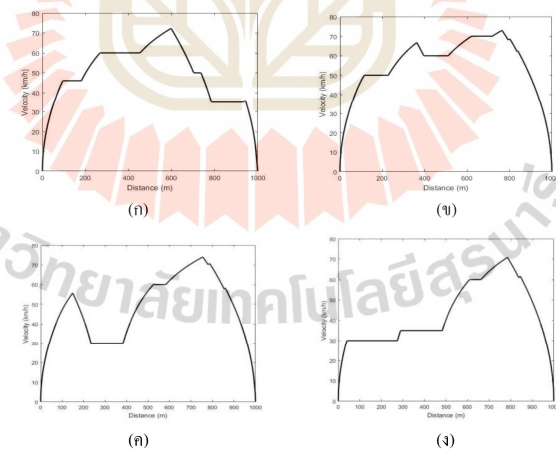
รูปที่ 5 แสดงกำลังงานของรถไฟฟ้า เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่ง มอเตอร์ต้องการกำลังงานในการเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าจากสภาวะหยุดนิ่ง กำลังงานมีค่าเป็นบวก อุปกรณ์เก็บพลังงานจากการเบรกมีค่าประจุไฟฟ้าเริ่มต้น 100% จึงสามารถจ่ายประจุไฟฟ้าได้เมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขรูปแบบการควบคุมอุปกรณ์เก็บพลังงาน กำลังงานของอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าจ่ายกำลังงานเป็นบวก และเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก ทำให้มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเนื่องจากมีค่าแรงจุดเป็นลบและมีกำลังงานย้อนกลับจากการเบรก กำลังงานของรถไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าเก็บประจุเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขรูปแบบ

การควบคุมอุปกรณ์เก็บพลังงาน อุปกรณ์เก็บประจุไฟฟ้ากำลังงานเป็นลบ



รูปที่ 6 ค่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้า และพลังงานสูญเสียในระบวงรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรณีมีและไม่มีอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า

จากรูปที่ 6 เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่ง สถานีจ่ายไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้าเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ เกิดกำลังสูญเสียภายในสายส่ง เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก เกิดพลังงานไหลย้อนกลับจากการเบรกพลังงานบางส่วนถูกเก็บด้วยอุปกรณ์เก็บพลังงานและพลังงานที่ไม่สามารถเก็บได้จัดเป็นพลังงานสูญเสียจากค่ากระแสไหลย้อนกลับมาที่สถานีจ่ายไฟฟ้า ดังนั้นพลังงานสูญเสียจะมีค่ามากเมื่อเกิดการเบรกของรถไฟฟ้า



รูปที่ 7 ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า (ก) กรณี 1, (ข) กรณี 2, (ค) กรณี 3, (ง) กรณี 4

ตารางที่ 3 ผลการจำลองกรณีตั้งรูปที่ 7

Case	Track length (km)	Train energy (kWh)	Energy consumption (kWh)		Energy loss (kWh)		Energy renewable (kWh)	
			Without ESS	With ESS	Without ESS	With ESS	Without ESS	With ESS
1	1	19.601	19.751	12.473	10.389	4.694	0	5.598
2	1	22.703	22.888	14.041	12.321	5.400	0	6.836
3	1	16.828	27.060	15.684	15.360	7.160	0	8.087
4	1	18.624	18.786	11.685	9.988	4.185	0	5.713

การจำลองกรณีการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในระยะทาง 1 กิโลเมตร มีลักษณะความเร็วของรถไฟต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) – (ง) อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าติดตั้งที่ตำแหน่งสถานีจ่ายไฟฟ้าที่ 2 จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคด้วยจำนวนอนุภาค 30 อนุภาค จำนวนรอบการคำนวณเท่ากับ 100 รอบ และขอบเขตของตัวแปรสุ่มตั้งแต่ 0 ถึง 1000 เมตร โดยพิจารณาตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าที่ส่งผลให้เกิดพลังงานสูญเสียในระบบน้อยที่สุด ผลการจำลองแสดงดังตารางที่ 3 ตัวอย่างการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟการเคลื่อนที่ที่ 1 ดังรูปที่ 7 (ก) ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าติดตั้งที่สถานีที่ 2 มีค่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง 36% เมื่อมีอุปกรณ์เก็บพลังงานช่วยจ่ายที่ค่ากำลังงานสูงกว่าค่ากระแสอ้างอิงการจ่ายประจุพลังงานสูญเสียลดลง 54% และสามารถเก็บพลังงานจากการเบรกเพื่อนำมาใช้ใหม่ได้ถึง 5.596 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการจำลองของรถไฟขบวนส่งมวลชนที่ให้บริการภายในเมือง จำลองการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเก็บพลังงานย้อนกลับจากการเบรกของรถไฟด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคพิจารณาพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด จากผลการจำลองทั้ง 4 กรณี ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานย้อนกลับคือตำแหน่งที่สถานีจ่ายไฟฟ้าที่ 2 ทุกกรณี โดยสามารถเก็บพลังงานจากการเบรกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่และลดพลังงานสูญเสียเฉลี่ยได้ถึง 55% จากการศึกษาพบว่าพลังงานสูญเสียในระบบมีค่ามากเนื่องจากกำลังงานสูญเสียจากค่ากระแสย้อนกลับมาที่สถานีจ่ายไฟฟ้าและการจำลองในทุกกรณีเป็นการจำลองการเคลื่อนที่เพียง 2

สถานี การเบรกของรถไฟเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้สถานีที่ 2 จึงทำให้ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าเมื่อพิจารณาพลังงานสูญเสียทั้งระบบอยู่ที่ตำแหน่งสถานีที่ 2 ก่อนและหลังเล็กน้อย

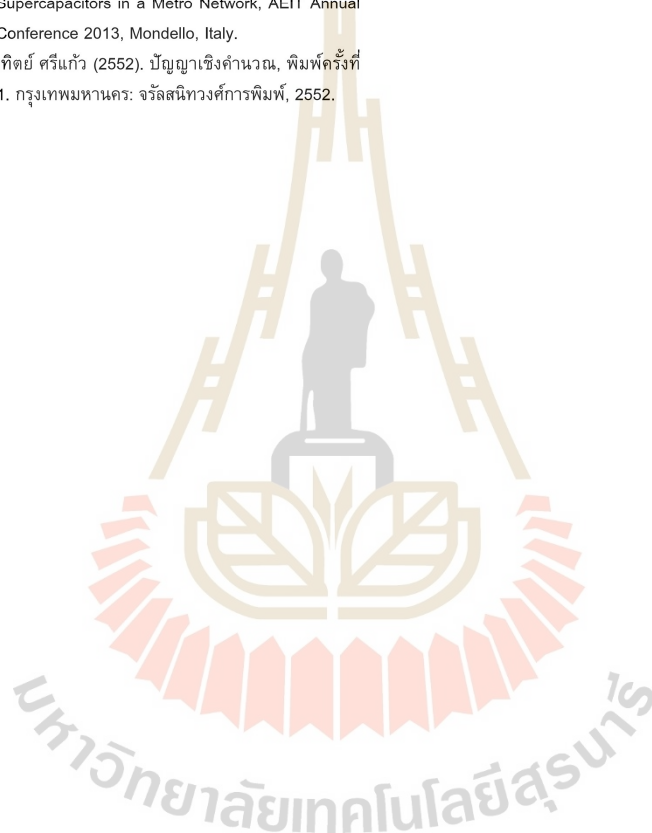
6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนกิตติบัณฑิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tosaphol R., Stuart H. and Pietro T. (2014). Recent developments and application of energy storage devices in electrified railway. IET Electrical Systems in Transportation,
- [2] Paul R., James S. W. and Lily H. S. (2010). Stationary applications of energy storage technologies for transit systems, 2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference, Halifax, NS, Canada.
- [3] Zhongping, Y., Huan, X., Bin, W. and Fei, L. (2014). An overview on braking energy regeneration technologies in Chinese urban railway transportation. 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA), Hiroshima, Japan
- [4] Flavio C. (2014). Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems. University of Naples Federico II. Naples, Italy

- [5] Chaiyut, S., Sujin, S., Tosaphol, R. and Thanatchai, K. (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, vol. 42(1), pp 44-62.
- [6] Vito C., Vincenzo, G., Giuseppe, G. and Antonio, P. (2013). Siting and Sizing of Stationary Supercapacitors in a Metro Network, AEIT Annual Conference 2013, Mondello, Italy.
- [7] อาทิตย์ ศรีแก้ว (2552). ปัญญาเชิงคำนวณ, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: จรัสสินทวงศ์การพิมพ์, 2552.





ที่ ศธ ๐๕๒๕.๑(๑๙)/๔๓๑

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
๑๕๑๘ ถนนประชากรราษฎร์ ๑ แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร ๑๐๘๐๐

๒๔ สิงหาคม ๒๕๖๓

เรื่อง รับบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรียน อาจารย์ ดร.ทศพล รัตนนิยมชัย

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัยเรื่อง การหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เพื่อเสนอพิจารณาตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ นั้น กองบรรณาธิการวารสารได้พิจารณายอมรับบทความดังกล่าวและให้จัดพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ ๓๒ ฉบับที่ ๒ เมษายน-มิถุนายน ๒๕๖๕

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความร่วมมือจากท่านในการส่งบทความเพื่อพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์)

ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายส่งเสริมวิชาการและกิจการพิเศษ
รองหัวหน้ากองบรรณาธิการวารสาร

กองส่งเสริมวิชาการ

โทร. ๐ ๒๕๕๕ ๒๒๓๘

โทรสาร ๐ ๒๕๕๕ ๒๒๓๖

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อัตลักษณ์ กองส่งเสริมวิชาการ : บริการอย่างเป็นมิตร ร่วมแรงคิดพัฒนาสู่สากล



การหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางสำหรับ รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

นั้พร สุตพรหม และ ทศพล รัตน์นิยมชัย*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

* ผู้พิมพ์ประสานงาน โทรศัพท์ 044-224401 อีเมล: tosaphol@sit.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง (Wayside Energy Storage System) เพื่อเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (Regenerative braking) ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขณะแสดงกรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีลมด้วยการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า 1 ขบวน ขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุดเท่ากับ 4.61 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ 5.43 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ศึกษาการหาตำแหน่งที่เหมาะสม 2 วิธี โดยพิจารณาตำแหน่งที่เหมาะสมจากการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและเกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด ได้แก่ 1. การเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด แต่ละชุดเปลี่ยนตำแหน่งทุก ๆ 1 กิโลเมตร ผลการจำลองพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสม คือ ที่ตำแหน่ง 6 กิโลเมตร และ 10 กิโลเมตร จากสถานีผู้โดยสารต้นทาง การใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 8.18 และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียลดลงร้อยละ 30.15 วิธีที่ 2. การใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) ผลการศึกษาพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสม คือ ที่ตำแหน่ง 6.93 กิโลเมตร และ 10.43 กิโลเมตร การใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 8.37 และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียลดลงร้อยละ 30.35 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมด้วยวิธี PSO สามารถช่วยลดกระบวนการจำลองผลและตำแหน่งที่เหมาะสมมีค่าที่ละเอียดมากกว่าวิธีที่ 1 โดยตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมจะขึ้นกับลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า ขบวนนั้น ๆ สามารถประยุกต์แบบจำลองที่นำเสนอในบทความโดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้า ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า และรูปแบบการควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน

คำสำคัญ: การเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Optimal Position and Capacity of Wayside Energy Storage System for Mass Rapid Transit

Natchaphon Sutphrom and Tosaphol Ratniyomchai*

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima

*Corresponding Author, Tel. 044-224400, E mail: tosaphol@sit.ac.th

Abstract

This paper presents an optimal position and capacity of wayside energy storage systems (WESSs) stored a regenerative braking energy for DC mass rapid transit by using a single train simulator. The optimal capacities of 2 WESSs are 4.61 kWh and 5.43 kWh. The study searches for two optimal positions (one each in the first half and the other half of the supply section) to install two WESSs with 2 different methods: (1) manually varying two WESSs' positions with a step of 1 km in order to find the optimal positions, the results showed that the optimal positions stood at 6 and 10 km away from the first passenger station. Energy consumption decrease 8.18% and loss energy decrease 30.15%. (2) using Particle Swarm Optimization (PSO). The objective function considers a minimization of energy consumption and energy losses at substations. The results showed that the optimal positions stood at 6.93 and 10.43 km. Energy consumption decrease 8.37% and loss energy decrease 30.35%. The optimal positions searching by PSO method reduce a process of simulation and get an exact position. Also, the optimal positions and capacities of WESSs were dependent on a train's speed profile and control strategy of energy storage system. To apply a model in this paper to another system by changing parameters and system conditions such as a train's parameters, train's speed profile and control strategy of WESSs.

Keywords: Regenerative Braking, Wayside Energy Storage System, Mass Rapid Transit



1. บทนำ

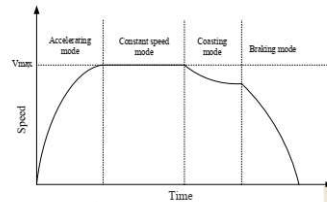
รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเข้ามามีบทบาทที่สำคัญสำหรับเมืองหลวงของหลาย ๆ ประเทศ เนื่องจากรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยล้อเลื่อนบนรางรถไฟซึ่งมีการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานการเคลื่อนที่ต่ำ สามารถเคลื่อนย้ายมวลขนได้มากต่อรถไฟ 1 ขบวน และรถไฟฟ้านับว่าเป็นเทคโนโลยีสะอาดเนื่องจากไม่ก่อให้เกิดมลพิษจากการเผาไหม้ภายในด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนได้รับความนิยมในการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ เช่น การลดพลังงานสูญเสียของระบบ การใช้เทคโนโลยีการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (Regenerative Braking) ร่วมกับการจัดการการเดินรถให้เหมาะสมเพื่อการใช้พลังงานจากการเบรกจ่ายให้กับรถไฟขบวนใกล้เคียงที่ต้องการพลังงานในการเคลื่อนที่ หรือการใช้เทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงานร่วมกับการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานเพื่อสะสมพลังงานดังกล่าว และนำกลับมาใช้เมื่อมีความต้องการใช้พลังงาน เป็นต้น [1] การใช้งานของระบบเก็บสะสมพลังงานขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานบนตัวรถไฟ (on-board) โดยปกติจะติดตั้งไว้บนหลังคา การติดตั้งที่ตำแหน่งสถานีหรือข้างรางวิ่ง (stationary or trackside) เพื่อลดความต้องการกำลังไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าคายอด ชดเชยระดับแรงดันไฟฟ้า ลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม เป็นต้น โดยการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานบนตัวรถจะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟขบวนที่ไม่มีแหล่งจ่ายได้กรณีเคลื่อนที่ผ่านสถานีที่ท้องเที่ยวหรือสถานีที่ประวัติศาสตร์ที่ไม่เหมาะสมกับการติดตั้งระบบจ่ายไฟฟ้า [2]

อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่ใช้ในระบบเก็บสะสมพลังงานสำหรับระบบรถไฟฟ้า เช่น การใช้งานแบตเตอรี่ (battery) เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน [3], [4], [5] การใช้งานล้อตุนกำลัง (flywheel) [3], [6] การศึกษาและนำเสนอการใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) [3], [6], [7], [8] เป็นต้น การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง (Wayside Energy Storage System) ในระบบรถไฟฟ้าเป็นการติดตั้ง

อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานไว้ที่ตำแหน่งระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนหรือริมทางวิ่ง เป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาเรื่องน้ำหนักและพื้นที่การติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนตัวรถไฟ การรถไฟใต้ดินเมืองมาดริด (Madrid de metro) ประเทศสเปน ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางเพื่อเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานโดยใช้เทคโนโลยี Siemens Sitras SES สามารถลดความต้องการพลังงานเฉลี่ยร้อยละ 30 ต่อขบวนรถไฟ [6] การทดสอบระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ใช้เทคโนโลยี GIGACELL สำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในนครนิวยอร์ก สามารถชดเชยแรงดันไฟฟ้าได้ 55 โวลต์ สะสมพลังงานจากการเบรกได้ร้อยละ 71.4 ของพลังงานจากการเบรกทั้งหมด [5] ในประเทศจีน ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้เทคโนโลยี SITRAS-SEC เพื่อป้องกันความผิดพลาดของระบบรถไฟฟ้า Beijing subway line 5 [7] ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานขึ้นกับการควบคุมการทำงานและลักษณะความเร็วของรถไฟ งานวิจัยเล่มนี้ศึกษาการหาตำแหน่งและขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนและพลังงานไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด ใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณและสร้างระบบทดสอบจากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน กรณีศึกษาการรถไฟฟ้าสายสีลม (สายสีเขียวเข้ม) 1 ขบวน

2. การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า เพื่อหาแรงดูดของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนตามลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนต้องการ ส่วนที่ 2 เป็นการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน



รูปที่ 1 โหมดการทำงานขงรถไฟฟ้า

2.1 การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า
การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเริ่มจากการจำลองให้รถไฟฟ้าหยุดนิ่งที่ตำแหน่งสถานีผู้โดยสารต้นทาง รถไฟฟ้าจะทำงานในโหมดเร่งเพื่อเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งไปยังสถานีผู้โดยสารถัดไปด้วยแรงดูดของรถไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) [9]

$$F_T = M\alpha + F_R \quad (1)$$

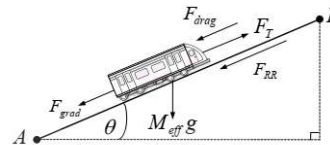
โดยที่ F_T คือ แรงดูดของรถไฟฟ้า (นิวตัน), M คือ มวลรถไฟฟ้า (กิโลกรัม), α คือ ความเร่ง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง) และ F_R คือ แรงต้านทานการเคลื่อนที่ (นิวตัน)

โหมดการทำงานขงรถไฟฟ้าแบ่งตามลักษณะความเร็วเฉพาะขงรถไฟฟ้า สามารถแบ่งโหมดการทำงานขงรถไฟฟ้าได้เป็น 4 โหมด ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย

- โหมดเร่ง (accelerating mode) คือ โหมดการทำงานที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจากภาวะหยุดนิ่งเพื่อเพิ่มความเร็วจนเคลื่อนที่ได้ตามลักษณะความเร็วขงขบวนรถไฟฟ้า โดยความเร่งจะมีค่ามากกว่าศูนย์ และน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความเร่งสูงสุดขงรถไฟฟ้า หรือ $(0 < \alpha \leq \alpha_{acc,max})$

- โหมดความเร็วคงที่ (constant speed mode) คือ โหมดการทำงานที่รถไฟฟ้ารักษาระดับความเร็วให้คงที่ โดยที่ความเร่งเป็นศูนย์ ($\alpha = 0$) ดังนั้นแรงดูดขงรถไฟฟ้าเท่ากับแรงต้านการเคลื่อนที่ หรือ $F_T = F_R$

- โหมดการแล่น (coasting mode) คือ การที่รถไฟฟ้ามีแรงดูดขงรถไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ($F_T = 0$) ดังนั้นรถไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ช้าลงหรือเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงเนื่องจากแรงต้านการเคลื่อนที่ จะได้ $\alpha = -F_R/M$



รูปที่ 2 แผนภาพการเคลื่อนที่ขงรถไฟฟ้า

- โหมดเบรก (braking mode) คือ การลดความเร็วขงรถไฟฟ้าด้วยความหน่วง (deceleration rate) เพื่อเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร หรือการลดความเร็วเพื่อไม่ให้รถไฟฟ้ามีความเร็วเกิดความเร็วที่กำหนดตามลักษณะความเร็วขงรถไฟฟ้า โดยในโหมดนี้ความเร่งจะมีค่าเป็นลบ และมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าความหน่วงสูงสุด หรือ $(\alpha_{dec,max} \leq \alpha < 0)$

แผนภาพการเคลื่อนที่ขงรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2 แรงต้านการเคลื่อนที่ประกอบด้วยแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเสียดทาน (F_{RR}) แรงต้านเนื่องจากความชัน (F_{grad}) และแรงต้านอากาศ (F_{drag}) โดยแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศผู้ผลิตหัวรถจักรนิยมระบุค่าแรงเสียดทาน 2 แรงนี้ในรูปของสมการเดวิส (Davis equation) ดังสมการที่ (2) โดยที่สัมประสิทธิ์ขงสมการเดวิส คือ A (กิโลนิวตัน), B (กิโลนิวตัน-ชั่วโมงต่อกิโลเมตร), C (กิโลนิวตัน-ชั่วโมงกำลังสองต่อกิโลเมตรกำลังสอง) และ v คือ ความเร็วขงรถไฟฟ้าในหน่วยกิโลเมตรต่อชั่วโมง แรงต้านเนื่องจากความชันคำนวณได้ดังสมการที่ (3) [9] โดยที่ g คือ ความเร่งโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง) และ θ คือ มุมที่กระทำกับแนวระดับในหน่วยองศา

$$F_{RR} + F_{drag} = A + Bv + Cv^2 \quad (2)$$

$$F_{grad} = \pm Mg \sin(\theta) \quad (3)$$

อัตราเร็ว (v) ตำแหน่งขงรถไฟฟ้า (s) ที่เคลื่อนที่ในช่วงเวลา Δt และค่านองกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนขงรถไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (4) - (6) ตามลำดับ P_T คือ กำลังไฟฟ้ารถไฟฟ้า η_T คือ ประสิทธิภาพรวมขงรถไฟฟ้า และ P_{max} คือ กำลังไฟฟ้เสริมขงรถไฟฟ้า โดยที่



$P_T > 0$ เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อน และ $P_T < 0$ เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a\Delta t \tag{4}$$

$$s(t + \Delta t) = s(t) + v(t)\Delta t + \frac{1}{2}a(\Delta t)^2 \tag{5}$$

$$P_T = \begin{cases} \frac{F_T \times v(t) + P_{acc}}{\eta_T} & \text{if } F_T \geq 0 \\ \eta_T (F_T \times v(t) + P_{acc}) & \text{if } F_T < 0 \end{cases} \tag{6}$$

รถไฟฟ้าเริ่มทำงานในโหมดเบรกเมื่อระยะห่างจากตำแหน่งของรถไฟต่ำสุดน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะวิกฤติการเบรก (Critical Braking Distance: CBD) ค่าขนาดได้ตั้งสมการที่ (7) [10] โดยที่ $a_{dec,max}$ คือ ความเร่งเป็นลบมากที่สุด หรืออัตราหน่วงสูงสุด (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

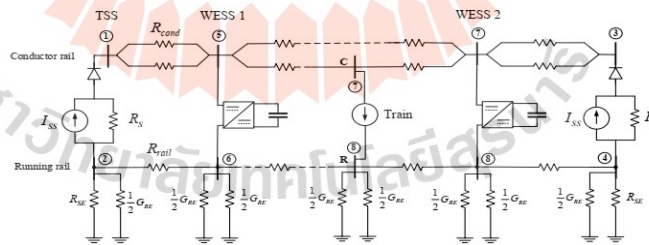
$$CBD = -0.5 \times \frac{v^2}{\alpha_{dec,max}} \tag{7}$$

2.2 การคำนวณผลเฉลี่ยแรงดันของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน

การคำนวณผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนเป็นการคำนวณเพื่อทราบพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าที่มีโหลดตามลักษณะความเร็วและโหมดการทำงานของรถไฟ ส่งผลให้โหลดของระบบไฟฟ้าเป็นโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น สถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟที่กระแสตรงเป็นสถานีเรียงกระแสที่กระแสไฟฟ้าไหลออกจากสับบาร์ชั่วคราวเท่านั้น และกระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลย้อนกลับได้เนื่องจากคุณลักษณะของไดโอดเรียงกระแส [9] การสร้างแบบจำลองของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน

กระแสตรงใช้แบบจำลอง Multi-conductor system ดังแสดงในรูปที่ 3 ประกอบไปด้วยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (TSS) ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (WESS) จำนวน 2 ชุด และรถไฟ (Train) แบบจำลอง Multi-conductor system ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อประเมินแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งและกระแสไฟฟ้ารั่วไหลเนื่องจากรางวิ่งเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ผลต่างแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลไปยังโครงสร้างโลหะใต้ดินใกล้เคียง ซึ่งส่งผลเสียต่อโครงสร้างโลหะ [11]

แบบจำลองระบบรถไฟที่มีรางตัวนำและรางวิ่ง 2 ราง คือ รางขาไป (up-track) และรางขากลับ (down-track) โดยที่ R_{cond} คือ ความต้านทานรางตัวนำไฟฟ้า R_{rail} คือ ความต้านทานรางวิ่ง R_s คือ ความต้านทานลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน R_{se} คือ ความต้านทานที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน G_{RE} คือ ค่าความนำไฟฟ้าของรางเทียบกับดิน และ I_s คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน สามารถคำนวณความต้านทานรางตัวนำไฟฟ้า ($R_{cond,p-q}$) ระหว่างโนด p และ q ดังสมการที่ (8)-(9) ถ้าตำแหน่งระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนใด ๆ ไม่มีโนดรถไฟที่อยู่ระหว่างสถานีไฟฟ้า จะได้ค่าความต้านทานรางตัวนำเท่ากับสมการที่ (8) และถ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนใด ๆ มีโนดรถไฟที่อยู่ระหว่างสถานีไฟฟ้า จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (9) โดยที่ $R_{cond,p-q}$ และ d_{p-q} คือความต้านทานตัวนำไฟฟ้า (โอห์ม) และระยะห่าง (เมตร) ระหว่างโนด p ถึงโนด q ตามลำดับ R_{line} คือ ค่าความต้านทานตัวนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว (โอห์มต่อเมตร) [9]



TSS: Traction Substation
WESS: Wayside Energy Storage Unit

รูปที่ 3 ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบ Multi-conductor system



$$R_{cond,p-q} = \frac{1}{2}(d_{p-q} \times R_{line}) \quad (8)$$

$$R_{cond,p-q} = d_{p-q} \times R_{line} \quad (9)$$

ความต้านทานรางวิ่ง ($R_{rail,p-q}$) ระหว่างโนด p และ q สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (10) [12] โดยที่ R_{rail} คือ ค่าความต้านทานรางวิ่งต่อหน่วยความยาวในหน่วยโอห์มต่อเมตร

$$R_{rail,p-q} = \frac{d_{p-q} \times R_{rail}}{2} \quad (10)$$

• แบบจำลองสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

แบบจำลองสถานีไฟฟ้ากระแสตรงแทนด้วยวงจรสมมูลนอร์ตันดังรูปที่ 4(ก) สัญลักษณ์ไดโอดบ่งบอกว่าเป็นสถานีไฟฟ้าที่มีกระแสไหลได้ทิศทางเดียว และไม่สามารถไหลย้อนกลับได้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเพื่อจ่ายไปยังโหลดขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (V_{SS}) หรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างโนดตัวนำไฟฟ้า (C) และรางวิ่ง (R) สามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (I_{SS}) ดังสมการที่ (11) [9]

$$I_{SS} = I_S - \frac{V_{SS}}{R_S} \quad (11)$$

• แบบจำลองรถไฟ

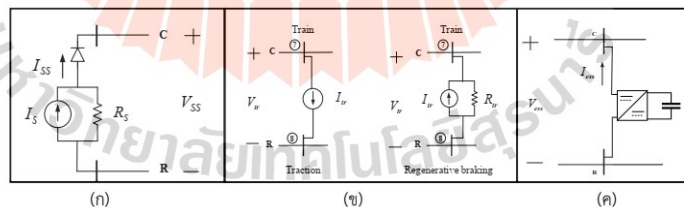
แบบจำลองของรถไฟที่พิจารณาต่างกัน 2 กรณีดังรูปที่ 4(ข) คือ กรณีที่มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนทำงานในโหมดขับเคลื่อนและโหมดการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน

(Regenerative braking) โดยการเบรกจ่ายคืนพลังงาน คือ การที่มอเตอร์ไฟฟ้าทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รถไฟฟ้าเบรกและจ่ายพลังงานย้อนกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบจำลองรถไฟจะเป็นแบบจำลองแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อขนานกับความต้านทานรถไฟไฟฟ้า เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อน แบบจำลองรถไฟจะเป็นแบบจำลองแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า สามารถคำนวณกระแสรถไฟ (I_r) ได้จากสมการที่ (12) โดยที่ P_T คือ กำลังไฟฟ้าของรถไฟในสมการที่ (6) กระแสรถไฟที่มีค่าเป็นบวกเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อน และมีค่าเป็นลบเมื่อรถไฟฟ้าเบรก V_{load} คือ แรงดันไฟฟ้าที่โนดรถไฟ และ V_{load} คือ แรงดันไฟฟ้าไว้โหลดของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน ความต้านทานรถไฟขณะใด ๆ (R_r) เมื่อรถไฟฟ้าเบรกสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (13)

$$I_r = \begin{cases} \frac{P_T}{V_r} & \text{Tractive} \\ \frac{P_T}{V_{load}} & \text{Braking} \end{cases} \quad (12)$$

$$R_r = \frac{V_{load}}{I_r} = \frac{(V_{load})^2}{P_r} \quad (13)$$

การเบรกของรถไฟในงานวิจัยนี้พิจารณาการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานร่วมกับการเบรกแบบพลวัต โดยพลังงานที่จ่ายคืนให้กับระบบไฟฟ้าจะต้องไม่ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่โนดรถไฟมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด U_{min2} ตามมาตรฐาน EN 50163 หรือมีแรงดันไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 500 โวลต์ สำหรับระบบรถไฟกระแสตรง 750 โวลต์



รูปที่ 4 แบบจำลองในระบบไฟฟ้า (ก) แบบจำลองสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (ข) แบบจำลองรถไฟ (ค) แบบแบบจำลองระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทาง



• **แบบจำลองระบบเก็บสะสมพลังงาน**

การพิจารณาระบบเก็บสะสมพลังงานแบบปริมาตรในงานวิจัยนี้พิจารณาตำแหน่งติดตั้งระหว่างเส้นทางกริ่งของรถไฟฟ้า และไม่ใช่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบปริมาตรเพื่อเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานของรถไฟฟ้าและนำพลังงานดังกล่าวกลับมาช่วยจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าได้อีกครั้ง แทนการทำให้พลังงานจากการเบรกสูญเสียในรูปของความร้อนผ่านตัวต้านทานการเบรก หรือการเบรกแบบพลวัต งานวิจัยนี้พิจารณาระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน ตั้งแบบจำลองในระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4(ค) โดยที่ I_{ess} คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกหรือรับเข้าระบบเก็บสะสมพลังงานและ V_{ess} คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสระบบเก็บสะสมพลังงาน แบบจำลองดังกล่าวเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า หรือรับกระแสไฟฟ้าตามการควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน งานวิจัยนี้ใช้การควบคุมด้วยวิธีการควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC เป็นการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า และการรับกระแสไฟฟ้าด้วยระดับความต่างของแรงดันไฟฟ้า (ΔV) ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่บัสระบบเก็บสะสมพลังงาน (V_{ess}) และแรงดันไฟฟ้าโวลต์ (V_{noload}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (14) ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงาน (I_{ess}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (15) – (19) [13] การควบคุมแบ่งการทำงานออกเป็น 2 โหมด ได้แก่

(1) โหมดการจ่ายพลังงาน (Discharging) ระบบเก็บสะสมพลังงานจะจ่ายกระแสไฟฟ้าเท่ากับ $I_{ess, disc}$ เมื่อผลต่างแรงดันไฟฟ้า ΔV มากกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าต่ำสุด ($\Delta V_{disc, min}$) เมื่อ m_d คือ คุณลักษณะความชันของการจ่ายกระแสไฟฟ้า $I_{disc, min}$ คือ พิกัดจ่ายกระแสไฟฟ้าต่ำสุด $I_{disc, max}$ คือ พิกัดจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุด และจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่เมื่อ ΔV มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุด ($\Delta V_{disc, max}$)

(2) โหมดการสะสมพลังงาน (Charging) ระบบเก็บสะสมพลังงานจะรับกระแสไฟฟ้าเท่ากับ $I_{ess, char}$ เมื่อผลต่างแรงดันไฟฟ้า ΔV มากกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้ารับกระแสไฟฟ้าต่ำสุด ($\Delta V_{char, min}$) ระบบเก็บสะสมพลังงานรับกระแสไฟฟ้ามากที่สุดและมีค่าคงที่ เมื่อ ΔV มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันรับกระแสไฟฟ้าสูงสุด ($\Delta V_{char, max}$) เมื่อ m_c คือ คุณลักษณะความชันของการรับกระแสไฟฟ้า โดยที่ $I_{char, max}$ และ $I_{char, min}$ คือ พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด

ของระบบเก็บสะสมพลังงานในโหมดการสะสมพลังงานตามลำดับ เมื่อผลต่างแรงดัน ΔV ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขการทำงาน กระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานมีค่าเท่ากับศูนย์ แผนภาพการควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC แสดงดังรูปที่ 5

$$\Delta V = |V_{noload} - V_{ess}| \quad (14)$$

- ทำงานในโหมด Discharging

$$I_{ess, disc} = m_d (\Delta V - \Delta V_{disc, min}) \quad (15)$$

$$m_d = \frac{I_{disc, max} - I_{disc, min}}{\Delta V_{disc, max} - \Delta V_{disc, min}} \quad (16)$$

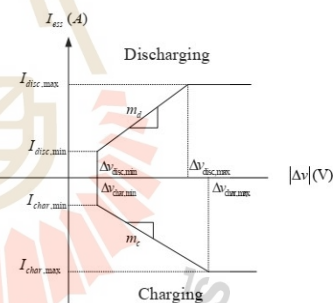
- ทำงานในโหมด Charging

$$I_{ess, char} = m_c (\Delta V - \Delta V_{char, min}) \quad (17)$$

$$m_c = \frac{I_{char, max} - I_{char, min}}{\Delta V_{char, max} - \Delta V_{char, min}} \quad (18)$$

- เมื่อไม่อยู่ในเงื่อนไขการทำงาน

$$I_{ess} = 0 \quad (19)$$



รูปที่ 5 การควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC

• **การคำนวณผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีฉีดกระแสไฟฟ้า (Current injection method)**

การคำนวณด้วยวิธีฉีดกระแสไฟฟ้าใช้หลักการคำนวณแบบโนด วิธีกริดกระแสไฟฟ้าถูกพัฒนาขึ้นสำหรับคำนวณระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงโดยเฉพาะ โดยใช้สมการกระแสสมดุลเพื่อลดความซับซ้อนและผลเฉลี่ย



แรงดันไฟฟ้ามีความชันสูง [9] สมการการไหลของกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่บัสใด ๆ นำเสนอดังสมการที่ (20) โดยที่ V_k คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ $I_{z,k}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (กรณีพิจารณาบัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน) $P_{T,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ และ $G_{k,i}$ คือ เมทริกซ์คอนดักแตนซ์ของตัวนำไฟฟ้าระหว่างบัส k และบัส i [9]

$$\sum_{i=1}^N G_{k,i} V_i = I_{z,k} - \frac{P_{T,k}}{V_k} \quad (20)$$

เมทริกซ์คอนดักแตนซ์ประกอบด้วย $[G_z]$ คือ เมทริกซ์ย่อยคอนดักแตนซ์ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน $[G_{pp}]$ คือ เมทริกซ์ย่อยคอนดักแตนซ์ของตัวนำไฟฟ้าระหว่างบัส p ถึงบัส q และ $[G_{pq}]$, $[G_{qq}]$ คือ เมทริกซ์ย่อยคอนดักแตนซ์ระหว่างรางวิ่งถึงกราวด์ ดังสมการที่ (21) – (24) และสมการที่ (20) [14] ในรูปของสมการเมทริกซ์แสดงดังสมการที่ (25) [14]

$$[G_z] = \begin{bmatrix} G_{z1}^{(C,C)} & G_{z1}^{(C,R)} \\ G_{z1}^{(R,C)} & G_{z1}^{(R,R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_N} & -\frac{1}{R_N} \\ -\frac{1}{R_N} & \frac{1}{R_N} + \frac{1}{R_{sc}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$[G_{pq}] = \begin{bmatrix} G_{pq}^{(C,C)} & G_{pq}^{(C,R)} \\ G_{pq}^{(R,C)} & G_{pq}^{(R,R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{cond}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{cond}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[G_{pp}]_{RE} = \begin{bmatrix} G_{pp}^{(C,C)} & G_{pp}^{(C,R)} \\ G_{pp}^{(R,C)} & G_{pp}^{(R,R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} G_{RE} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[G_{qq}]_{RE} = [G_{pp}]_{RE} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11}^{(C,C)} & G_{11}^{(C,R)} \\ G_{11}^{(R,C)} & G_{11}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{12}^{(C,C)} & G_{12}^{(C,R)} \\ G_{12}^{(R,C)} & G_{12}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} G_{1N}^{(C,C)} & G_{1N}^{(C,R)} \\ G_{1N}^{(R,C)} & G_{1N}^{(R,R)} \end{bmatrix} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} G_{N1}^{(C,C)} & G_{N1}^{(C,R)} \\ G_{N1}^{(R,C)} & G_{N1}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \dots & \dots & \begin{bmatrix} G_{NN}^{(C,C)} & G_{NN}^{(C,R)} \\ G_{NN}^{(R,C)} & G_{NN}^{(R,R)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1^{(C)} \\ P_1^{(R)} \\ P_2^{(C)} \\ \vdots \\ P_N^{(C)} \\ P_N^{(R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^{(C)} - \frac{P_{T1}}{V_1} \\ -I_1^{(R)} + \frac{P_{T1}}{V_1} \\ I_2^{(C)} - \frac{P_{T2}}{V_2} \\ -I_2^{(R)} + \frac{P_{T2}}{V_2} \\ \vdots \\ I_N^{(C)} - \frac{P_{TN}}{V_N} \\ -I_N^{(R)} + \frac{P_{TN}}{V_N} \end{bmatrix} \quad (25)$$

การหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบของการคำนวณขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- (1) เริ่มต้นการคำนวณกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสตัวนำเท่ากับแรงดันโวลต์ของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน และแรงดันไฟฟ้าที่รางเท่ากับศูนย์
- (2) สร้างเมทริกซ์คอนดักแตนซ์ และเมทริกซ์กระแสไฟฟ้าของระบบ
- (3) กำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่บัสระบบเก็บสะสมพลังงานสำหรับรอบการคำนวณใด ๆ เป็นไปตามการควบคุม ดังรูปที่ 5 แต่สำหรับรอบการคำนวณที่ 1 กำหนดให้กระแสไฟฟ้านี้มีค่าเท่ากับศูนย์
- (4) คำนวณหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าจากสมการที่ (25)
- (5) ถ้าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของรอบการคำนวณใด ๆ มีความมากกว่าแรงดันไฟฟ้าโวลต์ หรือมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต้องตัดโหนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนดังกล่าวออกจากแบบจำลอง และกลับไปคำนวณตั้งข้อที่ (2) ถ้าไม่เป็นไปตามข้อ (5) อัปเดตค่าแรงดันไฟฟ้าในรอบที่ผ่านมาด้วยผลเฉลยที่คำนวณได้
- (6) คำนวณความคลาดเคลื่อนระหว่างผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน
- (7) ถ้าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าที่ยอมรับได้หรือแรงดันไฟฟ้าในระบบต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (500 โวลต์) กรณีรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก เริ่มการคำนวณในตำแหน่งถัดไปของรถไฟฟ้าและกลับไปคำนวณที่ข้อ (1)



2.3 การหาขนาดที่เหมาะสมของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแบบปริมาตร

การออกแบบขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน โดยทั่วไปจะให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงาน และแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีค่าไม่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด [15] หรือจ่ายพลังงานให้สถานะประจุ่มีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 25 ความลึกการคายประจุสูงสุดเท่ากับร้อยละ 75 พลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (E_{sc}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (26) และพลังงานที่สามารถจ่ายได้ของระบบเก็บสะสมพลังงาน ($E_{sc,usable}$) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (27)

$$E_{sc} = \frac{1}{2} c_{sc} v_{sc}^2 \quad (26)$$

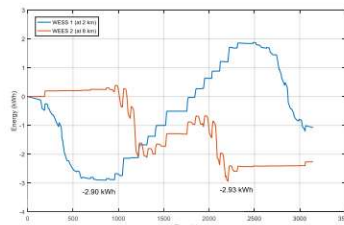
$$E_{sc,usable} = \frac{1}{2} c_{sc} [v_{sc,max}^2 - (0.5v_{sc,max})^2] \quad (27)$$

โดยที่ c_{sc} คือ ค่าประจุไฟฟ้าในหน่วยฟารัด และ v_{sc} และ $v_{sc,max}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะใด ๆ และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ตามลำดับ สถานะประจุ่ม (State of Charge: SOC) และความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge: DOD) ของระบบเก็บสะสมพลังงาน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (28) - (29)

$$SOC = \frac{E_{sc}}{E_{sc,max}} \times 100 \quad (28)$$

$$DOD = \left(1 - \frac{SOC}{100}\right) \times 100 \quad (29)$$

การออกแบบขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานพิจารณาจากขนาดของพลังงานที่จ่ายออกค่าสุดของระบบเก็บสะสมพลังงาน โดยให้พลังงานดังกล่าวเท่ากับร้อยละ 75 ของขนาดตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้ในระบบเก็บสะสมพลังงาน ตัวอย่างเช่น พลังงานที่จ่ายออกและรับเข้าของระบบเก็บสะสมพลังงานเมื่อติดตั้งที่ตำแหน่ง 2 กิโลเมตร และ 8 กิโลเมตร จากสถานีผู้โดยสารแรก แสดงดังรูปที่ 6 จากตัวอย่างดังกล่าว ขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ต้องติดตั้งที่ตำแหน่ง 2 กิโลเมตร และ 8 กิโลเมตร จะเท่ากับ 3.87 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ 3.91 กิโลวัตต์-ชั่วโมงตามลำดับ



รูปที่ 6 พลังงานที่จ่ายออกและรับเข้าของระบบเก็บสะสมพลังงานเทียบกับเวลา

3. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization)

เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) เป็นเทคนิคการทำงานที่คล้ายการเคลื่อนที่ของฝูงนก หรือฝูงปลา โดยคำตอบของกลุ่มอนุภาคจะเคลื่อนที่ไปตามอนุภาคที่มีค่าตอบใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมที่สุด เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดดังกล่าวมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุดอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีการแบ่งปันข้อมูลร่วมกันระหว่างอนุภาค [16] กลุ่มอนุภาคประกอบไปด้วยอนุภาคย่อย แต่ละอนุภาคเป็นตัวหนึ่งของคำตอบที่ต้องการค้นหา การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสรุปได้ดังต่อไปนี้

- (1) ทำการสุ่มตำแหน่งแต่ละอนุภาคในกลุ่มประชากร (\vec{p}_i) และสุ่มความเร็วของแต่ละอนุภาค (\vec{v}_i)
- (2) ประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละอนุภาค โดยอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดจะถูกบันทึกเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคไว้
- (3) ปรับปรุงความเร็วของอนุภาคดังสมการที่ (30) โดยที่ p_p และ p_g เป็นตัวแปรสุ่ม $\vec{p}_{pbest,i}$ และ $\vec{p}_{gbest,i}$ คือ ค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง และของอนุภาค ตามลำดับ

$$\vec{v}_i(t) = \vec{v}_i(t-1) + p_p [\vec{p}_{pbest,i} - \vec{p}_i(t)] + p_g [\vec{p}_{gbest,i} - \vec{p}_i(t)] \quad (30)$$
- (4) ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค ดังสมการที่ (31)

$$\vec{p}_i(t) = \vec{p}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad (31)$$
- (5) ทำการปรับค่าตัวแปรเวลา $t = t + 1$



(6) วนรอบการทำงานจนกระทั่งเป็นไปตามเงื่อนไขหยุดที่ยอมรับได้

การหาตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ หาตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ส่งผลให้ระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถช่วยจ่ายพลังงานตามการควบคุมการทำงานเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนให้มีค่าน้อยที่สุด และเกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่น้อยที่สุด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สมการที่ (32) โดยที่ $v_{sub,n}$ และ $i_{sub,n}$ คือ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ n ใด ๆ พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (E_{loss}) ที่พิจารณา ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานที่ไม่สามารถเก็บสะสมในระบบเก็บสะสมพลังงานได้ ($E_{b,waste}$) และพลังงานสูญเสียเนื่องจากความต้านทานภายในตัวนำ ($E_{loss,line}$) ดังสมการที่ (33)

$$E = \sum_{n=0}^{N_{sub}} \int_0^T v_{sub,n}(t) \cdot i_{sub,n}(t) dt + E_{loss} \quad (32)$$

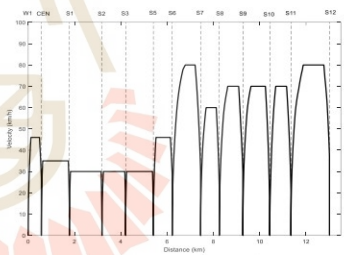
$$E_{loss} = E_{b,waste} + E_{loss,line} \quad (33)$$

4. ผลการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
กระแสตรง

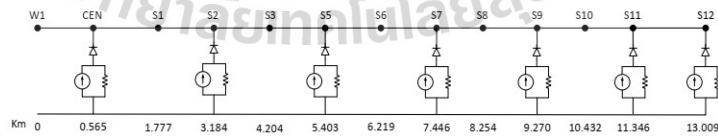
การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางที่ติดตั้งตำแหน่งระหว่างเส้นทางวิ่งของรถไฟฟ้า ตำแหน่งติดตั้งส่งผลต่อพฤติกรรมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เช่น การติดตั้งที่ตำแหน่งเกิดแรงดันไฟฟ้าตกเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้า การติดตั้งที่ตำแหน่งใกล้กับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เพื่อให้ขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานมีขนาดเล็ก ส่งผลให้ต้นทุนในการติดตั้งต่ำ [17], [15] การติดตั้งที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างสถานี เพื่อลดพลังงานสูญเสียและลดการใช้พลังงานจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน [18], [19] เป็นต้น

ขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ติดตั้งเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง โดยการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่เหมาะสมไม่ควรมีขนาดใหญ่เกินไป จะส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่สูง หรือการพิจารณาความลึกของการคายประจุของระบบเก็บสะสมพลังงานเพื่อการใช้งานอย่างเต็มประสิทธิภาพ [20] เป็นต้น

งานวิจัยนี้ศึกษาการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทาง เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนน้อยที่สุด และลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบด้วยการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 1 ขบวน เคลื่อนที่จากสถานีต้นทางถึงสถานีปลายทาง และเคลื่อนที่กลับมาที่สถานีต้นทางอีกครั้ง พลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่พิจารณา ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการเบรกหรือพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถเก็บสะสมในระบบเก็บสะสมพลังงานได้ และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานตัวนำไฟฟ้า พารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 1 และลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 7 รถไฟฟ้าเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 13 กิโลเมตร 13 สถานีผู้โดยสาร (W1 ถึง S12) ตำแหน่งสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า



รูปที่ 8 ตำแหน่งสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน



ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าที่ใช้แบบจำลอง

Train parameters			Power system parameter		
Weight	228 ton		No load voltage	790 Vdc	
Movement Feature	Max. speed	80 km/h	Resistance	Third rail resistance (m Ω /km)	8.23
	Max. acceleration	0.87 m/s ²		Running rail resistance (m Ω /km)	40.46
	Max. deceleration	1 m/s ²		Conductivity to earth (S/km)	0.10
Efficiency	84.50%		Short circuit resistance (m Ω)	14.70	
Auxiliary power	Constant load	270 kW			
Train resistance	a = 4025, b = 118.67, c = 0.871				

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์การควบคุม Piece-wise Linear SOC

Discharging					Charging				
m_d	$I_{disc,min}$ (A)	$I_{disc,max}$ (A)	$\Delta V_{disc,min}$ (V)	$\Delta V_{disc,max}$ (V)	m_c	$I_{char,min}$ (A)	$I_{char,max}$ (A)	$\Delta V_{char,min}$ (V)	$\Delta V_{char,max}$ (V)
11.4	0	1000	2	158	6.3	10	1000	0	158

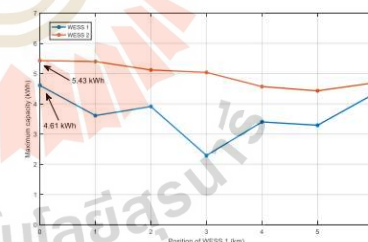
● ผลการหาขนาดที่เหมาะสมของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด ได้แก่ ชุดแรกอยู่ระหว่างครึ่งแรกของเขตจ่ายไฟฟ้า หรือระยะทางระหว่าง 0 – 6 กิโลเมตร จากสถานีผู้โดยสารแรก และชุดที่สองอยู่ในระยะทางครึ่งหลังของเขตจ่ายไฟฟ้า หรือระยะทางระหว่าง 7 – 13 กิโลเมตร จำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน เช่น กรณีชุดที่ 1 ติดตั้งที่ตำแหน่ง 0 กิโลเมตร จำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 2 ตั้งแต่ตำแหน่งที่ 7 กิโลเมตร – 13 กิโลเมตร และกรณีชุดที่ 1 ติดตั้งที่ตำแหน่ง 1 กิโลเมตร จะจำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 2 ตั้งแต่ตำแหน่งที่ 7 กิโลเมตร – 13 กิโลเมตร เช่นเดียวกัน ผลการออกแบบขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานใหญ่ที่สุดเมื่อระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 1 ติดตั้งที่ตำแหน่งใด ๆ แสดงดังรูปที่ 9 เพื่อให้ระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถจ่ายพลังงานได้สูงสุดทุกกรณี ขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานเท่ากับ 4.61 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ 5.43 กิโลวัตต์-ชั่วโมง สำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางชุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

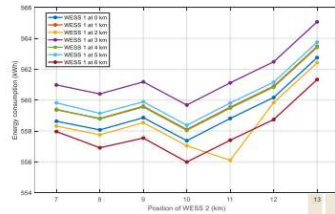
● การเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด

จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยกำหนดสถานะประจุเริ่มต้นของระบบเก็บสะสมพลังงานเท่ากับร้อยละ 100 ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด ได้แก่ ชุดแรกอยู่ระหว่างครึ่งแรกของเขตจ่ายไฟฟ้า และชุดที่สอง

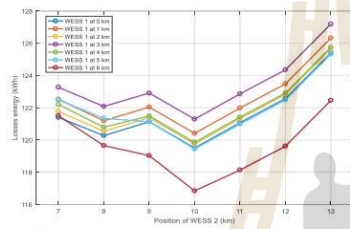
อยู่ระหว่างครึ่งหลังของเขตจ่ายไฟฟ้า พารามิเตอร์ควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน แสดงดังตารางที่ 2 จากผลการจำลองติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด ด้วยขนาดเท่ากับ 4.61 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ 5.43 กิโลวัตต์-ชั่วโมง การใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียแสดงดังรูปที่ 10 – 11 ตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 556 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุดเท่ากับ 116.84 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 1 ที่ตำแหน่ง 6 กิโลเมตร และชุดที่ 2 ที่ตำแหน่ง 10 กิโลเมตร



รูปที่ 9 ขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงาน



รูปที่ 10 การใช้พลังงานสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (กรณีเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง)

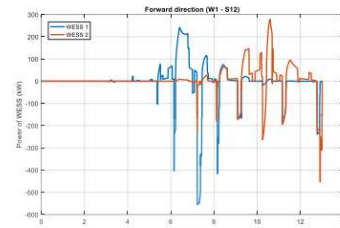


รูปที่ 11 พลังงานสูญเสีย (กรณีเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง)

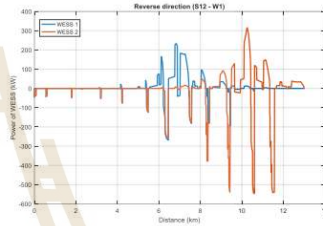
● การใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

พหุวิธีสำหรับแก้ปัญหาหาค่าเหมาะที่สุด กำหนดให้จำนวนอนุภาคเท่ากับ 2 ขนาดของกลุ่มประชากรเท่ากับ 20 จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB หาดำแหน่งที่เหมาะสมด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคทั้งหมด 20 ครั้ง เพื่อหาผลเฉลยที่ดีที่สุด กำหนดขนาดระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางเท่ากับ 4.61 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ 5.43 กิโลวัตต์-ชั่วโมง สำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางชุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด จากการใช้เทคนิค PSO คือ ตำแหน่ง 6.93 กิโลเมตร และ 10.43 กิโลเมตร จากสถานีผู้โดยสารแรก

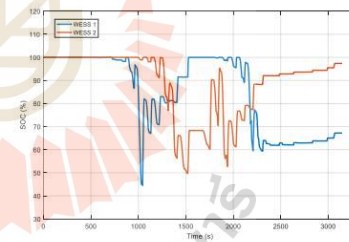
กำหนดสถานะประจุเริ่มต้นของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานเท่ากับร้อยละ 100



รูปที่ 12 กำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทาง กรณีเคลื่อนที่จาก W1 ถึง S12



รูปที่ 13 กำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทาง กรณีเคลื่อนที่จาก S12 ถึง W1



รูปที่ 14 สถานะประจุของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน

ตารางที่ 3 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า กรณีมีและไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทาง

Case	E _{batt} (kWh)	E _{charge} (kWh)		E _{discharge} (kWh)		E _{loss, line} (kWh)	E _{loss, wate} (kWh)	DOD _{max} (%)		SOC _{end} (%)	
		WESS 1	WESS 2	WESS 1	WESS 2			WESS 1	WESS 2	WESS 1	WESS 2
Without WESS	605.54	-	-	-	-	17.03	150.25	-	-	-	-
With WESS	554.83	6.64	9.30	8.15	9.44	16.00	100.51	55.51	50.22	67.21	97.39



ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้าสายสีลมกรณีไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางแสดงดังตารางที่ 3 จากผลการจำลอง การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนลดลง 50.71 กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือสามารถลดการใช้พลังงานได้ร้อยละ 8.37 พลังงานสูญเสียจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานลดลง 50.77 กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 30.35 รูปที่ 12 – 13 แสดงกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง กรณีรถไฟไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานีผู้โดยสาร W1 ถึง S12 และกรณีเคลื่อนที่จากสถานีผู้โดยสาร S12 ถึง W1 ตามลำดับ จากรูป กำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานมีค่าเป็นบวกเมื่อระบบเก็บสะสมพลังงานจ่ายพลังงาน และมีค่าเป็นลบกรณีระบบเก็บสะสมพลังงานสะสมพลังงาน ระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ในช่วงระยะทาง 3 กิโลเมตร ก่อนและหลังตำแหน่งติดตั้ง หรือระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เป็นช่วงระยะทาง 6 กิโลเมตร เมื่อระบบเก็บสะสมพลังงานมีพารามิเตอร์ควบคุมการทำงานดังตารางที่ 2 สถานะประจุของระบบเก็บสะสมพลังงานทั้งสองชุดตลอดการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 14 ระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 1 และ 2 มีความลึกการคายประจุสูงสุดร้อยละ 55.51 แลร้อยละ 50.22 ตามลำดับ สถานะประจุสุดท้ายเมื่อรถไฟไฟฟ้าเคลื่อนที่กลับมาที่สถานีผู้โดยสารแรกอีกครั้งเท่ากับร้อยละ 67.21 แลร้อยละ 97.39

5. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางของระบบรถไฟฟ้ามวลชนกระแสตรง โดยการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามวลชนทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ใช้ข้อมูลของรถไฟฟ้ามวลชนสายสีลมเป็นกรณีศึกษา ขนาดที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด ได้แก่ 4.61 และ 5.43 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ศึกษาการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ตำแหน่ง ผลการจำลองพบว่าตำแหน่งที่ส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและเกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุดเมื่อติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่งกิโลเมตรที่ 6 และ 10 จากสถานีไฟฟ้าต้นทาง (W1) เมื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมด้วยวิธีกระจายการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานทุก ๆ 1 กิโลเมตร การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

ลดลงร้อยละ 8.18 และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียลดลงร้อยละ 30.15 กรณีใช้วิธี PSO สามารถระบุตำแหน่งติดตั้งได้ละเอียดมากกว่า ผลการหาตำแหน่งที่เหมาะสม คือ ตำแหน่ง 6.93 กิโลเมตร และ 10.43 กิโลเมตร การใช้พลังงานจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนลดลงร้อยละ 8.37 และพลังงานสูญเสียลดลงร้อยละ 30.35 ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางของระบบรถไฟฟ้ามวลชนกับลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้ามวลชนนั้น ๆ เนื่องจากลักษณะความเร็วที่เปลี่ยนแปลงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนเปลี่ยนแปลง หรือกล่าวได้ว่าระบบรถไฟฟ้ามวลชนที่มีลักษณะความเร็วที่ต่างกันมีตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่แตกต่างกัน สามารถประยุกต์แบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้เพื่อหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมสำหรับระบบรถไฟฟ้ามวลชนกระแสตรงที่มีลักษณะความเร็วเฉพาะโดยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้ามวลชนและระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน รูปแบบการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน และลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้ามวลชน

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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," *2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies 2017 AEDCEE*, pp. 795-800, 2017.
- [2] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen and P. Tricoli, "Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways," *IET Electrical Systems in Transportation*, pp. 9-20, 2013.
- [3] A. Okui, S. Hase, H. Shigeeda, T. Konishi and T. Yoshi, "Application of energy storage system for railway transportation in Japan," in *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA*, Sapporo, Japan, 2010.



- [4] H. Hayashiya, T. Suzuki, M. Hino, D. Hara, M. Tojo, S. Shimada, K. Kudo, T. Kato and H. Takahashi, "Effect evaluation of Li-ion battery for regenerative energy utilization in traction power supply system," in *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE- Europe)*, Geneva, Switzerland, 2015.
- [5] K. Ogura, K. Nishimura, T. Matsumura, C. Tonda, E. Yoshiyama, M. Andriani, W. Francis, R. A. Schmitt, A. Visgotis and N. Gianfrancesco, "Test Results of a High Capacity Wayside Energy Storage System Using Ni-MH Batteries for DC Electric Railway at New York City Transit," in *2011 IEEE Green Technologies Conference (IEEE-Green)*, Baton Rouge, LA, USA, 2011.
- [6] P. Radcliffe, J. S. Wallace and L. H. Shu, "Stationary applications of energy storage technologies for transit systems," in *2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference*, Halifax, NS, Canada, 2010.
- [7] Z. Yang, H. Xia, B. Wang and F. Lin, "An overview on braking energy regeneration technologies in Chinese urban railway transportation," in *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)*, Hiroshima, Japan, 2014.
- [8] A. Castaigns, H. Caron, H. Kharrat, A. Ovalle and B. Vulturescu, "Energy Storage System based on Supercapacitors for a 750 V DC railway power supply," in *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Nottingham, UK, 2018.
- [9] T. Kulworawanichpong, *Railway Electrification*, Nakhon Ratchasima: The Center for Library Resources and Educational Media, 2018 (in Thai).
- [10] C. Sumpavakup and T. Kulworanichpong, "Optimizing Train Speed Profile for A Mass Transit System Using Differential Evolution," *The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage*, vol. 25, no. 4, pp. 59-69, 2014 (in Thai).
- [11] K. Mongkoldee, U. Leeton and T. Kulworawanichpong, "Single train movement modelling and simulation with rail potential consideration," *2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2016.
- [12] A. Finlayson, C. J. Goodman and R. D. White, "Investigation into the computational techniques of power system modelling for a DC railway," *WIT Transaction on The Built Environment*, 2006.
- [13] T. Ratniyomchai, *Optimal Design and Control of Stationary Electrochemical Double-Layer Capacitors for Light Railways*, Birmingham, 2016.
- [14] C. Sumpavakup, *Peak-cutting Strategy for Regenerative Energy Management Incorporating EDLC in Mass Rapid Transit*, 2017 (in Thai).
- [15] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen and P. Tricoli, "Optimal capacity and positioning of stationary supercapacitors for light rail vehicle systems," in *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Ischia, Italy, 2014.
- [16] A. Srikaew, *Computational Intelligence*, Bangkok, 2009 (in Thai).
- [17] V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber and A. Piccolo, "Siting and sizing of stationary SuperCapacitors in a Metro Network," *AET Annual Conference 2013*, 2013.



- [18] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen and P. Tricoli, "Energy loss minimisation by optimal design of stationary supercapacitors for light railways," *2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 2015.
- [19] V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber and A. Piccolo, "Optimal siting and sizing of stationary supercapacitors in a metro network using PSO," *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015.
- [20] U. Sirmelis, J. Zakis and L. Grigans, "Optimal supercapacitor energy storage system sizing for traction substations," *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 2015.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวนัชพร สุตพรหม เกิดเมื่อวันที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2539 ที่อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับ 1 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2560 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2560 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้เป็นผู้สอนในรายวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลงานตีพิมพ์ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ก



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี