

การจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานในรถไฟฟ้
ขนส่งมวลชนกระแสดรง



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

OPTIMAL TIMETABLING FOR ENERGY SAVING IN DC
MASS RAPID TRANSIT



SUMET YOOYONG

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 2021

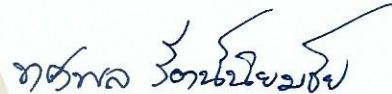
การจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานในรถไฟฟ้า
ขนส่งมวลชนกระแสดตรง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์)
ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.ฉันทชัย กุลสุวรรณิชพงษ์)
กรรมการ



(รศ. ดร.กীরติ ชยะกุลคีรี)
กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุเมธ อยู่ยง : การจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานในรถไฟฟ้าขนส่ง
มวลชนกระแสดตรง (OPTIMAL TIMETABLING FOR ENERGY SAVING IN DC MASS RAPID
TRANSIT) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตนนิยมชัย, 127 หน้า.

คำสำคัญ : เบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน/แบบจำลองรถไฟฟ้าหลายขบวน/การจัดตารางเวลา/ตัวนำเดี่ยว

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานใน
รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรง เพื่อนำพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกมาแบ่งปันพลังงาน
ให้กับรถไฟที่กำลังเร่งในระบบร่วมกับการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด เพื่อเพิ่มการใช้พลังงานเบรกจ่าย
คืนที่ได้จากการเบรกและลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีศึกษารถไฟฟ้า
BTS สายสีลม โดยการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแบบหลายขบวน ใช้โครงข่ายไฟฟ้า
แบบตัวนำเดี่ยว ด้วยโปรแกรม MATLAB การจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดสามารถเพิ่มช่วงเวลา
ชิงโครโนส์ระหว่างการเร่งและเบรกของรถไฟได้ ส่งผลให้สามารถลดการจ่ายพลังงานโดยสถานีไฟฟ้า
ขับเคลื่อนได้ ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด 2 วิธี ได้แก่ วิธี Particle swarm optimization และ
Genetic Algorithm เพื่อเปรียบเทียบว่าวิธีใดสามารถประหยัดพลังงานได้มากที่สุด โดยเปรียบเทียบการ
จำลอง 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาเร่งด่วน ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน และนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน แต่ละ
ช่วงเวลาประกอบไปด้วย 4 กรณี ได้แก่ กรณีไม่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน กรณีพิจารณาพลังงาน
เบรกจ่ายคืน กรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Particle swarm optimization และ Genetic
algorithm มีเงื่อนไขการจำลอง คือ เวลาดำเนินการของรถไฟจะต้องไม่เกิน 10% ของช่วงการ
ดำเนินการปกติ ผลการศึกษาพบว่ากรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Particle swarm
optimization ในช่วงเวลาเร่งด่วนสามารถนำพลังงานเบรกจ่ายคืนมาแบ่งปันระหว่างรถไฟได้
93.015% และสามารถลดพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ 22.198%

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

SUMET YOOYONG : OPTIMAL TIMETABLING FOR ENERGY SAVING IN DC MASS
RAPID TRANSIT : ASST. PROF. TOSAPHOL RATNIYOMCHAI, Ph.D., 127 PP.

Keyword : Regenerative braking / Multi-train simulation / Timetabling / Single-
conductor

This thesis presents the optimal timetabling for energy saving in DC Mass Rapid Transit. To use the regenerative energy obtained from the braking train to share energy with the accelerating trains in the system with the optimal timetabling. Proper timetabling increases regenerative braking energy consumption and reduces the energy supplied by substations. Case study of BTS Silom Line by simulation of the movement of multi-train and single-conductor power grids are used. With MATLAB, optimal timetabling can increase the synchronized time between acceleration and braking of the train, thereby higher reducing the energy supply by the substation. Two optimization methods were used, Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm, to compare which was the most energy-efficient. By comparing the simulation of 3 time periods, peak time, off-peak time, and super-off-peak time, each period consists of 4 cases, cases without regenerative braking energy. Case with regenerative braking energy, the case of optimal timetabling using Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm, simulation conditions are: The operating time of the train shall not exceed 10% of the standard operating period. The result of the simulation found that the optimal timetabling by Particle Swarm Optimization method in peak time can bring 93.015% of regenerative energy to be shared between trains, and save the energy supplied by the substation by 22.198%

School of Electrical Engineering
Academic Year 2021

Student's Signature *Sumet Yooyong*
Advisor's Signature *Tosaphol Ratniyomchai*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนวทางที่เป็นประโยชน์ยิ่งแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมไปถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไข รายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุลรวรานิชพงษ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และเป็นผู้ตรวจทานวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา และให้กำลังใจอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณกลุ่มเพื่อน ๆ และรุ่นพี่ของผู้ทำวิจัยที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ และด้านการใช้ชีวิต อีกทั้งให้กำลังใจผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้กำลังใจในการทำวิจัย และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดี มาโดยตลอด

สุเมธ อยู่ยง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
1.8 สรุปย่อการดำเนินงานวิทยานิพนธ์	4
2. ปรัชณววรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ระบบเบรกแบบไฟฟ้าในรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	5
2.2.1 เบรกแบบไดนามิก (Dynamic Braking).....	5
2.2.2 เบรกจ่ายคืนพลังงาน (regenerative braking).....	6
2.3 การประยุกต์ใช้พลังงานเบรกจ่ายคืน	7
2.4 การจัดตารางเวลา	9
2.5 การหาค่าตารางเวลาเหมาะสมที่สุดของรถไฟฟ้ารวมกับการใช้พลังงานเบรกจ่ายคืน	9
2.6 สรุป	12
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
3.1 บทนำ.....	13
3.2 ระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้า	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1	แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน..... 15
3.2.2	ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง..... 15
3.2.3	ระบบการจ่ายพลังงาน (contact system)..... 17
3.3	รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย..... 20
3.4	สรุป..... 23
4.	แบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง และการจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุด..... 24
4.1	บทนำ..... 24
4.2	การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า..... 24
4.2.1	แบบจำลองรถไฟฟ้า..... 29
4.3	การคำนวณผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบตัวนำเดี่ยว..... 33
4.3.1	การคำนวณหาผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า..... 34
4.4	แบบจำลองการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟ และตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืน..... 38
4.4.1	แบบจำลองการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟ..... 38
4.4.2	ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืน..... 38
4.5	การจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุด..... 42
4.5.1	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization: PSO)..... 42
4.5.2	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) .. 45
4.5.3	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์..... 47
4.6	สรุป..... 49
5.	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง และผลการจำลอง..... 50
5.1	บทนำ..... 50
5.2	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง..... 50
5.3	ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้า BTS สายสีลมแบบหลายขบวน..... 55
5.3.1	ช่วงเวลาเร่งด่วน..... 57
5.3.2	ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 72
5.3.3	นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 87
5.4	สรุป..... 102
6.	สรุปและข้อเสนอแนะ..... 103

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1	สรุปผลการดำเนินงาน 103
6.2	ข้อเสนอแนะ..... 104
รายการอ้างอิง 105
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการจำลองในช่วงเวลาต่าง ๆ และผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด ด้วยวิธี PSO และ GA.....	109
ก.1 ผลการจำลองช่วงเวลาเร่งด่วน	110
ก.2 ผลการจำลองช่วงเวลาไม่เร่งด่วน	111
ก.3 ผลการจำลองนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน	113
ก.4 ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด.....	115
ภาคผนวก ข บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	121
ประวัติผู้เขียน.....	127

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ระบบไฟฟ้าทางรถไฟและระยะทางที่ใช้ไฟฟ้าของรถไฟทั่วโลก.....	14
3.2	แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน	15
3.3	ระยะทางระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน	16
5.1	พารามิเตอร์ของรถไฟไฟฟ้าในระบบทดสอบ.....	51
5.2	ตำแหน่งสถานีขนส่งและตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน.....	51
5.3	ตารางเวลารถไฟ	52
5.4	พารามิเตอร์สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน.....	53
5.5	ค่าพารามิเตอร์สำหรับหาค่าเหมาะที่สุด	55
5.6	ผลการจัดตารางเวลาเหมาะที่สุดในช่วงเวลาเร่งด่วนด้วยวิธี PSO.....	58
5.7	ผลการจัดตารางเวลาเหมาะที่สุดในช่วงเวลาเร่งด่วนด้วยวิธี GA.....	60
5.8	เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟกรณีต่าง ๆ ในช่วงเวลาเร่งด่วน.....	71
5.9	ผลการจัดตารางเวลาเหมาะที่สุดในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนด้วยวิธี PSO.....	73
5.10	ผลการจัดตารางเวลาเหมาะที่สุดในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนด้วยวิธี GA.....	75
5.11	เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟกรณีต่าง ๆ ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน.....	86
5.12	ผลการจัดตารางเวลาเหมาะที่สุดนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน ด้วยวิธี PSO	88
5.13	ผลการจัดตารางเวลาเหมาะที่สุดนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน ด้วยวิธี GA.....	90
5.14	เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟกรณีต่าง ๆ นอกช่วงเวลาเร่งด่วนสุด ๆ.....	101
ก.1	แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาเร่งด่วน.....	110
ก.2	กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาเร่งด่วน.....	110
ก.3	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาเร่งด่วน	111
ก.4	แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนช่วงเวลาไม่เร่งด่วน	111
ก.5	กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนช่วงเวลาไม่เร่งด่วน.....	112
ก.6	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนช่วงเวลาไม่เร่งด่วน	112
ก.7	แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน.....	113

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.8	กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 113
ก.9	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 114
ก.10	ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO ในช่วงเวลาเร่งด่วน 30 รอบ 115
ก.11	ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ในช่วงเวลาเร่งด่วน 30 รอบ..... 116
ก.12	ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 30 รอบ 117
ก.13	ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 30 รอบ..... 118
ก.14	ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 30 รอบ 119
ก.15	ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 30 รอบ..... 120



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	หลักการทํางานของเบรกแบบไดนามิค.....	6
2.2	หลักการทํางานของเบรกจ่ายคินพลังงาน.....	6
3.1	โครงสร้างวงจรถายกระแสไฟฟา DC.....	16
3.2	พลังงานเบรกจ่ายคินด้วยวงจรถายกระแสไฟฟาอินเวอร์เตอร์.....	17
3.3	สายส่งไฟเหนือศีรษะของรถไฟฟาความเร็วสูง.....	18
3.4	โครงสร้างของระบบรางที่สาม.....	19
3.5	รูปแบบหน้าสัมผัสประเภทต่าง ๆ ในระบบรางที่สาม.....	19
3.6	โครงสร้างของระบบรางที่สี่.....	20
3.7	ขบวนรถไฟฟาขนส่งมวลชนกรุงเทพมหานคร.....	21
3.8	ขบวนรถไฟฟ้ามหานคร.....	21
3.9	ส่วนประกอบและการทำงานของระบบการจ่ายไฟฟากระแสตรง.....	22
4.1	แผนภาพอิสระการเคลื่อนที่ของรถไฟฟา.....	24
4.2	โหมดการทํางานของรถไฟฟา.....	27
4.3	แผนภาพระยะวิกฤติการเบรก.....	28
4.4	คุณลักษณะสมบัติแรงฉุดของหัวรถจักรไฟฟฟากับความเร็วเชิงเส้น.....	29
4.5	ขั้นตอนการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟา.....	32
4.6	ระบบไฟฟาขับเคลื่อนกระแสตรงแบบตัวนำเดี่ยว.....	33
4.7	ขั้นตอนการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟาของระบบไฟฟาขับเคลื่อนแบบตัวนำเดี่ยว ด้วยวิธีฉีดกระแสไฟฟา.....	37
4.8	แบบจำลองการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟ.....	38
4.9	ขั้นตอนการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟาของระบบไฟฟาขับเคลื่อนแบบตัวนำเดี่ยว ด้วยวิธีฉีดกระแสไฟฟาที่มีตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคิน.....	41
4.10	แผนผังการทํางานการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี PSO.....	44
4.11	แผนผังการทํางานการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี GA.....	46
5.1	เส้นทางเดินรถไฟฟฟาสายสีลม.....	52
5.2	ระดับความชันของเส้นทางรถไฟฟฟาสายสีลม.....	53
5.3	ความเร็วของรถไฟฟาเทียบกับระยะทาง.....	53
5.4	คุณลักษณะแรงฉุดของรถไฟฟา.....	54
5.5	แรงฉุดของรถไฟฟาเทียบกับระยะทาง.....	54

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6	ผลการปรับ α_i และ α_g ในช่วงเวลาเร่งด่วน..... 57
5.7	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีจัดตารางเวลารถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO ในช่วงเวลาเร่งด่วน 57
5.8	ผลการปรับ crossover และ mutation ในช่วงเวลาเร่งด่วน..... 59
5.9	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีจัดตารางเวลารถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ในช่วงเวลาเร่งด่วน 59
5.10	ตำแหน่งรถไฟฟ้าต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน..... 61
5.11	ตัวอย่างตำแหน่งรถไฟฟ้าต่อเวลาที่สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนได้ ในช่วงเวลาเร่งด่วน..... 62
5.12	ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน..... 63
5.13	กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 11 และ 1 ใช้ในการเคลื่อนที่ก่อน และหลังตรวจสอบ การแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน..... 64
5.14	แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 11 และ 1 ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน... 65
5.15	กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 11 และ 1 ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน 66
5.16	แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน 68
5.17	กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน 69
5.18	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน..... 70
5.19	ผลการปรับ α_i และ α_g ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 72
5.20	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีจัดตารางเวลารถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 72
5.21	ผลการปรับ crossover และ mutation ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 74
5.22	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีจัดตารางเวลารถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 74
5.23	ตำแหน่งรถไฟฟ้าต่อเวลาในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 76
5.24	ตัวอย่างตำแหน่งรถไฟต่อเวลาที่สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนได้ ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 77
5.25	ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลาในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 78
5.26	กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 17 ใช้ในการเคลื่อนที่ก่อน และหลังตรวจสอบ การแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลาในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 79

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.27	แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 17 ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อเวลา ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 80
5.28	กระแสไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 17 ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อเวลา ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 81
5.29	แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 83
5.30	กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 84
5.31	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 85
5.32	ผลการปรับ α_i และ α_g นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 87
5.33	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีจัดตารางเวลารถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 87
5.34	ผลการปรับ crossover และ mutation นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 89
5.35	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีจัดตารางเวลารถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 89
5.36	ตำแหน่งรถไฟฟ้าต่อเวลานอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 91
5.37	ตัวอย่างตำแหน่งรถไฟต่อเวลาที่สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนได้ นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 92
5.38	ตัวคูณปรับลดพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลานอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 93
5.39	กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ใช้ในการเคลื่อนที่ก่อน และหลังตรวจสอบ การแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลานอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 94
5.40	แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อเวลา นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 95
5.41	กระแสไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อเวลา นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 96
5.42	แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลานอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 98
5.43	กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลานอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 99
5.44	กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลานอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน..... 100

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบรางเป็นทางออกที่ดีในการแก้ปัญหาการจราจรที่ติดขัดและปลอดภัยกว่าการคมนาคมขนส่งรูปแบบอื่นและยังเป็นที่ยอมรับทั่วโลก มีหลากหลายประเภทให้เลือกใช้ โดยมีทั้งรถไฟความเร็วสูงที่ใช้ขนส่งผู้โดยสารระหว่างเมือง รถไฟฟ้าความเร็วสูงที่ใช้ขนส่งผู้โดยสารในเมืองใหญ่ และรถไฟฟ้ามหานครที่ใช้ขนส่งผู้โดยสารในเมือง ซึ่งขนส่งผู้โดยสารในระยะทางที่สั้นและใช้ความเร็วต่ำ โดยแหล่งพลังงานของรถไฟฟ้ามหานครมีหลากหลายประเภทในยุคแรกใช้เป็นหัวรถจักรไอน้ำ ต่อมาได้พัฒนาโดยใช้เชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งในปัจจุบันใช้พลังงานที่แพร่หลายที่สุดในโลก คือ รถไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า รถไฟฟ้า ซึ่งข้อดีของรถไฟฟ้า คือ เป็นพลังงานสะอาดไม่ปล่อยควันที่เป็นมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นเรื่องที่ทั่วโลกให้ความสนใจในขณะนี้ ในปัจจุบันรูปแบบของการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้ามหานครมีหลายรูปแบบ เช่น 1. การจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยใช้สายไฟเหนือศีรษะ (Overhead wire) 2. การจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านรางที่สาม (Third rail) เป็นต้น มักจะให้บริการในเมืองที่มีผู้โดยสารหนาแน่น พลังงานส่วนใหญ่ใช้สำหรับแรงฉุดลากของรถไฟที่กำลังวิ่ง วิธีการประหยัดพลังงานแบบดั้งเดิมในระบบรางไฟฟ้า ได้แก่ การลดความต้านทาน การลดมวล และการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่อเร็ว ๆ นี้พลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกได้รับความสนใจอย่างมากสำหรับการประหยัดพลังงานซึ่งเป็นประเภทที่งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นในการศึกษา โดยศึกษาในระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายสีลม (Kampeerawat et al., 2017)

พลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกมักจะใช้ในระบบรถไฟฟ้ามหานครสมัยใหม่เพื่อการประหยัดพลังงาน พลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกได้มาจากมอเตอร์ฉุดทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชั่วคราว ความสามารถในการผลิตพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วของรถไฟในระหว่างโหมดลดความเร็วซึ่งสามารถส่งกลับคืนสู่ระบบจำหน่ายได้ (Tian et al., 2018) พลังงานเบรกจ่ายคืนส่วนใหญ่สามารถแบ่งปันให้กับ รถไฟฟ้าที่อยู่ติดกันได้ หรือ บริเวณใกล้เคียงกันในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเดียวกัน (Yang et al. 2013)

งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายสีลม มาพัฒนาในงานวิจัย โดยศึกษาเกี่ยวกับพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของระบบขนส่งมวลชนที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ (Kulworawanichpong, 2015) และการหาค่าตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเดินรถไฟฟ้ามหานคร เพื่อชิงโครโนส์ช่วงเวลาการเร่งและการเบรกของรถไฟฟ้ามหานครต่อเนื่องกัน ส่งผลให้พลังงานเบรกจ่ายคืนของรถไฟฟ้ามหานครสามารถใช้โดยรถไฟฟ้ามหานครเร่งได้พร้อมกัน โดยทำการแก้ไข ช่วงเวลาการวิ่งของรถไฟฟ้ามหานคร ช่วงเวลาการหยุดของรถไฟฟ้ามหานคร และคำนึงถึงช่วงเวลาเร่งด่วนของการให้บริการรถไฟฟ้ามหานครด้วย โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Particle swarm optimization และวิธี Genetic algorithm ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหา

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 พัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงสายสี่ลมหหลายขบวน โดยนำพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกมาแบ่งปันให้กับรถไฟฟ้าที่กำลังเร่งบริเวณใกล้เคียงในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเดียวกัน เพื่อลดการจ่ายพลังงานโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

1.2.2 ศึกษาการหาค่าเหมาะที่สุดของตารางเวลาที่เหมาะสมร่วมกับพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกของรถไฟฟ้า

1.2.3 พัฒนาแบบจำลองการประหยัดพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงสายสี่ลมหหลายขบวน ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของตารางเวลาร่วมกับพลังงานเบรกจ่ายคืน โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี Particle Swarm Optimization และ Genetic Algorithm

1.2.4 เปรียบเทียบผลการจัดตารางเวลาที่เหมาะสมด้วยวิธี Particle Swarm Optimization กับ Genetic Algorithm เพื่อลดพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ตารางเวลาเดินรถไฟฟ้าส่งผลต่อโหมดการทำงานของรถไฟฟ้า และส่งผลต่อการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกระหว่างรถไฟฟ้า

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ระบบทดสอบเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB

1.4.2 พารามิเตอร์และข้อมูลการจำลองของระบบทดสอบใช้ข้อมูลของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนกรุงเทพสายสีลม (สายสีเขียวเข้ม) รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ตั้งแต่สถานีสนามกีฬาแห่งชาติถึงสถานีบางหว้า

1.4.3 การจำลองผลเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวน

1.4.4 ไม่พิจารณาโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยของรถไฟฟ้า

1.4.5 พิจารณาการจำลองผลระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนกรุงเทพ 1 ขม. ในแต่ละช่วงเวลาทำการของรถไฟฟ้า

1.4.6 พิจารณาน้ำหนักของผู้โดยสารขนาด payload (AW4) ที่ช่วงเวลาเร่งด่วน payload (AW2) ที่ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน และ payload (AW1) นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

1.4.7 พิจารณาการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟฟ้าโดยนำพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกมาแบ่งปันสู่รถไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียงกันในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเดียวกัน

1.5 ของเขตของการวิจัย

1.5.1 จำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงแบบหลายขบวนซึ่งนำพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกแบ่งปันพลังงานให้กับรถไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียงกันในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเดียวกัน

1.5.2 เปรียบเทียบผลการจำลองกรณีไม่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน กรณีพิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน กรณีการจัดตารางเวลาเหมาะที่สุดด้วยวิธี Particle Swarm Optimization และกรณีจัดตารางเวลาเหมาะที่สุดด้วยวิธี Genetic Algorithm ภายใต้เงื่อนไขการจำลองเดียวกัน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้แบบจำลองการประหยัดพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงแบบหลายขบวนซึ่งนำพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกมาแบ่งปันพลังงานให้กับรถไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียงได้

1.6.2 สามารถจัดตารางเวลารถไฟฟ้าเหมาะที่สุดร่วมกับพลังงานเบรกจ่ายคืนเพื่อช่วยประหยัดพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้

1.6.3 สามารถนำหลักการและแนวคิดในงานวิจัยไปประยุกต์ใช้กับรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน หรือ ในการวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในอนาคต

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 2 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ ซึ่งกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการศึกษาและสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่มีการศึกษามาแล้ว เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยโดยแบ่งเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ ระบบเบรกแบบไฟฟ้าในรถไฟขนส่งมวลชน การประยุกต์การใช้พลังงานเบรกจ่ายคืน การจัดตารางเวลารถไฟ และการหาค่าตารางเวลาเหมาะที่สุดของรถไฟ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประกอบด้วยความรู้เบื้องต้นของระบบจ่ายไฟฟ้าทางรถไฟ เป็นต้น และกล่าวถึงรถไฟขนส่งมวลชนในประเทศไทย

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของระบบรถไฟฟ้าหลายขบวน โดยใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้แก่ การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟ และการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าจากการสร้างแบบจำลองโครงข่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง แบบจำลองการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟ และตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรก และการจัดตารางเวลาเหมาะที่สุด

บทที่ 5 กล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรงสายสีลม และผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรงสายสีลมแบบหลายขบวน 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาเร่งด่วน ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน และนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน ที่ประกอบด้วย กรณีไม่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน กรณีพิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน กรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Particle swarm optimization (PSO) และ Genetic algorithm (GA)

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ภาคผนวก ก. ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรงแบบหลายขบวนกรณีไม่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน กรณีพิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนโดยการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟฟ้าเพื่อลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Particle Swarm Optimization และวิธี Genetic Algorithm สำหรับการประหยัดพลังงานในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงสายสีลมแบบหลายขบวน

ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

1.8 สรุปย่อการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้สร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้าหลายขบวนและแบบจำลองโครงข่ายระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีศึกษารถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีลม มีการแบ่งทำงานของรถไฟฟ้าเป็น 3 โหมด ได้แก่ โหมดเร่ง โหมดความเร็วคงที่ และโหมดเบรก จำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบ Single-conductor พิจารณาเฉพาะโนดตัวนำไฟฟ้า มีการคำนวณรอบซ้ำด้วยวิธีฉีดกระแสไฟฟ้าเพื่อหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่โนดใด ๆ โดยมีการนำพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกมาใช้ในโหมดขับเคลื่อนโดยจะเปรียบเสมือนสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่เคลื่อนที่ได้แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า กรณีจ่ายพลังงานช่วยแบ่งปันพลังงานสู่รถไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียงในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเดียวกันเพื่อช่วยลดพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ศึกษาและจัดตารางเวลารถไฟฟ้าเพื่อให้โหมดเร่งและโหมดเบรกซิงโครไนซ์กันในช่วงเวลาเดียวกันเพื่อนำพลังงานเบรกจ่ายคืนมาใช้ให้ได้สูงที่สุดและช่วยลดพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ไป-กลับ 1 ชั่วโมงบริการของ 3 ช่วงเวลา ช่วงเวลาเร่งด่วน ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน และนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน ใช้วิธีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด 2 วิธี คือ การจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO และวิธีการการจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุดด้วย GA

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

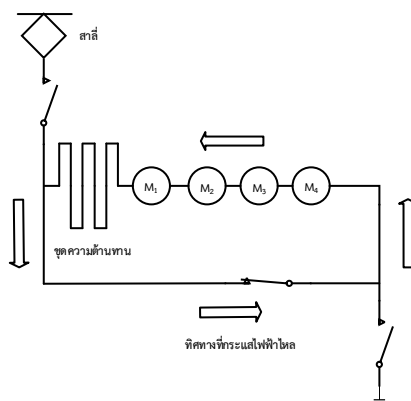
งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟโดยการนำพลังงานเบรกจ่ายคืนมาใช้เพื่อช่วยลดพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนโดยการจัดการเวลาเดินรถไฟ ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยด้านการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟและจัดการเวลาเดินรถไฟเพื่อช่วยให้ได้พลังงานที่แบ่งปันระหว่างรถไฟสูงขึ้น ผู้วิจัยดำเนินการทบทวนวรรณกรรมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 4 หัวข้อ ได้แก่ 2.2 ระบบเบรกแบบไฟฟ้าในรถไฟขนส่งมวลชน 2.3 การประยุกต์ใช้พลังงานเบรกจ่ายคืน 2.4 การจัดการเวลา และ 2.5 การหาค่าตารางเวลาเหมาะสมที่สุดของรถไฟรวมกับการใช้พลังงานเบรกจ่ายคืน โดยปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยดังกล่าวได้นำมาใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

2.2 ระบบเบรกแบบไฟฟ้าในรถไฟขนส่งมวลชน

หลักการทำงานของเบรกไฟฟ้า คือ เมื่อมอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานที่เกิดจากการขับเคลื่อนก็จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่

2.2.1 เบรกแบบไดนามิก (Dynamic Braking)

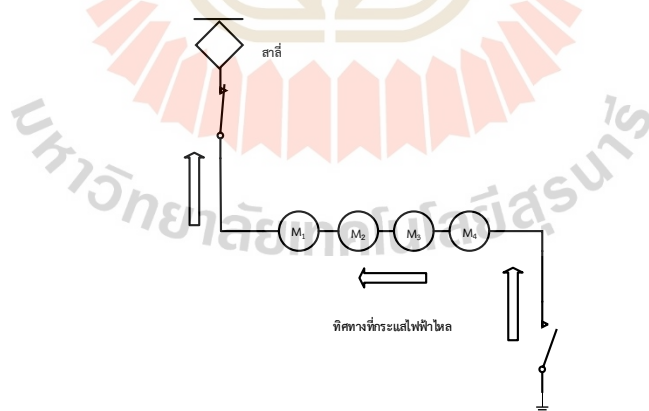
รถไฟที่เคลื่อนที่ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อรถไฟเบรกมอเตอร์จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ล้อจะเป็นตัวหมุนถ้าแรงดันที่ได้มากเกิน 900 V เครื่องตัดไฟเบรกก็จะทำงานทำหน้าที่เหมือนกับสวิตช์ตัดต่อเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่เกินไหลไปยังชุดความต้านทานแล้วถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานความร้อน เมื่อเกิดความร้อนจะถูกพัดลมระบายความร้อนเป่าทิ้งไปในอากาศ เบรกไฟฟ้าแบบไดนามิกจะมีประสิทธิภาพสูงเฉพาะในช่วงความเร็วสูง ซึ่งการเบรกของขบวนรถไฟต้องอาศัยแรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางจึงต้องมีอุปกรณ์ที่ผสมแรงเบรกระหว่างแรงที่มาจากเบรกกลกับแรงจากเบรกไฟฟ้าเพื่อให้แรงเบรกที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินแรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางเมื่อความเร็วของรถไฟต่ำลงต่ำกว่า 8 km/h อุปกรณ์ดังกล่าวก็จะตัดไดนามิกเบรกออกจากการใช้งาน ระบบเบรกลมถึงจะทำงาน



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเบรกแบบไดนามิก

2.2.2 เบรกจ่ายคืนพลังงาน (regenerative braking)

ใช้หลักการเดียวกันกับเบรกแบบไดนามิกแตกต่างกันตรงที่เบรกแบบจ่ายคืนพลังงานไม่เป่าความร้อนที่เกิดขึ้นทิ้งไปในอากาศแต่นำพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจ่ายย้อนกลับเข้าสู่รางที่สามหรือสายส่งเหนือศีรษะ ดังรูปที่ 2.2 เมื่อเกิดการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายย้อนเข้าสู่ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายให้กับรถไฟที่ขับเคลื่อนอยู่บริเวณใกล้เคียงที่ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า การเบรกด้วยวิธีนี้ทำได้โดยการขับมอเตอร์ที่ต่อกับเครื่องจักรหมุนซึ่งเป็นโพลตให้มีความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสหรือความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ทำให้มอเตอร์เกิดการเบรก และจ่ายพลังงานกลับคืนสู่ระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของเบรกจ่ายคืนพลังงาน

2.3 การประยุกต์ใช้พลังงานเบรกจ่ายคืน

ระบบรางไฟฟ้าไม่เพียงแต่แก้ปัญหาจราจรติดขัดได้ดี แต่ยังมีระบบขนส่งมวลชนที่มีประสิทธิภาพในแง่ของการใช้พลังงานอีกด้วย เนื่องจากปริมาณพลังงานจำนวนมากที่ระบบรถไฟต้องการ จึงต้องอาศัยแหล่งพลังงานต่าง ๆ เพื่อรองรับการทำงานของระบบ และการจัดการพลังงานที่เหมาะสมที่สุดจะกลายเป็นกุญแจสำคัญสำหรับการวางแผนและการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพ ทุกวันนี้ระบบเบรกจ่ายคืนพลังงานถูกนำมาใช้กันทั่วไปในรถรางไฟฟ้าสมัยใหม่ เมื่อใช้งานระบบเบรกจ่ายคืนพลังงานดังกล่าวมาแล้ว นั้น การถือกำเนิดของเทคโนโลยีรถไฟสมัยใหม่ทำให้เกิดระบบเบรกจ่ายคืนพลังงานซึ่งสามารถกู้คืนพลังงานได้มากจากการทำงานของเบรก ตัวอย่างเช่น ระบบรถไฟในเมืองบางระบบสามารถกู้คืนพลังงานที่ใช้โดยระบบชุดลากได้มากกว่า 30% (Yang et al. 2016) พลังงานเบรกจ่ายคืนสามารถจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยวิธีดังต่อไปนี้

1) ขับเคลื่อนยานพาหนะในบริเวณใกล้เคียงโดยออกแบบตารางเวลาสำหรับการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟที่วิ่ง

2) การจัดเก็บและรีไซเคิลโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงาน (ESS)

3) ป้อนเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าผ่านสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบย้อนกลับได้

การนำพลังงานเบรกจ่ายคืนมาประยุกต์ใช้เพื่อประหยัดพลังงานด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การประหยัดพลังงานมอเตอร์ชุดลากด้วยเทคโนโลยีการควบคุมพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกโดยอาศัยการวิเคราะห์หลักการทำงานของระบบเบรกจ่ายคืนพลังงานของมอเตอร์ชุดลากผสมผสานกับเทคนิคการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control: DTC) โดยการเปลี่ยนแอมพลิจูดของสเตเตอร์ฟลักซ์ และ ความถี่สลิป โดยการควบคุมแรงบิดโดยตรงจะควบคุมข้อผิดพลาดของตำแหน่ง ฟลักซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้กระแสย้อนกลับฮาร์โมนิกมีขนาดเล็กทำงานได้ (Yuhua et al., 2010) การเพิ่มพลังงานเบรกจ่ายคืนโดยการวิเคราะห์ระบบเบรกของรถไฟความเร็วสูง และ ทฤษฎีสัมพัทธ์ของการคำนวณ การคำนวณแรงเบรก ระยะเบรก และเส้นโค้งโหมดการทำงาน รวมถึง ขั้นตอนการคำนวณพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรก (regenerative braking) แรงเบรกอากาศ และ ระยะที่ใช้ในการเบรก (Shangguan et al., 2011)

การนำพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกช่วยจ่ายให้กับรถไฟที่กำลังเร่งในบริเวณใกล้เคียง โดยพื้นฐานแล้วพลังงานเบรกจ่ายคืนที่เกิดจากการเบรกจะจ่ายพลังงานเพียงบางส่วนให้กับรถไฟที่กำลังเร่งในระบบ ซึ่งหมายความว่ารถไฟเร่งจะต้องได้รับพลังงานเพิ่มเติมจากระบบจ่ายไฟในระบบรถไฟ งานวิจัยที่นำพลังงานเบรกจ่ายคืนขับเคลื่อนยานพาหนะในบริเวณใกล้เคียงมาประยุกต์ใช้ เช่น การปรับปรุงรูปแบบการควบคุมการประหยัดพลังงานของรถไฟโดยเพิ่มระบบเบรกจ่ายคืนพลังงานด้วยประสิทธิภาพระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะโดยการเปรียบเทียบระหว่าง (Energy efficient train control: EETC) ที่มีและไม่มีระบบเบรกจ่ายคืนพลังงานโดยกำหนดปัญหาการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทั้ง 2 กรณีโดยใช้วิธี Gauss Pseudospectral ใช้แบบจำลองนี้ในกรณีศึกษาของประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยพิจารณาสถานการณ์ทั้งหมด 3 สถานการณ์ สถานการณ์แรกพิจารณาจากตารางเวลาปัจจุบัน สถานการณ์ที่สองเปรียบเทียบกับสถานการณ์ต่าง ๆ กับเวลาทำงานที่แตกต่างกันเพื่อดูผลกระทบของเวลาทำงานที่เพิ่มขึ้นต่อการประหยัดพลังงาน และ สถานการณ์ที่สามตรวจสอบผลกระทบของการจำกัดความเร็วที่แตกต่างกันต่อการประหยัดพลังงาน

ผลที่ได้กรณีที่มีการติดตั้งระบบเบรกจ่ายคืนพลังงานสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่ากรณีที่ไม่ได้ติดตั้งระบบเบรกจ่ายคืนพลังงาน (Scheepmaker et al., 2016) การวิเคราะห์และปรับเส้นโค้งการทำงานของรถไฟแต่ละขบวนให้สอดคล้องกันเพื่อให้เกิดการชิงโครไนซ์ของการเร่งความเร็วและการเบรกด้วยแบบจำลองโครงข่ายไฟฟ้าแรงจุด โดยพิจารณาแบ่งเป็นช่วงเวลาเร่งด่วน และ ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน จากการปรับเส้นโค้งการทำงานของรถไฟแต่ละขบวนให้สอดคล้องกันนั้นสามารถประหยัดพลังงานในชั่วโมงเร่งด่วนได้ 22.06% และช่วงเวลาไม่เร่งด่วนสามารถประหยัดพลังงานได้ 15.19% (Yang et al., 2016)

โดยพื้นฐานแล้ว พลังงานเบรกจ่ายคืนควรจะถูกใช้โดยตัวรถไฟเองและรถไฟใกล้เคียงเป็นอันดับแรก เมื่อปริมาณพลังงานเกินความสามารถของระบบ พลังงานส่วนเกินจะเปลี่ยนเป็นความร้อนที่สูญเสียไปหรือระบบเบรกจ่ายคืนพลังงานจะถูกยกเลิก เนื่องจากความก้าวหน้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการจัดเก็บพลังงาน เทคโนโลยีการรวมระบบกักเก็บพลังงานเข้ากับระบบรางกลายเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการจัดการพลังงานเบรกจ่ายคืนอย่างมีประสิทธิภาพ พลังงานเบรกจ่ายคืนสามารถจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย ระบบกักเก็บพลังงานแบบริมทาง หรือ ระบบกักเก็บพลังงานแบบบนขบวนรถ (Kampeerawat et al., 2017) งานวิจัยที่นำระบบกักเก็บพลังงานมาประยุกต์ใช้ เช่น การออกแบบโปรไฟล์ความเร็วของระบบปฏิบัติการรถไฟอัตโนมัติ หรือ (ATO) เหมาะที่สุดของรถไฟใต้ดินมาดริตด้วยวิธี Genetic algorithm โดยพิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรก เพื่อลดพลังงานสุทธิของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนโดยใช้แบบจำลองรถไฟที่มีระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ โดยมีการวิเคราะห์สถานการณ์ต่าง ๆ เพื่อประเมินการประหยัดพลังงานที่เป็นไปได้เมื่อพิจารณาการลงทุน (Domínguez et al., 2012) การสร้างแบบจำลองระบบรางที่มีวิธีการจัดเก็บพลังงานและส่งพลังงานติดตั้งอยู่ริมทางของรถไฟโดยใช้เซลล์ลิเทียมกำลังสูงแบบ DC/DC มีขนาดของหน่วยกักเก็บพลังงานข้างทางอยู่ที่ 728 kWh โดยพิจารณาเฉพาะรถไฟที่เคลื่อนตัวในสายความเร็วสูงเท่านั้นโดยพลังงานที่นำกลับมาใช้ใหม่สามารถใช้ได้ด้วยรถไฟสายอื่นที่เดินทางเข้าสู่ทางรถไฟเดียวกัน (Ceraolo et al., 2016)

และงานวิจัยที่นำพลังงานเบรกจ่ายคืนป้อนเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าผ่านสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบย้อนกลับเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าพลังงานเบรกจ่ายคืนมาประยุกต์ใช้ในรถไฟสมัยใหม่โดยติดตั้งระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบย้อนกลับกับระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน โดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนทั้งสองจะแบ่งปันพลังงานไปยังระบบสายส่งเหนือศีรษะ และจ่ายให้กับขบวนรถไฟ เมื่อรถไฟเบรกพลังงานเบรกจ่ายคืนที่สามารถไหลกลับไปยังระบบสายส่งเหนือศีรษะ และใช้โดยรถไฟที่กำลังเร่งในเวลาเดียวกัน พลังงานเบรกจ่ายคืนสามารถกลับด้านจากฝั่ง DC เป็น AC และใช้โดยโหลดอื่น ๆ ในเครือข่ายการกระจายไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเมื่อติดตั้งระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบย้อนกลับสามารถประหยัดพลังงานเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบย้อนกลับ พลังงานที่ติดตั้งระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบย้อนกลับจะลดลง 10-40% (Tian et al., 2018)

2.4 การจัดตารางเวลา

ระบบรางเป็นระบบที่ซับซ้อนมาก ดังนั้นการวางแผนและกระบวนการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับระบบรางจึงเป็นงานที่เต็มไปด้วยปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงผสมผสานที่น่าสนใจ ตัวอย่างที่รู้จักกันดีของปัญหาเหล่านี้ ได้แก่ ปัญหาการวางแผนปฏิบัติการ เช่น การวางแผนสายงาน ตารางเวลา การวางแผนแพลตฟอร์ม การหมุนเวียนสต็อก การแบ่งกลุ่ม และการวางแผนลูกเรือ อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมรถไฟเมื่อไม่นานมานี้พบว่าปัญหาดังกล่าวสามารถวิเคราะห์และแก้ไขได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่าง ๆ นอกจากนี้จะเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบรถไฟแล้วยังส่งผลให้การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบรางรถไฟดีขึ้น และสามารถแก้ไขปัญหาประเภทต่าง ๆ ได้เร็วขึ้น

การศึกษาการจัดตารางเวลารถไฟด้วยวิธีที่แตกต่างกันมีงานวิจัยที่มีการศึกษาและได้ตีพิมพ์มาแล้วในอดีต เช่น

Serafaini et al. (1989) บทความนี้กล่าวถึงการแก้ปัญหาการควบคุมการจราจรตามเวลาที่กำหนด ประกอบด้วยการค้นหาตารางเวลาเป็นระยะสำหรับสัญญาณการควบคุมการจราจรของรถไฟในระบบทางแยกด้วยวิธีการแก้ปัญหาทางเลือกด้วยโปรแกรมเชิงเส้นที่เป็นจำนวนเต็มผสม

Andersson et al. (2013) บทความนี้เสนอการปรับปรุงตารางเดินรถไฟซึ่งนำแนวคิดเรื่องจุดวิกฤตมาใช้โดยสามารถนำไปใช้ในกระบวนการกำหนดเวลาจริงเพื่อหาจุดผิดพลาดในตารางเวลาและให้คำแนะนำปรับปรุง เพื่อประเมินในเชิงปริมาณว่าจุดวิกฤตมีความสำคัญแค่ไหน

Ding et al. (2016) บทความนี้เสนอวิธีแก้ปัญหาการกำหนดเวลารถไฟแบบวนซ้ำเพื่อเพิ่มความเป็นไปได้ของแบบจำลองการจัดการกำหนดการเหตุการณ์เป็นระยะ หรือ periodic event scheduling problem (PESP) model โดยใช้ข้อจำกัดเวลาการเดินทางที่เปลี่ยนแปลงได้เพื่อแทนข้อจำกัดเวลาที่คงที่ และเวลาเร่งและลดความเร็วของรถไฟเป็นข้อจำกัดในการเดินทาง โดยใช้โปรแกรม CPLEX 12.5 ในการแก้ปัญหา

Gorbachev et al. (2020) บทความนี้เสนอการใช้ตารางเวลาแบบผสมเพื่อลดข้อจำกัดของรูปแบบตารางเวลาแบบ aperiodic สำหรับการขนส่งสาธารณะความเร็วสูงในเมือง ใช้ตัวอย่างเป็นรถรางความเร็วสูงแห่งใหม่ในเซนต์ปีเตอส์เบิร์กจำลองโดยใช้โปรแกรม ASRT เป็นระบบย่อยของระบบ ตารางเวลาแบบผสมคล้ายกับตารางเวลาแบบวนรอบ และคล้ายกับตารางเวลาที่ไม่วนรอบ โดยมีข้อจำกัดดังนี้ ช่วงเวลาระหว่างช่วงเวลาต้องอยู่ใกล้กัน เทคโนโลยีสำหรับตารางเวลาอย่างไม่ถูกยอมรับ ตารางเวลาแบบผสมไม่สามารถระบุช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับผู้โดยสารได้

2.5 การหาค่าตารางเวลาเหมาะสมที่สุดของรถไฟรวมกับการใช้พลังงานเบรกจ่ายคืน

จากการศึกษาวิธีการดำเนินงานของระบบรถไฟประกอบด้วยตารางเวลาและโปรไฟล์ความเร็วซึ่งส่งผลอย่างมากต่อปริมาณการใช้พลังงานในระบบรถไฟ และเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการประหยัดพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถประหยัดพลังงานได้โดยใช้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพทางคณิตศาสตร์ ได้มีการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในระบบรถไฟ การประหยัดพลังงานของระบบรถไฟเป็นปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพที่ซับซ้อนและยากเนื่องจากควรมีการกำหนด

ตารางเวลาให้ดีที่สุดสำหรับการชิงโครโนซ์การเร่งความเร็วและการเบรกของรถไฟในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเดียวกัน แต่ยังคงควบคุมโปรไฟล์ความเร็วเพื่อลดแรงฉุดลากจากการใช้พลังงานภายใต้ข้อจำกัดความเร็ว เวลาในการเดินทาง และข้อจำกัดระยะทาง (Tuytens et al., 2013) ดังนั้นการศึกษาในอดีตมักจะแบ่งปัญหาออกเป็น การเพิ่มประสิทธิภาพตารางเวลา และการเพิ่มประสิทธิภาพโปรไฟล์ความเร็วโดยปรับจำนวนรถไฟที่ให้บริการ เวลาที่ใช้เดินทางในแต่ละสถานีรับส่งผู้โดยสาร และเวลาจอดรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารเพื่อเพิ่มเวลาการชิงโครโนซ์ระหว่างรถไฟเร่งและรถไฟเบรกให้สูงสุด เพื่อให้พลังงานเบรกจ่ายคืนจากรถไฟเบรกสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยรถไฟเร่ง ขณะที่ขบวนหลังควบคุมเวลา ความเร็วในการเร่งความเร็ว การเคลื่อนตัวขณะเบรก และความเร็วเพื่อลดการใช้พลังงานในการฉุดลาก ระบบรถไฟหลายระบบมีตารางเวลาเดินทางโดยกำหนดให้รถไฟต้องวิ่งตามกันด้วยเส้นทางที่คงที่และใช้เวลาจอดอยู่ที่สถานีรับส่งผู้โดยสารเวลาและเวลาเดินทางตามส่วนต่างเป็นเวลาเดียวกัน มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาและตีพิมพ์ และเผยแพร่มาแล้วในอดีต เช่น Nasri et al. (2010) การเพิ่มประสิทธิภาพตารางเวลาการเคลื่อนที่ของรถไฟเพื่อการใช้พลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกให้สูงที่สุดของระบบรถไฟ มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ พลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่ำที่สุด โดยปรับเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารแต่ละสถานีที่อยู่ในช่วง 20 ถึง 40 วินาที จำลองระบบรถไฟใต้ดินใน 2 ช่วงระยะเวลาห่างระหว่างรถไฟ คือ 2 และ 4 นาทีตามลำดับ ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี Genetic Algorithm โดยมีเงื่อนไขดังนี้ ประชากร 20 ตัว อัตราการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.6 และอัตราการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.01 ผลลัพธ์ของการปรับตารางเวลาให้เหมาะสมแสดงให้เห็นว่าด้วยวิธีนี้พลังงานไฟฟ้าที่ต้องการทั้งหมดสำหรับระบบรถไฟสามารถลดลงได้ถึง 14% งานวิจัยของ Pena-Alcaraz et al. (2012) ใช้การออกแบบตารางเวลาของระบบรถไฟใต้ดินที่ชิงโครโนซ์การเคลื่อนที่ของรถไฟ เพื่อลดการใช้พลังงานจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยการใช้พลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกให้สูงสุด จำลองระบบรถไฟใต้ดินสาย 3 กรุงมาดริด จำนวน 30 ขบวน ในช่วงเวลา 22.00 – 02.00 น. มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ การใช้พลังงานเบรกจ่ายคืนสูงสุด จำลองช่วงนอกเวลาเร่งด่วน ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี SBB solver ผลลัพธ์ของการปรับตารางเวลาให้เหมาะสมด้วยการออกแบบนี้สามารถประหยัดพลังงานของระบบรถไฟใต้ดินได้ 7 % งานวิจัยของ Fournier et al. (2012) กำหนดรูปแบบการปรับตารางเวลาให้เหมาะสมเพื่อใช้พลังงานเบรกจ่ายคืนให้เกิดประโยชน์สูงสุด จำลองระบบรถไฟใต้ดิน 1 ชั่วโมงทำการ มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ เวลาจอดรถไฟที่สถานีบริการเพื่อชิงโครโนซ์ช่วงเวลาเร่งและเบรกของรถไฟ ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี Hybrid genetic และ linear programming algorithm จากการจำลองสามารถประหยัดพลังงานได้ 6.6% งานวิจัยของ Yang et al. (2013) ใช้การจัดตารางเวลาแบบประสาน (CS) เพื่อปรับตารางเวลาให้เหมาะสมเพื่อให้พลังงานเบรกจ่ายคืนที่สร้างขึ้นโดยรถไฟเบรกสามารถใช้กับรถไฟเร่งได้โดยตรง โดยพลังงานเบรกจ่ายคืนที่เกิดจากรถไฟเบรคนั้นน้อยกว่าพลังงานที่จำเป็นสำหรับรถไฟเร่งจึงพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาที่ทับซ้อนกันระหว่างรถไฟที่ต่อเนื่องกันเท่านั้น จำลองรถไฟใต้ดินปักกิ่งอู่จวง โดยพิจารณาชั่วโมงเร่งด่วน และนอกชั่วโมงเร่งด่วน มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ช่วงเวลาที่ชิงโครโนซ์ของการเร่งและเบรกของรถไฟ ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี binary GA โดยกำหนดรูปแบบการเขียนโปรแกรมจำนวนเต็มเพื่อเพิ่มเวลาที่ทับซ้อนกันให้สูงสุดด้วยการควบคุมเวลาบริการและเวลาหยุดนิ่ง พบว่าสามารถเพิ่มเวลาที่ทับซ้อนกันได้ 22 % ต่อมา Li

and Yang (2013) ได้เสนอแบบจำลองการจัดตารางเวลาประสานแบบสุ่ม (SCS) โดยเน้นที่การสุ่มความล่าช้าในการออกเดินทางของรถไฟที่สถานีที่มีผู้โดยสารพลุกพล่าน มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือการใช้พลังงานเบรกจ่ายคืนสูงสุด ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี GA พบว่าสามารถประหยัดพลังงานได้ 15.13 % เมื่อเทียบกับกรณีไม่จัดตารางเวลา และประหยัดพลังงานได้ 8.81 % เมื่อเทียบกับกรณีการจัดตารางเวลาแบบประสาน (CS) งานวิจัยของ Li et al. (2014) เสนอวิธีการประหยัดพลังงานของรถไฟด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพตารางเวลาและการควบคุมความเร็ว โดยการประสานเวลาเร่งความเร็วและการเบรกของรถไฟเพื่อเพิ่มการใช้พลังงานเบรกจ่ายคืนให้เกิดประโยชน์สูงสุด และควบคุมโปรไฟล์ความเร็วเพื่อลดการใช้พลังงานภายใต้ข้อจำกัดของตารางเวลา จำลองโดยอิงจากข้อมูลการทำงานจริงของสายปักกิ่งเมโทรอีจวของจีน มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ การใช้พลังงานรวมของระบบต่ำสุด ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี GA พบว่าสามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุดประมาณ 25% ที่ระยะห่างระหว่างรถไฟ 90 วินาที ต่อมางานวิจัยของ Lesel et al. (2016) นำเสนอวิธีการใช้ metaheuristic เพื่อออกแบบตารางเวลารถไฟที่เหมาะสมที่สุดเพื่อเพิ่มเวลาที่ทับซ้อนกันระหว่างช่วงเร่งความเร็วและชะลอความเร็วของรถไฟให้ได้มากที่สุด จำลองระบบรถไฟใต้ดินโดยใช้วิธีนิวตันราฟสันเพื่อหากระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในระบบ มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ลดพลังงานเบรกที่สูญเสียไปโดยความร้อนมีค่าเท่ากับการลดพลังงานทั้งหมดที่รถไฟใช้ ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี PSO เปรียบเทียบกับวิธี GA พบว่าวิธี PSO ประหยัดพลังงานได้สูงสุดที่ 7 % งานวิจัยของ Zhao et al. (2017) เสนอการเพิ่มประสิทธิภาพเส้นทางรถไฟเปรียบเทียบกับเพิ่มประสิทธิภาพตารางเวลาเพื่อเพิ่มการชิงโครนซ์ของการเร่งและเบรกของรถไฟเพื่อลดการใช้พลังงานของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนโดยการคำนวณโหมดการเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุด เวลาเดินทางระหว่างสถานี และช่วงเวลาให้บริการ จำลองระบบรถไฟใต้ดินกว้างโจวของจีนสาย 7 จำลองรถไฟ 200 ขบวน เวลาให้บริการ 18 ชั่วโมง มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ การใช้พลังงานต่ำสุดของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในหนึ่งวันบริการ ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี Brute-force search ร่วมกับวิธี GA พบว่าการเพิ่มประสิทธิภาพตารางเวลาสามารถเพิ่มพลังงานเบรกจ่ายคืนได้มากกว่ากรณีเพิ่มประสิทธิภาพเส้นทางรถไฟ 6% สามารถลดการใช้พลังงานของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ 25% ประหยัดได้ 649 พันปอนด์ต่อปี งานวิจัยของ Bai et al. (2019) เสนอโมเดลการจำลองเกี่ยวกับขอบเขตการเบรก การเร่ง และการหยุดที่สถานีของรถไฟ รวมถึงการเปลี่ยนโหมดการทำงานของรถไฟสำหรับการควบคุมแบบเรียลไทม์ของรถไฟใต้ดินหลายขบวนเพื่อลดการใช้พลังงานรวมของระบบเปรียบเทียบกับกรณีแยกการควบคุมจำลองระบบรถไฟใต้ดินปักกิ่งสาย 5 มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ การใช้พลังงานรวมของระบบต่ำสุด ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี Hybrid GA-SA พบว่ากรณีการควบคุมแบบเรียลไทม์ของรถไฟใต้ดินหลายขบวนสามารถประหยัดได้ 12% เมื่อเทียบกับกรณีแยกการควบคุม

เมื่อมีการใช้พลังงานเบรกจ่ายคืนให้เกิดประโยชน์สูงสุดในแบบจำลองการปรับตารางเวลาให้เหมาะสมที่สุด ควรพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นที่เป็นไปได้ของการใช้พลังงานจุดของรถไฟ มิฉะนั้นประสิทธิภาพพลังงานทั้งหมดอาจลดลงหากการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานจุดมีมากกว่าการใช้พลังงานเบรกจ่ายคืน

2.6 สรุป

บทนี้สรุป และรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน งานวิจัยดังกล่าวถูกใช้เพื่อเป็นกรณีศึกษา การนำมาปรับประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และสามารถยืนยันได้ว่า การนำการจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ร่วมกับพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากรถไฟเบรกเพื่อใช้จ่ายให้กับรถไฟที่กำลังเร่งในระบบรถไฟฟ้าสามารถลดพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน หรือ พลังงานรวมของระบบได้จริงจากผลการจำลองดังที่กล่าวมาแล้ว ในบทถัดไปจะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานของระบบจ่ายไฟฟ้าทางรถไฟ และระบบรถไฟฟ้าในประเทศไทย เป็นต้น ซึ่งเป็นประเด็นที่สำคัญในวิทยานิพนธ์เล่มนี้



บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟมีความสำคัญอย่างมากในระบบรถไฟไฟฟ้าเนื่องจากเป็นระบบที่จ่ายพลังงานให้กับรถไฟที่เคลื่อนที่ในระบบ และสถานีรับส่งผู้โดยสาร โดยหลัก ๆ แล้วประกอบไปด้วย วงจรการแปลงกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้น ระบบจ่ายไฟฟ้าเป็นหนึ่งในประเด็นหลักที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เนื่องจากนำพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกจ่ายย้อนกลับเข้าสู่ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าแล้วช่วยจ่ายพลังงานให้กับรถไฟที่กำลังเร่งในระบบ บทนี้นำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ เกี่ยวกับระบบจ่ายไฟฟ้าทางรถไฟ ประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน กระแส และระบบการจ่ายพลังงาน และสุดท้ายกล่าวถึงรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย

3.2 ระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟ

มีระบบการลากจูงไฟฟ้าที่หลากหลายทั่วโลก ซึ่งสร้างขึ้นตามประเภทของราง ตำแหน่ง และเทคโนโลยีที่เข้าถึงได้ในช่วงการติดตั้ง เห็นได้ในปัจจุบัน การติดตั้งจำนวนมากถูกสร้างขึ้นเมื่อ 100 ปีที่แล้วเป็นครั้งแรก ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา มีการเติบโตอย่างรวดเร็วของรถไฟฟ้าเนื่องจากประโยชน์มหาศาลของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลในอุตสาหกรรมรถไฟ เทคโนโลยีพลังงานไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับการจัดหามอเตอร์ไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าคุณภาพดี ประกอบด้วยเทคโนโลยีการแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นหลักที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน วงจรป้อนสำหรับระบบป้อน DC และ AC และโครงสร้างสายเหนือศีรษะ วัสดุการวัด และการบำรุงรักษา ตารางที่ 3.1 แสดงระบบป้อนที่แตกต่างกันทั่วโลก และระยะทางของกระแสไฟฟ้า การใช้งานไฟฟ้าบนทางรถไฟที่มีโมเมนต์ยาวหรือทางรถไฟใต้ดินจำนวนมากมักนิยมใช้กัน เนื่องจากประสิทธิภาพด้านกำลังไฟฟ้ามากกว่าเครื่องยนต์ไอน้าหรือดีเซล ไม่ต้องการการเผาไหม้บนเครื่องยนต์ แรงฉุดที่ยกระดับยังทำให้การทำงานด้วยไฟฟ้าเหมาะสมกับแนวลาดชัน ส่งผลให้มีความคืบหน้าในการดำเนินกิจการรถไฟฟ้า เริ่มต้นด้วยระบบป้อน DC ที่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ DC ได้โดยตรง ให้แรงฉุดที่สูงขึ้น และให้การควบคุมความเร็วที่ง่ายขึ้น ในขณะที่ระบบจ่ายแบบกระแสตรง 3000 V มักใช้ในหลายประเทศการรถไฟฟ้าของญี่ปุ่นใช้ระบบ 1500 V DC

ระบบจ่ายไฟฟ้า AC อีกแบบหนึ่งผลิตขึ้นโดยใช้เครื่องยนต์แบบสับเปลี่ยนเฟสเดียวในยุโรป เพื่อลดความล้มเหลวความถี่ต่ำพิเศษ เช่น 25 Hz และ 16.66 Hz ได้ถูกนำมาใช้ในหลายประเทศ รวมถึงออสเตรียและเยอรมนี การพัฒนาที่ตามมาเป็นเทคโนโลยีตัวเปลี่ยนซิลิคอนดำเนินการสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้า AC ในฝรั่งเศสและที่อื่น ๆ โดยระบบ 25 kV นั้นใช้กันทั่วไปทั่วโลกในขณะที่ญี่ปุ่นใช้ระบบจ่ายไฟฟ้า 25 kV ของจีนคันเซ็น และแบบธรรมดาใช้ระบบจ่ายไฟฟ้า 20 kV ระบบจ่ายไฟฟ้า AC แบบ 3 เฟส ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ระดับภูเขาสูงชันในยุโรป ในขณะที่ระบบ 600 V พร้อมระบบควบคุมความเร็วของตัวแปลงพลังงานจะใช้สำหรับรูปแบบการขนส่งในเมืองใหม่ในประเทศญี่ปุ่น (Elbelkasi, 2020)

ทั่วโลกมีการใช้ระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกันหลายระบบ พารามิเตอร์หลักสามตัวที่ใช้จำแนกระบบไฟฟ้าได้ดังนี้ แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน กระแส และระบบการจ่ายพลังงาน (Frey, 2012) โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้พารามิเตอร์หลักสามตัวในการจำแนก คือ แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และระบบการจ่ายพลังงาน

ตารางที่ 3.1 ระบบไฟฟ้าทางรถไฟและระยะทางที่ใช้ไฟฟ้าของรถไฟทั่วโลก (ที่มา Elbelkasi, 2020)

System Type		Japan 1		World (Japan included)			
		km	%	Km	%	Major Countries	
Direct current (V)	V < 1,500 V	915	5.0	5,106	2	Germany, UK, Switzerland, USA	
	1,500 ≤ V ≤ 3,000	10,418	61.0	22,138	9	France, Spain, Netherlands, Australia	
	V ≥ 3,000			78,276	33	Russia, Poland, Italy, Spain, South Africa	
Single phase AC (KV)	50-60 Hz	≤ 20 kV		245	0	France, USA	
		20 kV	3,741	22.0	3,741	2	
		25 kV	2,037	12.0	84,376	36	Russia, France, Romania, India, China
		50 kV			1,173	0	USA, Canada, South Africa
	25 Hz				1,469	1	USA, Austria, Norway
	16.66 Hz	11 kV			120	0	Switzerland
15 kV				35,416	15	Germany, Sweden, Switzerland	
Three-phase		30	0	43	0	Switzerland, France	
Unrecognized				3,668	2	Kazakhstan, France	
Sum		17,207	100	235,816	100		

3.2.1 แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

สำหรับการกำหนดมาตรฐานยุโรปและระดับสากล เลือกแรงดันไฟฟ้าที่ใช้บ่อยที่สุด 6 แบบ แรงดันไฟฟ้าเหล่านี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบสัมผัสที่ใช้ ตัวอย่างเช่น 750 V DC สามารถใช้กับรางที่สาม และสายเหนือศีรษะซึ่งมักใช้โดยรถรางมีการใช้แรงดันไฟฟ้าอื่น ๆ ทั่วโลกในการจ่ายไฟฟ้าระบบราง และรายการระบบลากรางด้วยไฟฟ้าในปัจจุบัน รวมทั้งระบบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานและไม่ได้มาตรฐานแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 ดังที่กล่าวไว้ในมาตรฐาน BS EN 50163 และ IEC 60850 ค่าสูงสุด ช่วงแรงดันไฟฟ้าที่อนุญาตสำหรับแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน โดยคำนึงถึงปริมาณและระยะทางจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของขบวนรถไฟที่วิ่งตามกระแสไฟฟ้าที่ผลิตโดยสถานีไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านสายส่งไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Srivastava et al., 2013) สำหรับรางไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้าที่รับที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนโดยทั่วไปจะมีแรงดันไฟฟ้าสูงเป็นพิเศษที่ 22 kV, 66 kV หรือ 77 kV แรงดันถูกแปลงโดยหม้อแปลงไฟฟ้าเป็น 1200 V จากนั้นผ่านวงจรเรียงกระแสให้เป็นกระแสตรงที่แรงดันไฟฟ้า 1500 V (แรงดันไรโวลต์ 1620 V) ใช้ 600 หรือ 750 V DC ในรถไฟใต้ดินและรถไฟเอกชนบางสาย (Elbelkasi, 2020)

แรงดันไฟฟ้าที่รับเป็นแรงดันไฟฟ้าสูงพิเศษ 66 kV, 77 kV, 110 kV หรือ 154 kV, 220 kV หรือ 275 kV สำหรับรางไฟฟ้ามาตรฐานกระแสสลับ แรงดันป้อน 20 kV (Elbelkasi, 2020)

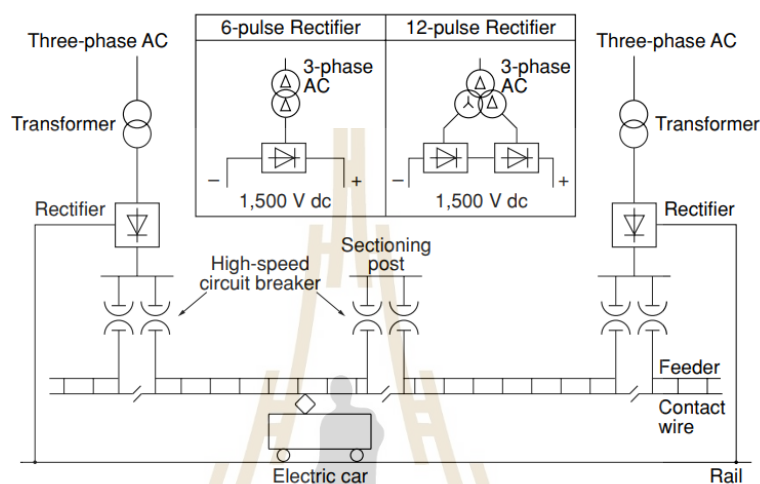
ตารางที่ 3.2 แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

Traction system	Non-Permanent Lowest Voltage	Permanent Lowest Voltage	Rate Voltage	Permanent Highest Voltage	Non-Permanent Highest Voltage
600 V DC	400 V	400 V	600 V	720 V	800 V
750 V DC	500 V	500 V	750 V	900 V	1 kV
1,500 V DC	1 kV	1 kV	1.5 kV	1.8 kV	1.95 kV
3 kV DC	2 kV	2 kV	3 kV	3.6 kV	3.9 kV
15 kV AC, 16.7 Hz	11 kV	12 kV	15 kV	17.25 kV	18 kV
25 kV AC, 50 Hz	17.5 kV	19 kV	25 kV	27.5 kV	29 kV

3.2.2 ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟสใช้สำหรับการแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสไปเป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากวงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟสใช้รูปแบบ 6 พัลส์ จึงสร้างฮาร์มอนิกที่ลดลงที่ด้าน AC และความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้า ทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าลดลง ปัจจุบัน ตัวเรียงกระแส 6 พัลส์สองชุดถูกใช้เพื่อสร้างตัวเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ ทั้งสองชุดสามารถเชื่อมต่อแบบอนุกรมหรือขนานกันโดยมีการเลื่อนเฟส 30° ระหว่างแรงดันไฟ AC ขาเข้า การกำหนดค่าดังกล่าวมีประโยชน์สำหรับการลดฮาร์มอนิก รูปที่ 3.1 เป็นตัวอย่างของโครงสร้างวงจรจ่าย

กระแสไฟฟ้า DC ที่เชื่อมต่อกับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ใกล้ที่สุด บางครั้งใช้ section และ tie post เพื่อหลีกเลี่ยงแรงดันไฟตกบนรางคู่ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่อยู่ห่างกัน ในกรณีนี้เซอร์กิตเบรกเกอร์ความเร็วสูงจะเชื่อมต่อรางขาไปและขากลับ สำหรับเส้นทางสายหลักในเขตปริมณฑล ระยะห่างระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนประมาณ 5 km และสำหรับสายอื่นประมาณ 10 km (Elbelkasi, 2020)



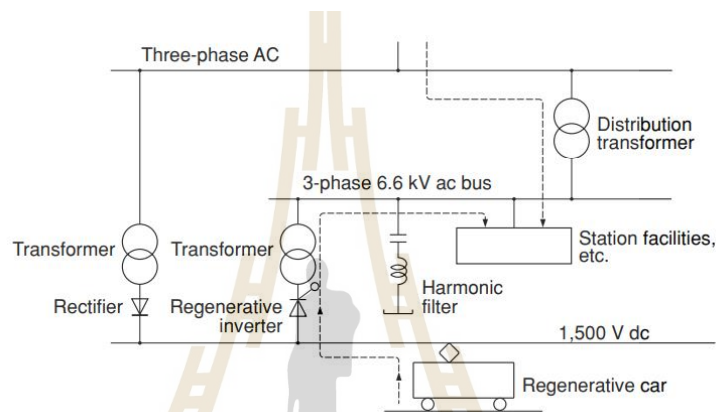
รูปที่ 3.1 โครงสร้างวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้า DC
ที่มาภาพ: (Elbelkasi, 2020)

ในการระบุตำแหน่งที่ถูกต้องของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนบนระบบรางจำเป็นต้องมีการประเมินอย่างละเอียดถี่ถ้วน ต้องกำหนดตำแหน่งที่แม่นยำของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนหลังจากกำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ 600 V, 750 V, 1500 V หรือ 3000 V การตัดสินใจนี้ใช้ประสิทธิภาพทางเทคนิคของโครงการพลังงาน แต่ยังคงคำนึงถึงตัวแปรอื่น ๆ ที่จะเป็นตัวกำหนดทางเลือกสุดท้าย ความพร้อมของที่ดิน ตำแหน่งของทางแยกและทางแยก การจัดหาถนนเพื่อเข้าถึงประตูหลักของอาคารเพื่ออำนวยความสะดวกในการขนส่งชิ้นส่วนอะไหล่ของโรงงานและอุปกรณ์ทดสอบการบำรุงรักษาที่จำเป็น (Kurdak et al., 2010) ระยะทางสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ประหยัดที่สุดแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ระยะทางระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

Operating Voltage (V)	600	750	1500	3000
Distance (km)	3-4	5-6	8-13	20-30

มีการพยายามในการใช้พลังงานเบรกจ่ายคืนบนระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่ระหว่างการลดความเร็วของรถไฟฟ้ายุโรปจะทำการแปลงพลังงานจลน์เป็นพลังงานไฟฟ้าและจ่ายคืนสู่สายส่งไฟฟ้าเหนือศีรษะ แต่ถ้าไม่มีรถไฟฟ้ายุโรปในส่วนนี้ พลังงานเบรกจ่ายคืนจะสูญเสียไป วงจรเรียงกระแสไทรสเตอร์ อินเวอร์เตอร์ไทรสเตอร์ ตัวต้านทานสับไทรสเตอร์ หรือรูปแบบการจ่ายพลังงานขาไปและขากลับพร้อมกันสามารถป้องกันการสูญเสียนี้ได้ ในบางพื้นที่จะใช้อุปกรณ์ดังกล่าว รูปที่ 3.2 แสดงอินสแตนซ์อินเวอร์เตอร์ไทรสเตอร์ พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่นั้นจ่ายจากวงจรเรียงกระแสในระบบนี้ และหากพลังงานเบรกจ่ายคืนเกินความต้องการของพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน อินเวอร์เตอร์จะเปิดใช้งานโดยอัตโนมัติเพื่อจ่ายพลังงานให้กับสถานี (Oura et al., 1998)



รูปที่ 3.2 พลังงานเบรกจ่ายคืนด้วยวงจรไทรสเตอร์อินเวอร์เตอร์
ที่มาภาพ: (Elbelkasi, 2020)

3.2.3 ระบบการจ่ายพลังงาน (contact system)

3.2.3.1 ระบบสายส่งเหนือศีรษะ (Catenary System)

พลังงานไฟฟ้าใช้สำหรับมอเตอร์ ไฟส่องสว่าง และเครื่องปรับอากาศ อุปกรณ์เหล่านี้นำพลังงานมาจากสายส่งเหนือศีรษะโดยใช้ pantograph contact ไม่ว่าจะรถไฟจะเคลื่อนที่หรือไม่ก็ตามแป้นโทกราฟจะติดกับสายส่งเหนือศีรษะ pantograph จะต้องคงไว้โดยติดต่อกับสายเหนือศีรษะเพื่อให้จ่ายพลังงานได้อย่างต่อเนื่องและมีคุณภาพดีตลอดเวลา (Oura et al., 1998) การสูญเสียการสัมผัสเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา เนื่องจากอาจส่งผลให้เกิดอาร์คที่นำไปสู่การเสื่อมสภาพของรูปคลื่นไซน์และทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกความถี่สูง (Octavio et al., 2013) ดังนั้นอุปกรณ์เหนือศีรษะจึงได้รับการออกแบบดังต่อไปนี้ (Oura et al., 1998)

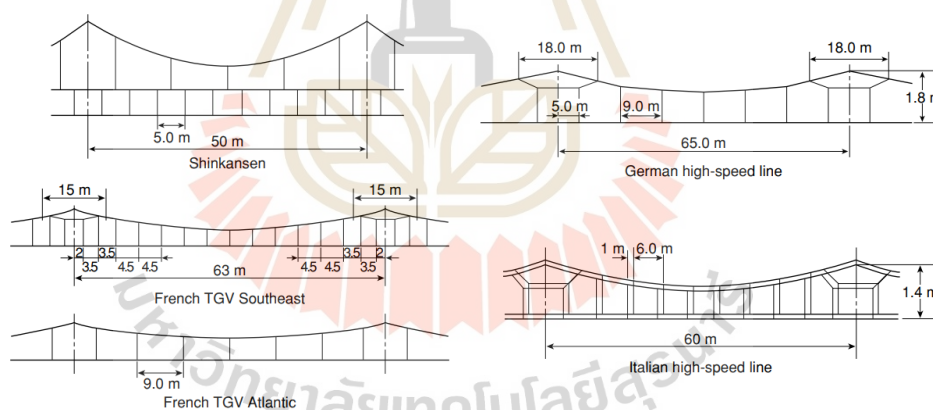
- (1) มีคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนดของความเร็วและกระแสของรถไฟ
- (2) มีค่าคงที่สปริงสม่ำเสมอของอุปกรณ์ทั้งหมดและความสูงสม่ำเสมอเพื่อปรับลักษณะการเก็บพลังงานของแป้นโทกราฟให้เหมาะสม
- (3) มีการลั่นสะเทือนต่ำเพื่อให้แป้นโทกราฟรับพลังงานอย่างราบรื่นระหว่างการดำเนินงานที่ความเร็วสูง

Catenaries สามารถจำแนกได้เป็นสามประเภทที่ใช้ในระบบรถไฟความเร็วสูงได้แก่ แบบ simple stitch และ compound ระบบ simple contact ใช้กับรถไฟที่เชื่อมต่อเมืองต่าง ๆ ของจังหวัด ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีการบริการที่มีความหนาแน่นสูง (Park et al., 2002)

ระบบ simple contact ประกอบด้วยสามองค์ประกอบพื้นฐาน สายเมสเซนเจอร์ สายคอนแทค และดรอปปเปอร์ สายเมสเซนเจอร์รองรับระบบเคเบิล สายคอนแทครองรับยานพาหนะ ดรอปปเปอร์เป็นสายเคเบิลแนวตั้งที่เชื่อมต่อด้วยไฟฟ้าและเชื่อมต่อโยงทางกลไกโดยใช้แคลมป์บนสายเมสเซนเจอร์และสายคอนแทค (Kurdak et al., 2010)

ระบบ stitch contact จะใช้ลวดเพิ่มเติมที่โครงสร้างรองรับแต่ละอัน ซึ่งสิ้นสุดที่ด้านใดด้านหนึ่งของสายเมสเซนเจอร์

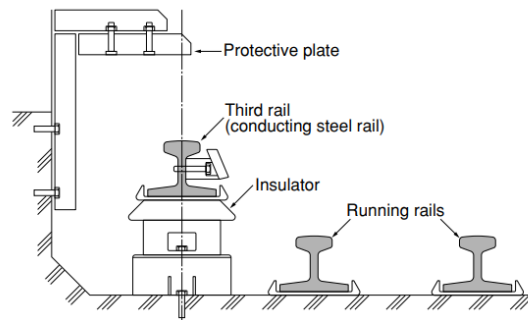
ระบบ compound contact ใช้สายเสริมระหว่างสายเมสเซนเจอร์ และสายคอนแทค ดรอปปเปอร์รองรับอุปกรณ์เสริมนี้จากสายเมสเซนเจอร์ ลวดเสริมสร้างจากโลหะที่นำไฟฟ้าและความต้านทานต่ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งกำลัง รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบโครงข่ายรถไฟความเร็วสูงในประเทศต่าง ๆ และในประเทศญี่ปุ่น สายไฟตามยาวสามเส้นถูกนำมาใช้เพื่อต่อฟ่วงอุปกรณ์ compound catenary สำหรับชินคันเซ็น ในขณะที่ในยุโรปจะใช้อุปกรณ์ simple หรือ compound catenary อุปกรณ์ twin catenary ถูกใช้โดยรถไฟความเร็วสูงของอิตาลีเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่สำหรับการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 3 kV (Frey, 2012)



รูปที่ 3.3 สายส่งไฟเหนือศีรษะของรถไฟความเร็วสูง
ที่มาภาพ: (Oura et al., 1998)

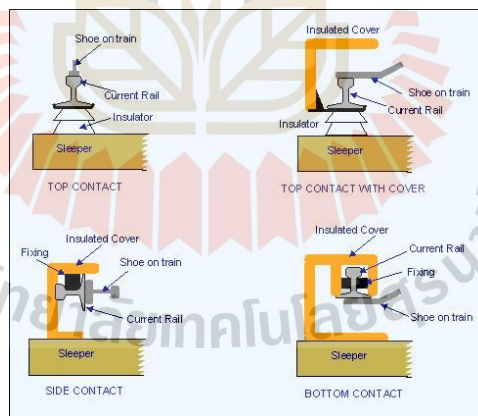
3.2.3.2 ระบบรางที่สาม (Third rail)

รางที่สามเป็นวิธีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับรางรถไฟตามรางรถไฟหรือระหว่างรางผ่านตัวนำแข็งแบบต่อเนื่อง โดยทั่วไปจะใช้ในระบบขนส่งมวลชนหรือระบบขนส่งมวลชนทางด่วนที่ ตัวรางที่สามจะถูกวางไว้ข้างรางเพื่อประหยัดพื้นที่ในรถไฟใต้ดินที่ถูกจำกัด มีแรงดันไฟฟ้า 600 V หรือ 750 V รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของระบบรางที่สาม (Kurdak et al., 2010)



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของระบบรางที่สาม
ที่มาภาพ: (Elbelkasi, 2020)

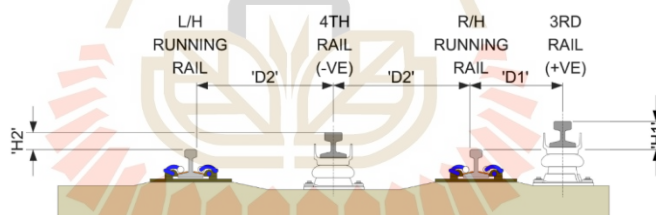
โดยปกติรางที่สามจะอยู่นอกรางวิ่งทั้งสองราง แต่บางครั้งก็ไประหว่างรางทั้งสอง กระแสไฟฟ้าถูกส่งไปยังรถไฟผ่านหน้าสัมผัสเลื่อนที่สัมผัสกับราง มีที่กำบังแบบแยกได้ในหลายระบบเหนือรางที่สาม เพื่อปกป้องพนักงานที่ทำงานใกล้ราง บางครั้งหน้าสัมผัสมีจุดประสงค์เพื่อสัมผัสกับรางที่สาม (เรียกว่าวิ่งด้านข้าง) หรือด้านล่างของรางที่สาม (เรียกว่าวิ่งด้านล่าง) ทำให้สามารถติดตั้งฝาครอบป้องกันได้โดยตรงบนพื้นผิวด้านบน (เรียกว่าวิ่งบน) เมื่อหน้าสัมผัสเลื่อนอยู่ด้านบน เมื่อหน้าสัมผัสเลื่อนอยู่ด้านล่างการสะสมของหิมะหรือใบไม้จะไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง แสดงในรูปที่ 3.5 (Oura et al., 1998)



รูปที่ 3.5 รูปแบบหน้าสัมผัสประเภทต่าง ๆ ในระบบรางที่สาม
ที่มาภาพ: <http://www.railway-technical.com/infrastructure/electric-traction-power.html>
[เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน 2565]

3.2.3.3 ระบบรางที่สี่

รถไฟใต้ดินลอนดอนในอังกฤษเป็นหนึ่งในเครือข่ายไม่กี่แห่งที่ใช้ระบบรางที่สี่ รางเพิ่มมานี้ใช้เป็นรางไฟฟ้าส่งคืน รางที่สามและเครือข่ายเหนือศีรษะมีใช้รางวิ่งเป็นรางไฟฟ้าส่งคืน บนรถไฟใต้ดินลอนดอน รางที่สามสัมผัสด้านบนอยู่ข้างรางจ่ายไฟที่ +420 V DC และรางที่สี่สัมผัสด้านบนตั้งอยู่ตรงกลางระหว่างรางวิ่งที่ -210 V DC ซึ่งรวมกันทำให้เกิดแรงดันไฟที่ 630 V DC รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างของระบบรางที่สี่ ระบบเดียวกันนี้ใช้สำหรับรถไฟใต้ดินสายแรกของมิลาน นั่นคือสาย 1 ของมิลานเมโทร ซึ่งสายล่าสุดใช้ทั้งระบบสายส่งเหนือศีรษะ และแบบรางที่สี่ ข้อได้เปรียบที่สำคัญของระบบสี่รางคือไม่มีรางวิ่งใด ๆ ที่มีกระแสไฟฟ้า รูปแบบนี้ถูกนำมาใช้เพราะปัญหาจากกระแสไหลกลับ ซึ่งควรมาจากรางวิ่ง (สายดิน) แต่กลับไหลทางผนังอุโมงค์เหล็กแทน สิ่งนี้ทำให้เกิดความเสียหายจากไฟฟ้า shock และแม้กระทั่งการอาร์คเป็นประกายไฟถ้าทุกส่วนของอุโมงค์ไม่ bond กันให้ดี เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลไม่สะดวกช่วงรอยต่อจะทำให้เกิดประกายไฟกระโดดข้ามระหว่างตัวนำได้ แต่ปัญหาก็เลวร้ายลงไปอีกเพราะกระแสไหลกลับยังมีแนวโน้มที่จะไหลผ่านท่อเหล็กที่ใกล้เคียงที่ใช้สร้างท่อน้ำและท่อก๊าซ บางส่วนของท่อเหล่านี้คือท่อเมนวิคตอเรียที่สร้างก่อนรถไฟใต้ดินกรุงลอนดอนไม่ได้ถูกสร้างขึ้นมารับกระแสและไม่มีการ bond เพียงพอระหว่างกลุ่มท่อ ระบบรางที่สี่แก้ปัญหานี้ แม้ว่าการจ่ายกระแสไฟฟ้ามีจุดกราวด์ที่ถูกสร้างขึ้น การเชื่อมต่อแบบนี้ยังได้มาโดยการใช้วัสดุที่มีความนำไฟฟ้าสูงซึ่งทำให้มั่นใจได้ว่ากระแสดินที่กระจัดกระจายจะถูกจัดการให้อยู่ในระดับที่บริหารจัดการได้ (Railway electrification system, 2017)



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของระบบรางที่สี่

ที่มาภาพ: Rail Electrification system

[เข้าถึงเมื่อ 20 มิถุนายน 2565]

3.3 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย

สืบเนื่องจากปัญหาด้านการจราจรในกรุงเทพมหานครในปัจจุบันมีความรุนแรงที่สูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มพื้นที่ถนนและระบบทางด่วนไม่สามารถลดความรุนแรงของปัญหาลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แนวทางการแก้ปัญหาการจราจรโดยใช้ระบบขนส่งมวลชนที่มีประสิทธิภาพจึงถูกนำมาใช้ โดยรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Mass transit) แบ่งเป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรง และระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสสลับ ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงเป็นรถไฟในเมือง มีความเร็วสูงสุดที่ 80 km/h. ประกอบไปด้วย รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพ (BTS Skytrain, Bangkok Mass Transit System) และ รถไฟฟ้ามหานคร (MRT, Metropolitan Rapid Transit

Chaloem Ratchamongkhon Line) รถไฟฟ้า BTS มีเส้นทางให้บริการสองเส้นทางได้แก่ สาย สุขุมวิท (สายสีเขียวอ่อน) หรือรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ 6 รอบพระชนพรรษาสาย 1 ให้บริการจาก สถานีแบริ่งถึงสถานีหมอชิต และรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ 6 รอบพระชนมพรรษาสาย 2 ให้บริการ จากสถานีสนามกีฬาแห่งชาติถึงสถานีบางหว้า รูปที่ 3.7 แสดงขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพฯ ที่ให้บริการ รถไฟฟ้าเอ็มอาร์ทีมีเส้นทางให้บริการสองเส้นทางได้แก่ รถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล (สายสี น้ำเงิน) ให้บริการจากสถานีท่าพระถึงสถานีหลักสอง และรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วง) ให้บริการตั้งแต่สถานีคลองบางไผ่ถึงสถานีเตาปูน (การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย, 2554) รูปที่ 3.8 แสดงขบวนรถไฟฟ้ามหานครที่ให้บริการ



รูปที่ 3.7 ขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพฯ

ที่มาภาพ: <https://www.brandbuffet.in.th/2019/04/railway-thailand-arl-bts-mrt>

[เข้าถึงเมื่อ 20 มิถุนายน 2565]



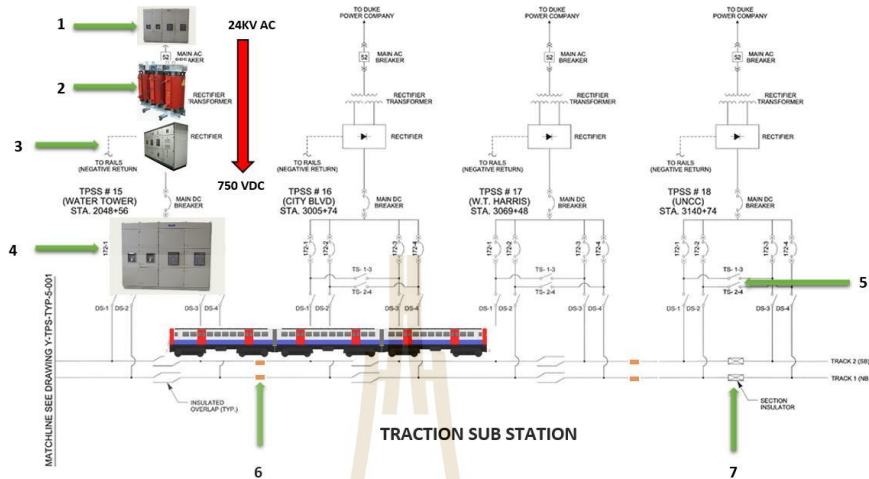
รูปที่ 3.8 ขบวนรถไฟฟ้ามหานคร

ที่มาภาพ: <https://metro.bemplc.co.th/MRT-System>

[เข้าถึงเมื่อ 20 มิถุนายน 2565]

รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพฯ และรถไฟฟ้ามหานครใช้ระบบการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านรางที่สามแรงดัน 750 V สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนติดตั้งอยู่ที่สถานีบริการของรถไฟฟ้า (ไม่ทุกสถานี

แล้วแต่การออกแบบ) มีการทำงานและส่วนประกอบแสดงดังรูปที่ 3.9 การทำงานและส่วนประกอบของระบบการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
ที่มาภาพ: (The Electric Railway System - เรียนรู้ระบบรถไฟ, 2015)

- (1) 24kV สวิตช์เกียร์ (AC Switch gear) เป็นตัวตัดต่อไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดัน 24 kV ก่อนเข้าหม้อแปลง
- (2) หม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction transformer) ทำการลดระดับแรงดันจาก 24 kV ลงมาที่ระดับแรงดันไม่เกิน 600 VAC
- (3) ตัวเรียงกระแส (Rectifier unit) จะนำแรงดันไม่เกิน 600 VAC แปลงเป็น 750 VDC ไฟฟ้าขั้วบวกจะจ่ายไปยังรางที่สาม ส่วนขั้วลบนั้นจ่ายให้กับรางวิ่งเมื่อรถไฟวิ่งจะครบวงจร
- (4) สวิตช์เกียร์กระแสตรง (DC switch gear) จะทำการตัดต่อไฟกระแสตรง 750 VDC มีชุดที่จ่ายให้รางที่สามขาไปและขากลับอย่างละ 2 ชุด และชุดหลัก 1 ชุด รวมทั้งหมด 5 ชุด
- (5) บายพาสสวิตช์ (By pass switch) ใช้เพื่อต่อรับไฟฟ้าหากตัดใดตัวหนึ่งในคู่ของตัวเองมีปัญหา
- (6) สวิตช์ข้างทาง (Wayside switch) ใช้ทำการตัดต่อไฟฟ้าระหว่าง เซ็กชันต่าง ๆ เมื่อสังเกตจะเห็นว่ารางที่สามนั้นไม่ได้เป็นเส้นเดียวกันตลอด และสะดวกต่อการตัดไฟหากเกิดกรณีฉุกเฉิน รวมถึงการซ่อมบำรุง
- (7) ส่วนฉนวน (Section insulation) ใช้เพื่อแบ่งส่วนของรางรถไฟ เช่น สถานีต่อสถานี หรือย่อยเป็นส่วน ๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อการระบุวาร์ตไฟฟ้าอยู่ส่วนไหนของเส้นทาง

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอความหมายและรายละเอียดเกี่ยวกับระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟที่กล่าวถึงประเภทของแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และระบบการจ่ายพลังงาน ที่ใช้ในระบบรถไฟ รวมถึงรถไฟฟ้ามหานครในประเทศไทย ซึ่งเป็นรายละเอียดเบื้องต้นที่สำคัญ และพื้นฐานสำหรับการจำลองระบบรถไฟที่แสดงในบทถัดไป โดยในบทถัดไปเป็นรายละเอียดเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ และการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองระบบรถไฟในวิทยานิพนธ์เล่มนี้



บทที่ 4

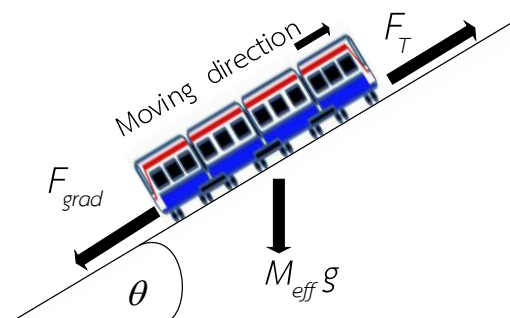
แบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง และการจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุด

4.1 บทนำ

ในการศึกษาระบบขับเคลื่อนและระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเพื่อการทดลองกับระบบจริง ในปัจจุบันจึงนิยมสร้างแบบจำลองของระบบรถไฟฟ้าที่คำนวณผ่านคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงแทน การสร้างแบบจำลองทำให้รู้พฤติกรรมและการทำงานของระบบรถไฟฟ้า เช่น การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ เป็นต้น โดยความถูกต้องของผลการจำลองขึ้นอยู่กับการสร้างแบบจำลองของระบบรถไฟฟ้าโดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการจำลองระบบรถไฟฟ้าให้ใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุดในทางปฏิบัติ บทนี้นำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบรถไฟฟ้า โดยแบ่งเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ 4.2 การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า 4.3 การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบตัวนำเดี่ยว 4.4 แบบจำลองการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟ และตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรก และ 4.5 การจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุด

4.2 การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

ความเร็วของรถไฟ อัตราเร่ง และตำแหน่ง เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่นำมาพิจารณาในการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟแบบไดนามิก แรงฉุดของรถไฟได้มาจากการใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน ดังแสดงในสมการ (4.1) รถไฟเคลื่อนตัวขึ้นบนผิวรางลาดเอียงการเคลื่อนที่ที่สามารถแสดงแรงทางคณิตศาสตร์ได้โดยใช้แผนภาพอิสระของรถไฟฟ้าที่อธิบายแรงทั้งหมดที่กระทำต่อรถไฟดังแสดงในรูปที่ 4.1 แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟที่แสดงในสมการที่ (4.2) (กุลวรรวานิชพงษ์, 2561)



รูปที่ 4.1 แผนภาพอิสระการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

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

$$F_R = F_{RR} + F_{drag} + F_{grad} \quad (4.2)$$

โดยที่	F_T	คือ แรงฉุดของรถไฟฟ้า (N)
	F_R	คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ (N)
	M_{eff}	คือ ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟ (kg)
	a	คือ อัตราเร่งของรถไฟฟ้า (m/s^2)
	F_{RR}	คือ แรงต้านการหมุน (N)
	F_{drag}	คือ แรงต้านอากาศ (N)
	F_{grad}	คือ แรงต้านเนื่องจากความชัน (N)

แรงขับเคลื่อนรถไฟฟ้าหรือแรงฉุดขบวนรถไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นที่ขอบของล้อที่สัมผัสกับรางรถไฟ ปริมาณแรงฉุดมีค่าแปรผันไปตามความต้องการของแรงที่ใช้ขับเคลื่อนในโหมดการเคลื่อนที่ต่าง ๆ และขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น น้ำหนักและความเร็วของรถไฟฟ้า หรือคุณลักษณะโดยทั่วไปของแรงฉุดขบวนรถไฟฟ้า

แรงต้านทานการหมุน คือ ความต้านทานการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนที่หมุน สาเหตุหลักมาจากแรงเสียดทานแรงบิด ได้แก่ แรงบิดแบร์ริง ผ้าเบรก ฟันเฟืองเสียดทาน เป็นต้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.3)

$$F_{RR} = f_R W \approx (f_0 + f_1 v) W \quad (4.3)$$

โดยที่	f_R	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการหมุน
	W	คือ โทลด์เพลลา (kg)
	f_0, f_1	คือ ค่าคงตัวใด ๆ
	v	คือ ความเร็วของรถไฟ (km/h)

การเคลื่อนที่ของรถไฟเกิดในอากาศและแรงที่กระทำโดยอากาศที่รถไฟจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของรถไฟ แรงต้านอากาศเป็นผลเป็นผลมาจากแรงพื้นฐานสามแรงได้แก่ ความแตกต่างของแรงดันด้านหน้าและด้านหลังของรถไฟเนื่องมาจากการแยกการไหลของอากาศ การเสียดสีที่ผิวแสดงถึงความขรุขระของพื้นผิวของรถไฟ และการไหลของอากาศเข้าสู่ชิ้นส่วนภายในของรถ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.4)

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_d A_F V_{air}^2 \quad (4.4)$$

โดยที่ ρ_{air} คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
 C_d คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (kg/m^3)
 A_F คือ พื้นที่หน้าตัดด้านหน้าของรถไฟที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ (m^2)
 V_{air} คือ ความเร็วของอากาศเทียบกับตัวรถไฟ (m/s)

สมการของเดวิสหรือแรงต้านของการเคลื่อนที่ของรถไฟที่เกิดจากแรงต้านการหมุน และ แรงต้านอากาศ แสดงดังสมการที่ (4.5) เนื่องจากแรงทั้งสองเป็นคุณสมบัติของรถไฟแต่ละขบวน โดยจะแปรผันตามความเร็วของรถไฟเท่านั้น โดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์ของสมการเดวิส คือ A (kN), B (kNh/km), C (kNh²/km²) และ v (km/h) คือ ความเร็วของรถไฟ

$$F_{RR} + F_{drag} = A + Bv + Cv^2 \quad (4.5)$$

แรงต้านเนื่องจากความชันเป็นจะมีทิศตรงกันข้ามของรถไฟ ซึ่งเป็นผลมาจากมวลรถไฟฟ้าที่วิ่งไปบนรางเอียงที่ทำมุมกับพื้น แสดงดังสมการที่ (4.6)

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

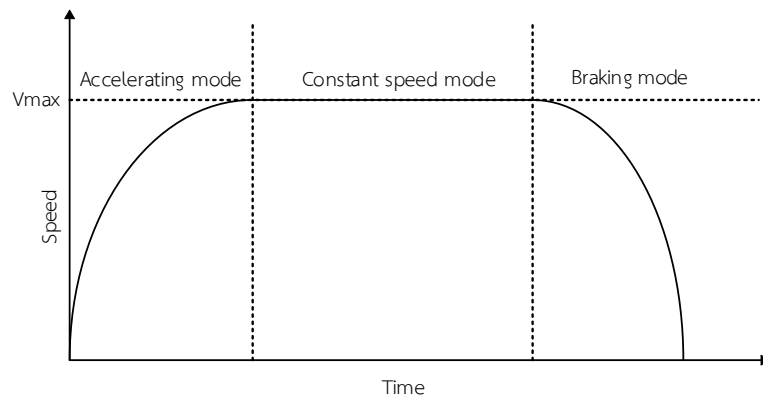
โดยที่ g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
 θ คือ มุมที่รางรถไฟฟ้าเอียงทำมุมกับเส้นแนวนอน ($^\circ$)

ค่าประสิทธิภาพของน้ำหนักรถไฟสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.7)

$$M_{eff} = M_t (1 + \lambda_{eff}) \quad (4.7)$$

โดยที่ M_t คือ น้ำหนักรถเปล่า (ton)
 λ_{eff} คือ ตัวประกอบมวลประสิทธิภาพ

รูปแบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 โหมดการทำงาน คือ โหมดเร่ง (accelerating mode) โหมดความเร็วคงที่ (constant speed mode) และ โหมดการเบรก (braking mode) ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โหมดการทำงานของรถไฟฟ้า

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจะต้องคำนวณแรงฉุดของรถไฟฟ้าแล้วจะทำการอัปเดตระยะทางและความเร็วของรถไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.8) - (4.9)

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a\Delta t \quad (4.8)$$

$$s(t + \Delta t) = s(t) + v(t)\Delta t + \frac{1}{2}a(\Delta t)^2 \quad (4.9)$$

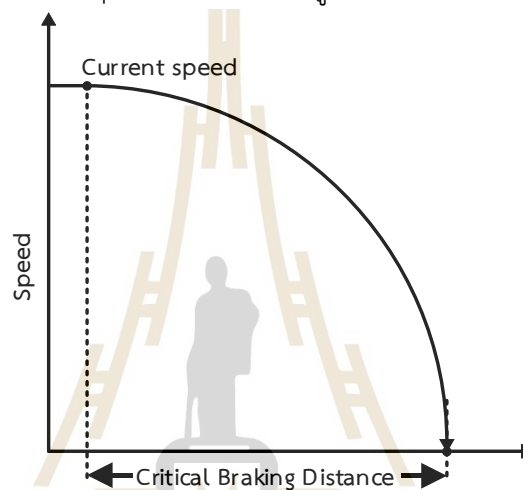
โดยที่	t	คือ เวลาที่ใช้ในการจำลอง (s)
	Δt	คือ ช่วงการขยับเวลา (s)
	$v(t)$	คือ ความเร็วของรถไฟฟ้าก่อนการอัปเดต (m/s)
	$s(t)$	คือ ตำแหน่งของรถไฟฟ้าก่อนการอัปเดต (m)
	$v(t + \Delta t)$	คือ ความเร็วของรถไฟฟ้าหลังการอัปเดต (m/s)
	$s(t + \Delta t)$	คือ ตำแหน่งของรถไฟฟ้าหลังการอัปเดต (m)

กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.10)

$$P_T(t + \Delta t) = \begin{cases} \frac{F_T \times v(t + \Delta t)}{\eta_T} + P_{aux} & , a > 0 \\ P_{aux} & , a = 0 \\ \eta_T \times (F_T \times v(t + \Delta t)) + P_{aux} & , a < 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

โดยที่ P_T คือ กำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในเคลื่อนที่ (W)
 P_{aux} คือ พลังงานเสริมของรถไฟ (W)
 η_T คือ ประสิทธิภาพการทำงาน

การทำงานในโหมดเบรกของรถไฟจะทำงานเมื่อระยะห่างระหว่างรถไฟที่อัปเดตแล้วมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะวิกฤติการเบรกเพื่อให้รถไฟสามารถจอดรถที่สถานีขนส่งผู้โดยสารได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ (สัมภาวะคูปต์, 2560) สามารถคำนวณหาระยะวิกฤติการเบรกได้จากสมการ (4.11) และแผนภาพแสดงระยะวิกฤติการเบรกแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพระยะวิกฤติการเบรก
 ที่มาภาพ: (สัมภาวะคูปต์, 2560)

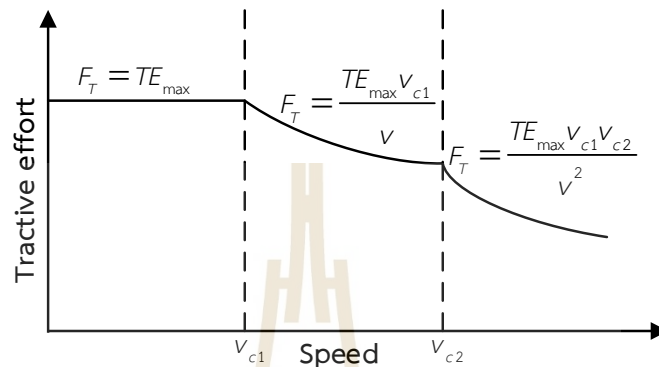
$$CBD = -\frac{v^2}{2a_{dec}} \quad (4.11)$$

โดยที่ CBD คือ ระยะวิกฤติการเบรก (m)
 v คือ ความเร็วของรถไฟในเวลานั้น (m/s)
 a_{dec} คือ ความเร่งที่เป็นลบของรถไฟ (m/s²)

ลักษณะแรงชุดของหัวรถจักรรถไฟที่แปรผันกับความเร็วเชิงเส้น

คุณลักษณะสมบัติของหัวรถจักรรถไฟในวิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอในรูปของแรงชุดรถไฟ (Tractive effort: F_T) โดยจะแปรผันตามความเร็วเชิงเส้นของรถไฟ แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรงชุดคงที่ (Constant force) ช่วงกำลังงานคงที่ (Constant power) เป็นช่วงที่

แรงบิดมอเตอร์ลดลงแต่สามารถจ่ายโหลดด้วยกำลังงานที่คงที่ได้ และช่วงกำลังงานลดทอน (Reduced power) เป็นช่วงการทำงานที่แรงบิดลดลงซึ่งผกผันกับความเร็วกำลังสอง โดยการเปลี่ยนช่วงการทำงานของรถไฟเช่นเปลี่ยนจากช่วงแรงฉุดคงที่เป็นช่วงกำลังงานคงที่จะขึ้นอยู่กับความเร็วของรถไฟ หรือก็คือเมื่อรถไฟมีความเร็วมากกว่าความเร็วฐาน (v_{c1} หรือ v_{c2}) ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 คุณลักษณะสมบัติแรงฉุดของหัวรถจักรไฟฟ้ากับความเร็วเชิงเส้น
ที่มาภาพ (สุตพรหม, 2019)

4.2.1 แบบจำลองรถไฟฟ้า

โหมดการทำงานของรถไฟแบ่งออกเป็น 3 โหมดหลัก ๆ ได้แก่ โหมดขับเคลื่อน (traction train) เป็นโหมดที่รถไฟรับกำลังไฟฟ้ามาจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เช่น เมื่อรถไฟทำงานในโหมดเร่ง และโหมดความเร็วคงที่ โหมดเบรก (braking train) เป็นโหมดที่รถไฟรับกำลังไฟฟ้ามาจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเพื่อจ่ายพลังงานให้กับกำลังไฟฟ้าเสริมในรถไฟ และโหมดเบรกจ่ายคืนพลังงาน (regenerative braking) เมื่อรถไฟทำงานในโหมดเบรกและจ่ายกำลังไฟฟ้าจากการเบรกเข้าสู่สายส่งตัวนำไฟฟ้า อาจเป็นสายส่งเหนือศีรษะ (overhead contact line) หรือรางที่สาม (third rail)

4.2.1.1 รถไฟฟ้าในโหมดขับเคลื่อน

รถไฟฟ้าในโหมดขับเคลื่อน คือ การที่รถไฟต้องการกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อน จำลองรถไฟฟ้าโหลดทางไฟฟ้าเป็นแหล่งรับกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าได้มาจากการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า (P_T) คือ กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ไฟฟ้าใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟตามแรงฉุด (P_{trac}) รวมกับกำลังไฟฟ้าเสริมที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ บนรถไฟฟ้า (P_{aux}) เช่น เครื่องปรับอากาศ และแสงสว่าง เป็นต้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.12) สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าที่รถไฟ ($I_{T,trac}$) ได้จากสมการ (4.13) V_T คือ แรงดันไฟฟ้าที่โนดรถไฟฟ้า

$$P_T = P_{trac} + P_{aux} \quad (4.12)$$

$$I_{T, trac} = \frac{P_T}{V_T} \quad (4.13)$$

4.2.1.2 รถไฟฟ้าในโหมดการเบรก

รถไฟฟ้าในโหมดเบรกเป็นการเบรกรถไฟฟ้าด้วยวิธีการเบรกทางไฟฟ้า โดยใช้การเบรกแบบพลวัต (dynamic braking) คือ การตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าออก และนำตัวต้านทานการเบรกต่อขนานเพื่อทำให้พลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกลายไปในรูปของความร้อนผ่านตัวต้านทานการเบรก(braking resistor) ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรก (P_{br}) เท่ากับกำลังไฟฟ้าเสริมที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ บนรถไฟฟ้าดังสมการที่ (4.14) สามารถคำนวณหากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรก (I_{br}) ได้จากสมการ (4.15)

$$P_{br} = P_{aux} \quad (4.14)$$

$$I_{br} = \frac{P_{aux}}{V_T} \quad (4.15)$$

4.2.1.3 รถไฟฟ้าในโหมดการเบรกจ่ายคืนพลังงาน

การเบรกจ่ายคืนพลังงานเป็นการเบรกทางไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนการทำงานของมอเตอร์ให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายคืนสู่ระบบไฟฟ้า โดยได้พลังงานทางกลมาจากการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าก่อนเกิดการเบรกของรถไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกจ่ายเข้าสู่ตัวนำไฟฟ้ารางที่สาม ดังนั้นการเบรกจ่ายคืนพลังงานต้องมีโหลดสำหรับรับพลังงานที่จ่ายจากรถไฟฟ้าเพื่อไม่ให้อำนาจไฟฟ้าในระบบมีค่าสูงซึ่งอาจส่งผลให้เกิดอันตรายได้ ในงานวิจัยนี้ให้การเบรกเกิดจากการให้ความเร่งเป็นลบเพื่อหยุดรถไฟฟ้า กำลังงานที่ได้จึงเป็นค่าลบ ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ได้เป็นค่าลบ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกจ่ายคืนพลังงานสามารถไหลย้อนกลับเข้าสู่ตัวนำรางที่สาม (P_{shared}) เท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรก (P_{brake}) หลังจ่ายพลังงานเสริมให้กับรถไฟฟ้าแล้วดังสมการ (4.16) สามารถคำนวณหากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกจ่ายคืนพลังงาน (I_{reg}) ได้ดังสมการ (4.17)

$$P_{shared} = P_{brake} + P_{aux} \quad ; P_{brake} < 0 \quad (4.16)$$

$$I_{shared} = \frac{P_{shared}}{V_T} \quad (4.17)$$

ขั้นตอนการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.5 สามารถสรุปขั้นตอนจำลองได้ดังต่อไปนี้

(1) กำหนดพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า เช่น น้ำหนักของขบวนรถไฟฟ้า ความเร่งของรถไฟฟ้า ความหน่วงของรถไฟฟ้า ความเร็วของรถไฟฟ้า ระยะสถานีรับส่งผู้โดยสาร และพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลอง

(2) ตรวจสอบโหมดการทำงานของรถไฟฟ้าว่าอยู่ในโหมดการทำงานไหน โหมดเร่งข้ามไปขั้นตอนที่ 3 โหมดคงความเร็วข้ามไปขั้นตอนที่ 4 โหมดเบรกข้ามไปขั้นตอนที่ 5 โหมดจอดข้ามไปขั้นตอนที่ 6

(3) โหมดเร่งความเร็ว ความเร่งเป็นบวกทำการคำนวณแรงฉุดของรถไฟฟ้าและแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าดังสมการที่ (4.1) - (4.7) ตรวจสอบและคำนวณแรงฉุดของรถไฟฟ้าที่แปรผันตามความเร็วของรถไฟฟ้า ตรวจสอบความเร็วของรถไฟฟ้า และตรวจสอบความเร็วของรถไฟฟ้าว่าเท่ากับความเร็วจำกัดหรือไม่ ถ้าใช่ ให้เข้าสู่โหมดคงความเร็ว

(4) โหมดคงความเร็ว ความเร่งเท่ากับศูนย์คำนวณแรงฉุดของรถไฟฟ้าและแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าดังสมการที่ (4.1) - (4.7) ตรวจสอบความเร็วของรถไฟฟ้าถ้ามีค่าเกินความเร็วจำกัดของรถไฟฟ้าให้เข้าสู่โหมดคงความเร็วแบบเบรก ถ้าความเร็วของรถไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าความเร็วจำกัดของรถไฟฟ้าให้เข้าสู่โหมดคงความเร็วแบบเร่ง ตรวจสอบระยะเวลาวิกฤติการเบรกจากสมการ (3.11) ถ้าถึงระยะเวลาวิกฤติการเบรกให้เข้าโหมดเบรก

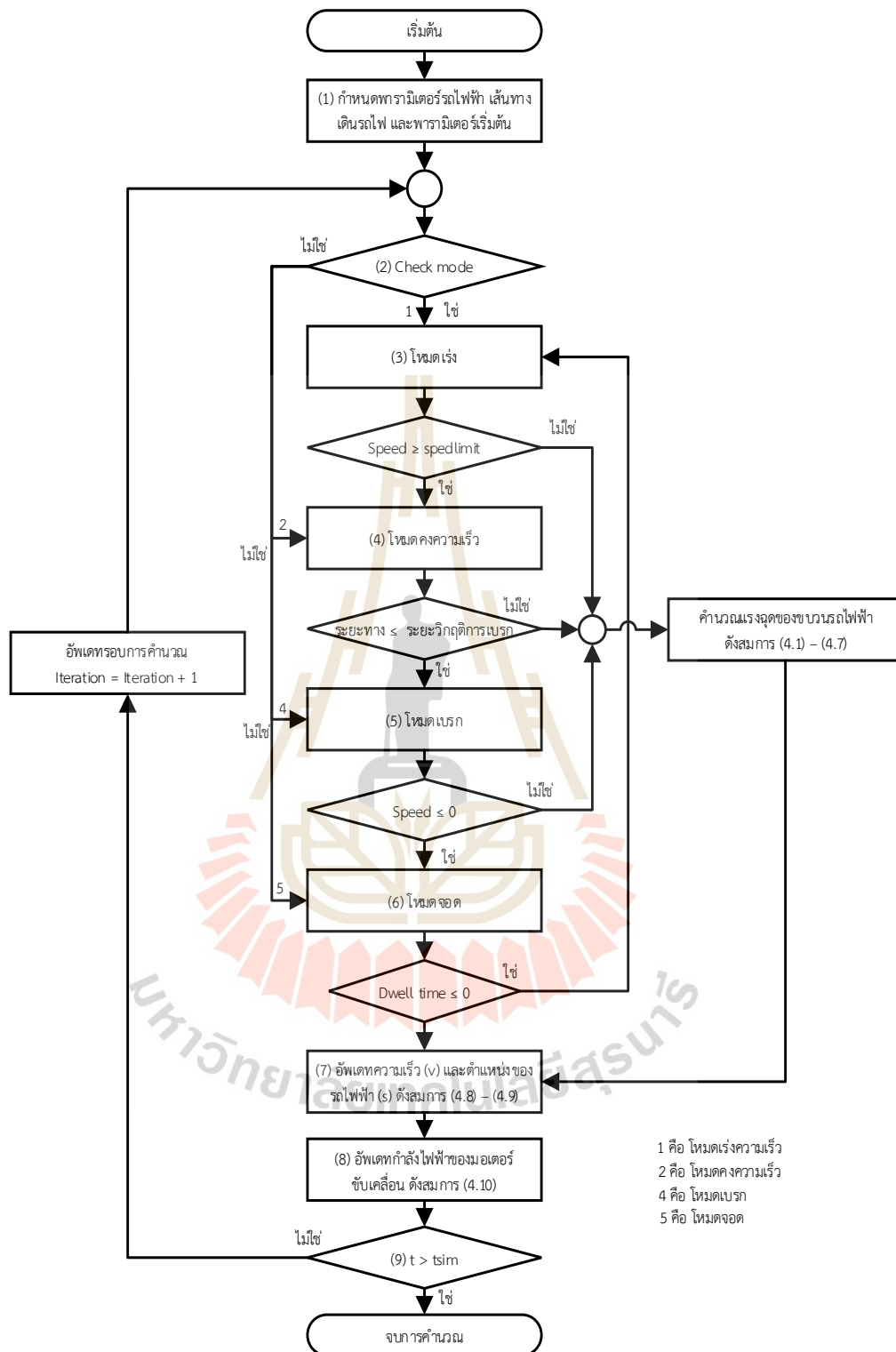
(5) โหมดเบรก ความเร่งเป็นลบทำการคำนวณแรงฉุดของรถไฟฟ้าและแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าดังสมการที่ (4.1) - (4.7) ตรวจสอบและคำนวณแรงฉุดของรถไฟฟ้าที่แปรผันตามความเร็วของรถไฟฟ้า ตรวจสอบความเร็วของรถไฟฟ้าถ้าความเร็วของรถไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ให้เข้าสู่โหมดจอด

(6) โหมดจอด ความเร่งเป็นศูนย์ ความเร็วเป็นศูนย์ ตรวจสอบเวลาจอดที่สถานีถ้ามีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ให้เข้าสู่โหมดเร่ง

(7) อัปเดตความเร็ว (v) และตำแหน่งของรถไฟฟ้า (s) ดังสมการ (4.8) - (4.9)

(8) อัปเดตกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนจากกรณีรถไฟฟ้าทำงานในโหมดการทำงานต่าง ๆ ดังสมการที่ (4.10)

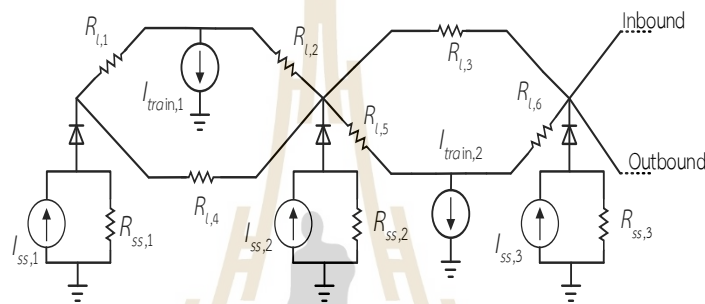
(9) ตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการจำลอง (t) กรณีเวลาในการจำลองมากกว่าเวลาที่กำหนด (t_{sim}) ให้จบการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า กรณีเวลาที่ใช้ในการจำลอง (t) น้อยกว่าเวลาที่กำหนด (t_{sim}) ให้อัปเดตเวลาในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ($t + \Delta t$) และกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ (2)



รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

4.3 การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบตัวนำเดี่ยว

ในการคำนวณหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ใช้วิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า (Current injection method) เพื่อหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ (กุลวรวานิชพงษ์, 2561) เพื่อง่ายต่อการจำลองใช้วิธีการวิเคราะห์แบบโนด (Node analysis) ใช้การวนรอบซ้ำของแรงดันจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันจะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เพื่อหาผลเฉลยของแรงดันที่บัสต่าง ๆ วิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้แบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงแบบตัวนำเดี่ยว Single-conductor system แสดงดังรูปที่ 4.6 ประกอบไปด้วย สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction Substation: TSS) และรถไฟไฟฟ้า (Train) ในการจำลอง



รูปที่ 4.6 ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงแบบตัวนำเดี่ยว
ดัดแปลงจาก: (กุลวรวานิชพงษ์, 2561)

โดยที่	R_l	คือ ความต้านทานรางตัวนำหรือรางที่สาม (Ω/km)
	R_{ss}	คือ ความต้านทานลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Ω)
	I_{ss}	คือ กระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (A)
	I_{train}	คือ กระแสไฟฟ้าที่รถไฟ (A)

เนื่องจากแบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงเป็นแบบตัวนำเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะไม่พิจารณาความต้านทานรางวิ่งของรถไฟจะมีเฉพาะความต้านทานของรางตัวนำหรือรางที่สาม (Third-rail resistance) นำเพียงอย่างเดียว จะได้แบบจำลองรถไฟไฟฟ้าที่มีรางตัวนำ 2 ราง คือ รางตัวนำสำหรับรถไฟขาวิ่งเข้า (Inbound) และรางตัวนำและรางวิ่งรถไฟขาวิ่งออก (Outbound) สามารถหาค่าความต้านทานของรางตัวนำระหว่างโนด p ถึงโนด q ได้ดังสมการ (4.18)

$$R_{l,p-q} = d_{p-q} \times R_l \quad (4.18)$$

โดยที่	$R_{l,p-q}$	คือ ความต้านทานรางตัวนำไฟฟ้าระหว่างโนด p ถึงโนด q (Ω)
	d_{p-q}	คือ ระยะทางระหว่างโนด p ถึงโนด q (Ω/km)

4.3.1 การคำนวณหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่โหลดหรือรถไฟฟ้าใช้นั้นขึ้นอยู่กับโหมดการเคลื่อนที่และขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าและระบบส่งจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนมีการติดตั้งไดโอดเพื่อให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียว คือ ไหลออกจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเท่านั้น ไม่สามารถไหลย้อนกลับไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ ส่งผลให้โหลดกำลังไฟฟ้านั้นไม่เป็นเป็นเชิงเส้นส่งผลวิธีวิเคราะห์วงจรแบบโนดหรือเมชไม่สามารถนำมาใช้ได้ ในการคำนวณหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแสไฟฟ้าเป็นวิธีที่ได้นำมาใช้กับระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงโดยเฉพาะ และเป็นวิธีการเหมาะสมที่สุดวิธีหนึ่ง เนื่องจากเกิดการลู่เข้าค่าตอบแบบเชิงเส้นและมีความชันลู่เข้าค่าตอบที่มากส่งผลให้รอบการคำนวณน้อยกว่าวิธีการหาผลเฉลยด้วยการวนรอบซ้ำที่มีการลู่เข้าแบบเชิงเส้นวิธีอื่น ๆ (กุลวรรวานิชพงษ์, 2561) วิธีฉีดกระแสไฟฟ้าใช้การคำนวณด้วยวิธีโนด เนื่องจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงแทนด้วยแหล่งจ่ายนอร์ตัน สามารถหาการไหลของกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่บัส k ใด ๆ ได้ตั้งสมการ (4.19) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ตั้งสมการ (4.20) สามารถหาค่าความต้านทานลัดวงจร และกระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้จากสมการ (4.21) – (4.23) สามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่บัสใด ๆ ได้จากสมการ (4.24)

$$V_k \sum_{i=1}^n G_{k,i} V_i = V_k I_{SS,k} - P_{T,k} \quad (4.19)$$

$$I_{SS,k} - \frac{P_{T,k}}{V_k} = \sum_{i=1}^n G_{k,i} V_i \quad (4.20)$$

$$R_{SS,k} = \frac{V_{nl,k}^2}{P_{SS,k}} \quad (4.21)$$

$$I_{SS,k} = \frac{P_{SS,k}}{V_{nl,k}} \quad (4.22)$$

$$I_{S,k} = I_{SS,k} - \frac{V_k}{R_{SS,k}} \quad (4.23)$$

$$I_{T,k} = \frac{P_{T,k}}{V_k} \quad (4.24)$$

โดยที่	V_k	คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส k (V)
	V_i	คือ แรงดันไฟฟ้าตำแหน่งที่ i (V)
	$I_{SS,k}$	คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่บัส k (A) (กรณีที่พิจารณาบัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน) มีค่าเป็น 0 ที่บัสอื่น ๆ
	$V_{nl,k}$	คือ แรงดันไฟฟ้าไร้อหลดของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่บัส k (V)
	$P_{SS,k}$	คือ กำลังไฟฟ้าลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่บัส k (W)
	$R_{SS,k}$	คือ ความต้านทานลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่บัส k (Ω)
	$I_{S,k}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจ่ายโหลดที่บัส k (A)
	$P_{T,k}$	คือ กำลังไฟฟ้าของรถไฟที่บัส k (W)

จากสมการที่ (4.20) สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (4.25) เมื่อ $[G]$ คือ เมทริกซ์คอนดักแตนซ์ที่รวมเมทริกซ์คอนดักแตนซ์ของแต่ละบัสไว้โดยที่ $[G_s]$ คือ เมทริกซ์คอนดักแตนซ์ของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน แสดงดังสมการ (4.26) $[G_{pq}]$ คือ เมทริกซ์คอนดักแตนซ์ของตัวนำไฟฟ้าระหว่างบัส p และ q แสดงดังสมการ (4.27) $[G_{pp}]$ และ $[G_{qq}]$ คือ เมทริกซ์คอนดักแตนซ์ของตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่ง pp และ qq แสดงดังสมการ (4.28) สามารถเขียนเมทริกซ์คอนดักแตนซ์ของแบบจำลองได้ดังสมการ (4.29) สามารถเขียนสมการ (4.25) ได้ในรูปของสมการ (4.30)

$$[I] = [G][V] \quad (4.25)$$

$$G_s = \frac{1}{R_s} \quad (4.26)$$

$$G_{pq} = -\frac{1}{d \times R_{cond}} \quad (4.27)$$

$$G_{pp} = G_{qq} = \frac{1}{d \times R_{cond}} \quad (4.28)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1i} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2i} & \cdots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ G_{i1} & G_{i2} & \cdots & G_{ii} & \cdots & G_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \cdots & G_{ni} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

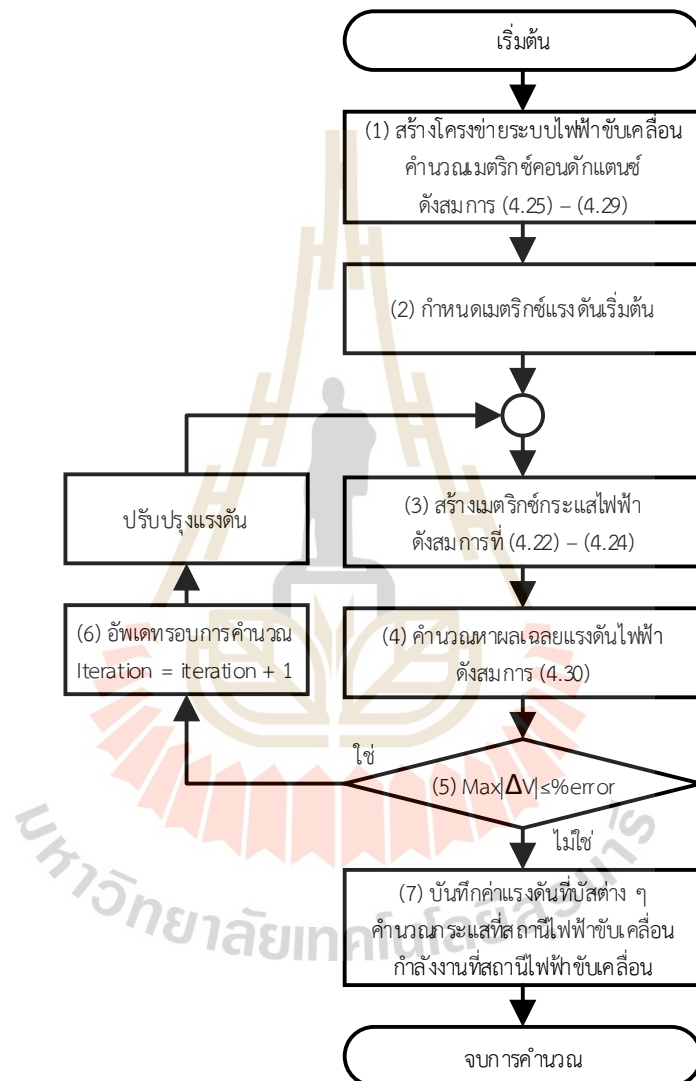
$$\begin{bmatrix} I_{ss,1} - \frac{P_{T,1}}{V_1} \\ I_{ss,2} - \frac{P_{T,2}}{V_2} \\ \vdots \\ I_{ss,i} - \frac{P_{T,i}}{V_i} \\ \vdots \\ I_{ss,n} - \frac{P_{T,n}}{V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1i} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2i} & \cdots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ G_{i1} & G_{i2} & \cdots & G_{ii} & \cdots & G_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \cdots & G_{ni} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

ขั้นตอนการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบตัวนำเดี่ยว ด้วยวิธีนิตกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.7 มีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

- (1) สร้างเมทริกซ์คอนดักแตนซ์ของระบบจำลอง ในช่วงเวลาต่าง ๆ จากสมการที่ (4.25) - (4.29)
- (2) เริ่มการคำนวณผลเฉลยแรงดันบัสต่าง ๆ ของรถไฟฟ้ารอบที่ 1 ด้วยการกำหนดแรงดันที่บัสตำแหน่งต่าง ๆ เท่ากับแรงดันไว้โหลด
- (3) สร้างเมทริกซ์กระแสไฟฟ้าจากสมการที่ (4.22) และ (4.24)
- (4) คำนวณหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังสมการที่ (4.30)
- (5) คำนวณความคลาดเคลื่อนระหว่างผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในรอบปัจจุบันเปรียบเทียบกับรอบก่อนหน้า เมื่อความคลาดเคลื่อนของแรงดันมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด ทำงานในขั้นตอนที่ (7)

(6) กรณีแรงดันไฟฟ้าที่บัสมีค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยแรงดันมากกว่าค่าที่กำหนดให้ทำการอัปเดตรอบการคำนวณ โดยนำผลเฉลยแรงดันรอบปัจจุบันไปแทนในขั้นตอนที่ (3) แล้วทำซ้ำ

(7) บันทึกค่าแรงดัน และกระแสของบัสต่าง ๆ ในรอบก่อนหยุดการคำนวณ และหยุดการคำนวณแบบวนรอบซ้ำ

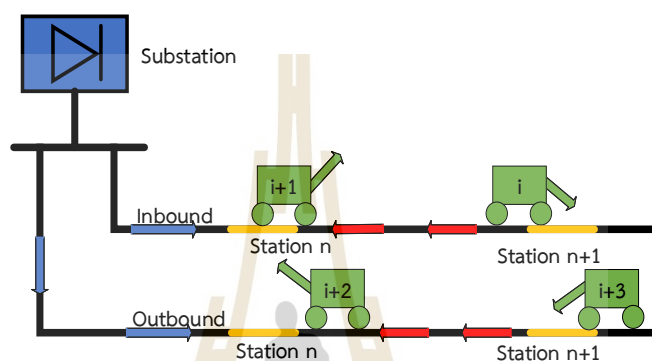


รูปที่ 4.7 ขั้นตอนการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขั้วเคลื่อนแบบตัวนำเดี่ยวด้วยวิธี นีตกระแสไฟฟ้า

4.4 แบบจำลองการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟ และตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืน

4.4.1 แบบจำลองการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟ

แบบจำลองของการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟกับรถไฟที่ใช้พลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากโหมดเบรกเพื่อขับเคลื่อนรถไฟที่อยู่ติดกันซึ่งทำงานในโหมดเร่งความเร็ว (Yang et al. 2013) ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แบบจำลองการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟ

สมมติฐานแบบจำลองเรากำหนดแบบจำลองตามสมมติฐานดังต่อไปนี้

(1) พลังงานเบรกจ่ายคืนที่เกิดจากรถไฟเบรกสามารถป้อนกลับเข้าสู่รางที่สามและนำไปใช้โดยรถไฟที่กำลังเร่งความเร็วได้ทันที

(2) อุปกรณ์รางตัวนำที่สามของขาไปและขากลับเชื่อมติดกันที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ซึ่งหมายความว่าพลังงานเบรกจ่ายคืนจากขาไปสามารถส่งไปยังขากลับได้ ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 4.8 พลังงานเบรกจ่ายคืนที่เกิดจากรถไฟ i และ $i+3$ สามารถใช้กับรถไฟ $i+1$ และ $i+2$ ได้ตามลำดับ

(3) สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเป็นส่วนหนึ่งของระบบผลิตไฟฟ้า ส่ง และจำหน่ายไฟฟ้า โดยทั่วไปมีโหมดจ่ายไฟสองประเภทในระบบรถลอยฟ้าในเมือง: 1) โหมดจ่ายด้านเดียว และ 2) โหมดการให้จ่ายพลังงานทั้งสองด้าน ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้การจ่ายพลังงานสองด้าน

(4) พลังงานเบรกจ่ายคืนจากรถไฟเบรกแต่ละขบวนสามารถดูดซับโดยรถไฟต่อเนื่องที่อยู่ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเดียวกันหรือใกล้เคียง ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 4.8 พลังงานกู้คืนที่เกิดจากรถไฟ i สามารถใช้กับรถไฟ $i+1$ และ $i+2$ ได้

(5) รถไฟทุกขบวนที่วิ่งไปในทิศทางเดียวกันจะใช้ตารางเวลาร่วมกันรวมถึงเวลาจอดที่สถานี ซึ่งหมายความว่ารถไฟทุกขบวนจะใช้เวลาจอดและเวลาเดินทางเหมือนกันในแต่ละสถานี

4.4.2 ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืน

ในระบบปกติกรณีนำพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกมาใช้แล้วเหลือจากการจ่ายให้รถไฟคันที่เร่งในระบบพลังงานเบรกจ่ายคืนจะถูกทำลายด้วยตัวต้านทานการเบรกของรถไฟหรือสายส่งไม่สามารถไหลย้อนกลับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้เนื่องจากแบบจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

ขับเคลื่อนที่ใช้เป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงมีการติดตั้งไดโอดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ทำให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียว คือ ไหลออกจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเท่านั้น ดังนั้นกรณีนี้จะเสมือนตัดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนออกจากระบบไฟฟ้า

จากการจำลองเมื่อเหลือพลังงานเบรกจ่ายคืนหลังจากจ่ายให้รถไฟคันที่แรงในระบบส่งผลให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจึงทำการหาว่ากระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนไหนจะทำการตัดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนั้นออกจากระบบ กรณีที่พลังงานเบรกจ่ายคืนมีมากกว่าความต้องการของระบบเมื่อตัดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่เกิดกระแสไหลย้อนกลับแล้วส่งผลให้พลังงานเบรกจ่ายคืนไหลไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนอื่นที่อยู่ในระบบจนเกิดกรณีที่ปลดทุกสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในระบบหมดแล้ว แต่ยังมีพลังงานเบรกจ่ายคืนเหลืออยู่ส่งผลให้พลังงานเบรกจ่ายคืนไม่มีที่ไปทำให้เกิดการคำนวณค่าพลังงานที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจ่ายให้รถไฟผิดพลาด

ผู้ทำวิจัยจึงทำการแก้ปัญหาโดยแบ่งการทำงานออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 มีเฉพาะรถไฟในโหมดขับเคลื่อน และไม่มีการทำงานที่กำลังเบรกทำงานอยู่ในระบบให้ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนมีค่าเท่ากับ 2 กรณีที่ 2 มีรถไฟที่ทำงานในโหมดเบรกจ่ายคืนพลังงานจะให้ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนมีค่าเท่ากับ 1 กรณีนี้สามารถแบ่งปันพลังงานให้รถไฟคันที่แรงในระบบได้สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการเบรกจ่ายคืนพลังงานได้ตั้งสมการที่ (4.31) แล้วทำการตรวจสอบกระแสไหลย้อนกลับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนหรือไม่ถ้าเกิดกรณีกระแสไหลย้อนกลับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะให้ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนมีค่าเท่ากับ 0 และเปลี่ยนการทำงานจากโหมดการเบรกจ่ายคืนพลังงานเป็นกรณีที่ 3 กรณีรถไฟทำงานในโหมดเบรกสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการเบรกได้ตั้งสมการที่ (4.32) กรณีนี้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากโหมดเบรกจะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าเสริมซึ่งรับกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน มีเงื่อนไขบังคับตั้งสมการ (4.33) โดยที่ P_{Shared} คือ พลังงานเบรกจ่ายคืนที่สามารถแบ่งปันระหว่างรถไฟได้ I_{SS} คือ กระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และ LL คือ ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืน

$$P_{Shared} = \sum_{i=1}^{N_{train}} P_{shared,i} \quad ; LL = 1 \quad (4.31)$$

$$P_{br} = \sum_{i=1}^{N_{train}} P_{aux} \quad ; LL = 0 \quad (4.32)$$

เงื่อนไขบังคับ

$$I_{SS} \geq 0 \quad (4.33)$$

การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบตัวนำเดี่ยวด้วยวิธีตัดกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.9 มีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

(1) สร้างเมทริกซ์คอนดักแตนซ์ของระบบจำลอง ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ จากสมการที่ (4.25) - (4.29)

(2) เริ่มการคำนวณผลเฉลยแรงดันบัสต่าง ๆ ของรถไฟฟ้ารอบที่ 1 ด้วยการกำหนดแรงดันที่บัสตำแหน่งต่าง ๆ เท่ากับแรงดันไรโพล

(3) ตรวจสอบโหมดการทำงาน กรณีเป็นโหมดเบรกจ่ายคืนพลังงานให้ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืน และกำลังไฟฟ้างดสมการที่ (4.31)

(4) สร้างเมทริกซ์กระแสไฟฟ้าจากสมการ (4.22) และ (4.24)

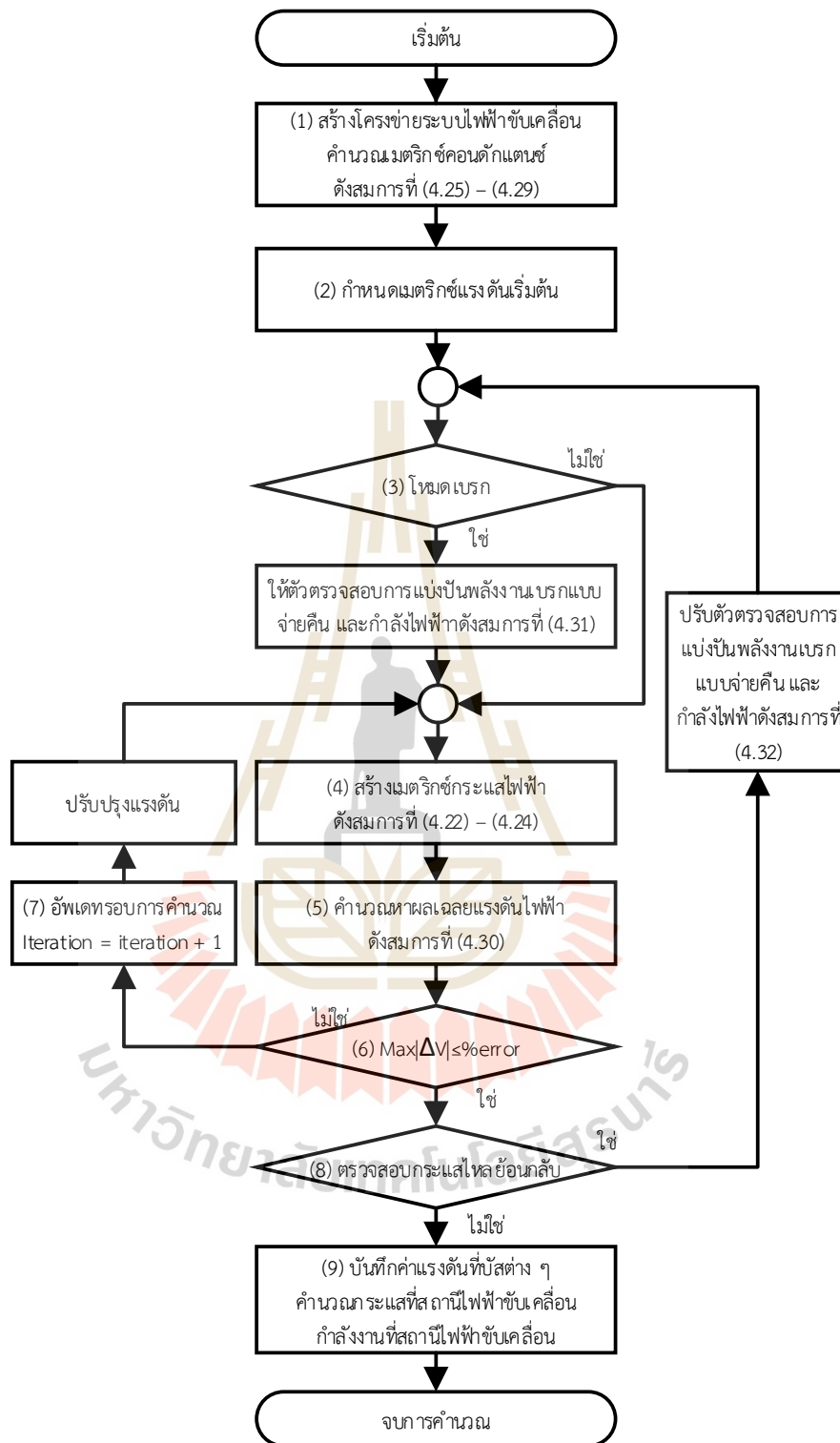
(5) คำนวณหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้างดสมการที่ (4.30)

(6) คำนวณความคลาดเคลื่อนระหว่างผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในรอบปัจจุบันเปรียบเทียบกับรอบก่อนหน้า เมื่อความคลาดเคลื่อนของแรงดันมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด ทำงานในขั้นตอนที่ (7)

(7) กรณีแรงดันไฟฟ้าที่บัสมีค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยแรงดันมากกว่าค่าที่กำหนดให้ทำการอัปเดตรอบการคำนวณ โดยนำผลเฉลยแรงดันรอบปัจจุบันไปแทนในขั้นตอนที่ (4) แล้วทำซ้ำ

(8) ตรวจสอบกระแสไหลย้อนกลับที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจากสมการที่ (4.33) กรณีมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนใด ๆ ให้ปรับตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืน และกำลังไฟฟ้างดสมการที่ (4.32) และเปลี่ยนเป็นโหมดการเบรก และกลับไปขั้นตอนที่ (2)

(9) บันทึกค่าแรงดันและแอสของบัสต่าง ๆ ในรอบก่อนหยุดการคำนวณ และหยุดการคำนวณแบบวนรอบซ้ำ



รูปที่ 4.9 ขั้นตอนการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบตัวนำเดี่ยวด้วยวิธี
ฉีดกระแสไฟฟ้าที่มีตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืน

4.5 การจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุด

การแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟ จะพิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนที่เกิดจากการเบรกของรถไฟที่สามารถป้อนกลับเข้าสู่รางที่สามและสามารถนำไปใช้โดยรถไฟที่กำลังวิ่งอยู่ในระบบที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเดียวกัน อย่างไรก็ตาม พลังงานเบรกจ่ายคืนไม่สามารถแบ่งปันระหว่างรถไฟ และกลายเป็นพลังงานเบรกจ่ายคืนโดยสูญเสียเปล่า หากไม่มีรถไฟที่อยู่ติดกันวิ่งอยู่ในบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นการประหยัดพลังงานจึงเพิ่มขึ้นได้ด้วยการจัดตารางเวลาเดินรถไฟใหม่โดยพิจารณาช่วงการเร่งและเบรกของรถไฟ โดยใช้เทคนิคการจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุดเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าเทคนิคการคำนวณที่ชาญฉลาดมาใช้ งานวิจัยนี้ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) และ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) เข้ามาเป็นเครื่องมือในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจัดตารางเวลารถไฟที่เหมาะสมที่สุดว่าวิธีใดให้ผลดีกว่ากัน

4.5.1 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization: PSO)

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาคหรือพาติเคิลสวอร์ม เป็นการจำลองที่มีอัลกอริทึมที่ลอกเลียนแบบระบบหรือโครงสร้างทางสังคมของกลุ่มสัตว์ที่มีพฤติกรรมอยู่รวมกันเป็นฝูง เช่น การหาอาหารเพื่อการอยู่รอดของฝูง ส่งผลให้ประชากรส่วนใหญ่ในกลุ่มมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกัน ตัวอย่างสิ่งมีชีวิตที่มีพฤติกรรมในลักษณะนี้ เช่น ฝูงนก (bird flock) เป็นต้น ตัวอย่างการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาค เช่น พิจารณาการล่าเหยื่อของฝูงนก นกหนึ่งตัวเสนออนุภาคหนึ่งตัวในการค้นหาเหยื่อ นกทั้งฝูงจะบินไปในทิศทางที่สอดคล้องกัน โดยนกตัวที่อยู่ใกล้อาหารมากที่สุด (มีค่าความฟิตดีที่สุด) จะมีระยะห่างระหว่างอาหารและฝูงน้อยที่สุดส่งผลให้ วิธีที่ดีที่สุด คือ นกที่เหลือในฝูงต้องสอดคล้องตามนกตัวดังกล่าว โดยอาศัยหลักการนี้ในการจำลองฝูงอนุภาค กำหนดอนุภาคแทนผลเฉลยพร้อมการประเมินค่าความฟิต มีคุณสมบัติที่สำคัญในการจำลองการหาอาหารของฝูงนก ได้แก่ เวกเตอร์ความเร็ว (particle's velocity) ของอนุภาคแต่ละตัวเป็นตัวกำหนดทิศทางในการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้น ๆ อนุภาคทุกตัวในฝูงจะถูกปรับปรุงทิศทางเคลื่อนที่ให้สอดคล้องกับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวที่มีค่าความเหมาะสมที่สุด วิธีการดำเนินการนี้ทำให้ฝูงอนุภาคมีทิศทางเคลื่อนที่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุด (กุลวรรวานิชพงษ์, 2550) อัลกอริทึมพื้นฐานของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาคมีแผนผังการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.10 และสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) สร้างอนุภาคเริ่มต้น จากการสุ่มตำแหน่งของอนุภาคตัวที่ i รอบที่ k (X_i^k) ที่มีขนาดเท่ากับตัวแปรที่ต้องการค้นหา และสุ่มค่าเวกเตอร์ความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ i รอบที่ k (V_i^k) มีขนาดเท่ากับขนาดของตำแหน่ง ตำแหน่งของอนุภาคจะเปลี่ยนไปตามผลรวมตำแหน่งและความเร็วดังสมการที่ (4.34)

$$X_i^k = X_i^{k-1} + V_i^k \quad (4.34)$$

(2) ประเมินค่าความฟิตของอนุภาคทุกตัวในฝูง โดยส่งค่า X ให้แกฟังก์ชันเป้าหมาย

(3) ตรวจสอบและปรับปรุง (Personal best: pbest) และ (Global best: gbest) โดยการเก็บค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณปัจจุบันหรือ ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคปัจจุบันดีกว่าจะปรับปรุงค่า pbest การเก็บค่าตำแหน่งที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (gbest) เป็นการพิจารณาตำแหน่งที่เป็นผลลัพธ์จากการวนรอบซ้ำตั้งแต่รอบแรกถึงรอบปัจจุบัน ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใด ๆ มีค่าดีกว่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาคที่บันทึกไว้ก่อนหน้านี้ จะบันทึกตำแหน่งและค่าความเหมาะสมของอนุภาคดังกล่าวจะปรับปรุงค่า gbest

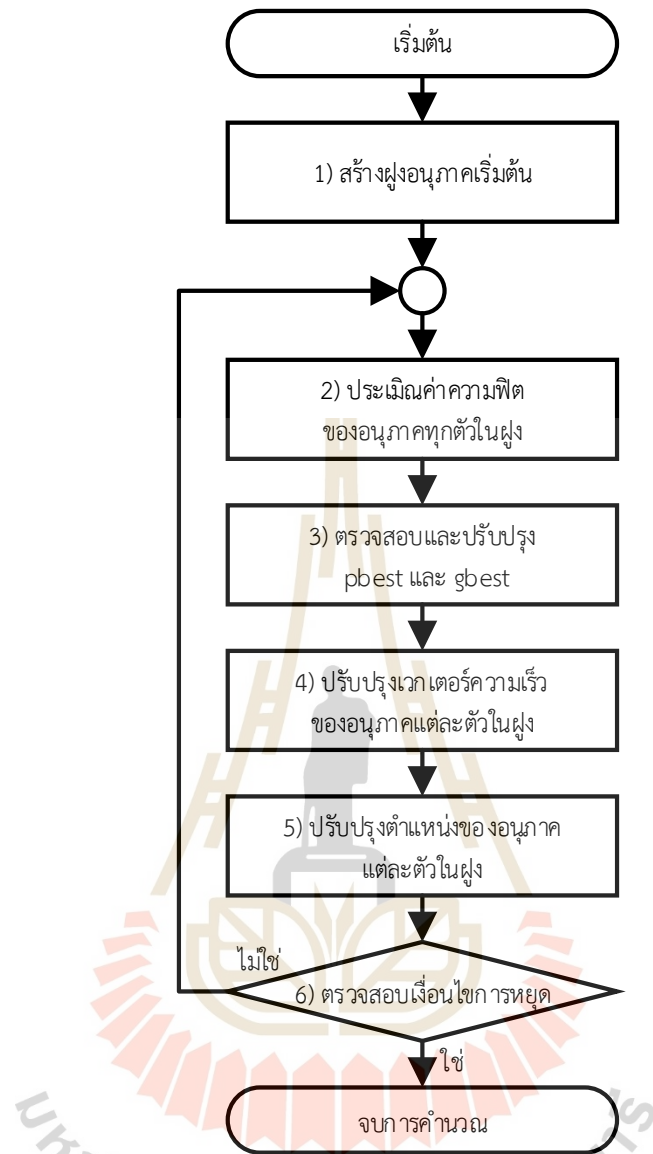
(4) ปรับปรุงเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคแต่ละตัวในฝูง ดังสมการที่ (4.35) โดยที่ α_i และ α_g คือ ค่าการถ่วงน้ำหนักที่ดีที่สุดเมื่อทำการปรับความเร็ว $X_{i,pbest}$ คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่อนุภาคตัวที่ i ค้นพบ และ X_{gbest} คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่ฝูงอนุภาคค้นพบ

$$V_i^k = V_i^{k-1} + \alpha_i (X_{i,pbest} - X_i^{k-1}) + \alpha_g (X_{gbest} - X_i^{k-1}) \quad (4.35)$$

(5) ปรับปรุงตำแหน่งของอนุภาคแต่ละตัวในฝูง ดังสมการที่ (4.36)

$$X_i^k = X_i^{k-1} + V_i^k \quad (4.36)$$

(6) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด โดยการวนรอบการคำนวณซ้ำจนเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือการวนรอบใช้ระยะเวลานาน มีจำนวนรอบถึงค่าที่กำหนด



รูปที่ 4.10 แผนผังการทำงานการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี PSO

4.5.2 การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA)

การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นการจำลองที่มีอัลกอริทึมของกระบวนการวิวัฒนาการในระดับยีน โดยใช้หลักการคัดเลือกตามธรรมชาติ (Darwin's natural selection) โดยการสร้างกลุ่มประชากรโครโมโซมแทนผลเฉลย และการแปลงโครโมโซมให้อยู่ในระบบเลขฐานสอง จากนั้นประชากรในกลุ่มจะแข่งขันเพื่อความอยู่รอด โดยโครโมโซมในแต่ละรุ่นจะถูกเลือก การสร้างลูกหลานจะใช้การดำเนินการทางสายพันธ์ (genetic operator) ประกอบไปด้วยครอสโอเวอร์ (crossover) และ การผ่าเหล่า (mutation) โดยปกติจะใช้การครอสโอเวอร์ในสัดส่วนประมาณ 60 – 70 % ของประชากรทั้งหมด โดยการผ่าเหล่าเกิดเพียง 1-2 % (กุลวรวานิชพงษ์, 2550) อัลกอริทึมพื้นฐานของการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) การสร้างประชากรเริ่มต้น โดยการสุ่มโครโมโซมค่าคำตอบซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในขอบเขตของคำตอบขึ้นมาตามจำนวนของประชากรที่กำหนด

(2) ขั้นตอนกระบวนการทางพันธุกรรม เพื่อนำไปทำกระบวนการทางพันธุกรรมใช้หลักของความน่าจะเป็นร่วมด้วย โดยโครโมโซมแต่ละชุดจะมีโอกาสที่อยู่รอดไม่เท่ากัน ใช้การวัดความเหมาะสมของการอยู่รอดเรียกว่า ค่าความฟิต (fitness value) โดยวิธีการคัดเลือกประชากรทำได้หลายวิธี เช่น แผนการวงล้อรูเล็ต ใช้หลักการสุ่มเพื่อสร้างศูนย์รวมการจับคู่ โดยการจัดแบ่งโครโมโซมแต่ละตัวไปยังช่องสล็อตของวงล้อรูเล็ต โดยโครโมโซมที่มีค่าความฟิตเหมาะที่สุดจะได้จับจองพื้นที่มากกว่า เป็นต้น

(3) การกระทำทางพันธุกรรม เป็นการนำโครโมโซมตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไปมากระทำดังนี้ ครอสโอเวอร์ (crossover) เป็นการนำเอาชิ้นส่วนของสตริงโครโมโซมสองตัวมาแลกเปลี่ยนกัน การแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนโครโมโซมทำได้หลายรูปแบบ เช่น การครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว และแบบหลายจุด การผ่าเหล่า (mutation) เป็นการปรับเปลี่ยนข้อมูลของบิตสตริงตำแหน่งใด ๆ หรือหลายตำแหน่งให้มีค่าเปลี่ยนไปจากเดิม ทำให้ได้สายพันธ์ใหม่ที่มีเลขฐานสองต่างไปจากเดิม

(4) การแทนค่าประชากร เป็นการแทนค่าประชากรที่มีค่าเหมาะสมเป็นประชากรรุ่นต่อไป โดยจะรวมประชากรเก่าทั้งหมดและประชากรใหม่ทั้งหมด นำมาพิจารณาเลือกเฉพาะประชากรที่มีค่าความเหมาะสมสูงส่งให้แก่ประชากรรุ่นต่อไป

(5) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด โดยการวนรอบการคำนวณซ้ำจนเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือการวนรอบใช้ระยะเวลาจนมีจำนวนรอบถึงค่าที่กำหนด

แผนผังการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.11 จากการสุ่มของประชากรด้วยวิธี GA เมื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของประชากร วิธีการเป็นการสุ่มผ่านความน่าจะเป็นคำตอบที่ได้ไม่รับรองว่าดีที่สุด แต่ใกล้เคียงค่าที่ดีที่สุด จึงควรมีการคำนวณซ้ำหลาย ๆ รอบเพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสม



รูปที่ 4.11 แผนผังการทำงานการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี GA

4.5.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การจำลองผลการประหยัดพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้คิดจากผลเฉลยของพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน โดยที่ $E_{sub,cons}$ คือ พลังงานไฟฟ้ารวมที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน $E_{regen,cons}$ คือ พลังงานเบรกจ่ายคืนที่สามารถแบ่งปันระหว่างรถไฟรวมกับพลังงานไฟฟ้าเสริม $E_{train,cons}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่ และ $E_{loss,line}$ คือ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานตัวนำไฟฟ้ารางที่สาม แสดงดังสมการที่ (4.36) - (4.40) ตามลำดับ

$$E_{sub,cons} + E_{regen,cons} = E_{train,cons} + E_{loss,cons} \quad (4.36)$$

$$E_{sub,cons} = \sum_{n=1}^N \int_{t=0}^T i_{sub,n}(t) \times v_{sub,n}(t) dt \quad (4.37)$$

$$E_{regen,cons} = \sum_{i=1}^I \int_{t=0}^T P_{shared,i} dt + \sum_{i=1}^{N_{train}} \int_{t=0}^T P_{aux,i} dt \quad (4.38)$$

$$E_{train,cons} = \sum_{i=1}^I \int_{t=0}^T P_{T,i} dt \quad (4.39)$$

$$E_{loss-line,cons} = \sum_{n=1}^N \int_{t=0}^T i_{sub,n} \times (V_{sub,n} - V_{train}) dt \quad (4.40)$$

- โดยที่ N คือ จำนวนสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน
 I คือ จำนวนขบวนรถไฟฟ้า
 T คือ เวลาที่ใช้ในการจำลอง
 $i_{sub,n}$ คือ กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ n
 $V_{sub,n}$ คือ แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ n
 $P_{shared,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเบรกจ่ายคืนพลังงานที่สามารถแบ่งปันระหว่างรถไฟไฟฟ้าได้ของรถไฟขบวนที่ i
 $P_{aux,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าเสริมที่จ่ายให้รถไฟขบวนที่ i
 $P_{T,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าของรถไฟขบวนที่ i

V_{train} คือ แรงดันไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้า

กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นอัตราส่วนพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับพลังงานที่รถไฟไฟฟ้าใช้รวมกับพลังงานสูญเสียในระบบ ($E_{sub, ratio}$) ดังสมการที่ (4.41) ไม่นำพลังงานเบรกจ่ายคืนมาพิจารณาด้วยเนื่องจากเมื่อหาอัตราส่วนแล้วจะมีค่าเท่ากับ 1 และมีเงื่อนไขบังคับดังสมการที่ (4.42) – (4.44)

$$\text{minimize: } E_{sub, ratio} = \frac{E_{sub, cons}}{E_{train, cons} + E_{loss, line}} \times 100 \quad (4.41)$$

เงื่อนไขบังคับ

$$V_{sub} \leq V_{noload} \quad (4.42)$$

$$V_{min} \leq V_{train} \leq V_{max} \quad (4.43)$$

$$TT_U = TT_U \pm 10\% \quad (4.44)$$

$$TT_D = TT_D \pm 10\% \quad (4.45)$$

โดยที่ V_{sub} คือ แรงดันสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน V_{noload} คือ แรงดันไฟฟ้าไร้โหลด V_{min} และ V_{max} คือ แรงดันไฟฟ้าไม่ถาวรต่ำสุดและสูงสุดตามมาตรฐาน EN 50163 TT_U และ TT_D คือ เวลาเดินทางของรถไฟไฟฟ้าขาไป และขากลับ ตามลำดับ

พิจารณาเวลาเดินทางของรถไฟไฟฟ้าขาไป และขากลับจากสถานีขนส่งผู้โดยสารต้นทางไปยังสถานีขนส่งผู้โดยสารปลายทางให้มีค่าไม่เกิน 10% ของเวลาเดินทางปกติเป็นเงื่อนไขบังคับ โดยใช้ระเบียบวิธีการปรับโทษค่าตอบที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ (Penalty method) โดยการบวกด้วยค่ามาก ๆ เพื่อปรับให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าสูง เมื่อเวลาที่ใช้ในการเดินทางของรถไฟไฟฟ้าขาไป และขากลับมีค่าเกิน 10% ของเวลาเดินทางปกติ และคำตอบดังกล่าวจะไม่ถูกนำมาเป็นคำตอบ เนื่องจากกระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดจะพิจารณาจุดที่มีคำตอบค่าต่ำ ๆ (กุลวรรวานิชพงษ์, 2550) โดยใช้ค่าปรับโทษที่ 100,000 เนื่องจากค่านี้เมื่อนำไปหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี PSO และ GA ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถเข้าสู่คำตอบได้ไวที่สุด และได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด

ในงานวิจัยนี้ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี PSO และวิธี GA เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ดีที่สุดที่โปรแกรมคำนวณ และการทำงานที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและสมการการคำนวณต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแบบจำลองการเคลื่อนที่ และแบบจำลองการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าแบบตัวนำเดี่ยวด้วยวิธีฉีดกระแส และแบบจำลองการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟโดยใช้ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืน รวมถึงการจัดตารางเวลารถไฟโดยใช้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี PSO และ GA โดยรายละเอียดของทฤษฎีและสมการการคำนวณต่าง ๆ จะถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงแบบตัวนำเดี่ยวที่มีการพิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนและไม่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน รวมถึงการจัดตารางเวลารถไฟเหมาะที่สุดเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟ โดยรายละเอียดผลการจำลองจะกล่าวถึงในบทถัดไป



บทที่ 5

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง และผลการจำลอง

5.1 บทนำ

การจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงกับการทำงานจริงของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์จริงหรือใกล้เคียงในการจำลองผลของรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนกรุงเทพ (สายสีเขียวเข้ม) ในบทนี้นำเสนอพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบรถไฟฟ้า BTS สายสีลม และผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาเร่งด่วน ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน และ นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน โดยแต่ละช่วงเวลาประกอบไปด้วยผลการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้า BTS สายสีลมแบบหลายขบวน กรณีไม่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้า BTS สายสีลมแบบหลายขบวน กรณีพิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนที่มีตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืน ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้า BTS สายสีลมแบบหลายขบวน กรณีการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO และผลการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้า BTS กรณีการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA และนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับวิธีไหนสามารถนำพลังงานเบรกจ่ายคืนมาแบ่งปันระหว่างรถไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้สูงที่สุด

5.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์ที่จำเป็นที่ใช้ในการจำลองของรถไฟฟ้าสายสีลมหลายขบวนประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 5.1 รายละเอียดชื่อและตำแหน่งสถานีขนส่งผู้โดยสารและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนซึ่งเคลื่อนที่จากสถานี W1 ถึง S12 แสดงดังตารางที่ 5.2 เส้นทางการเดินรถแสดงดังรูปที่ 5.1 ลักษณะความชันของเส้นทางที่ใช้ในการขับเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 5.2 รายละเอียดตารางเวลารถไฟแสดงดังตารางที่ 5.3 รายละเอียดพารามิเตอร์สายส่งตัวนำ และพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแสดงดังตารางที่ 5.4 คุณลักษณะความเร็วเทียบกับระยะทางแสดงดังรูปที่ 5.3 (สุตพรหม, 2019)

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าในระบบทดสอบ

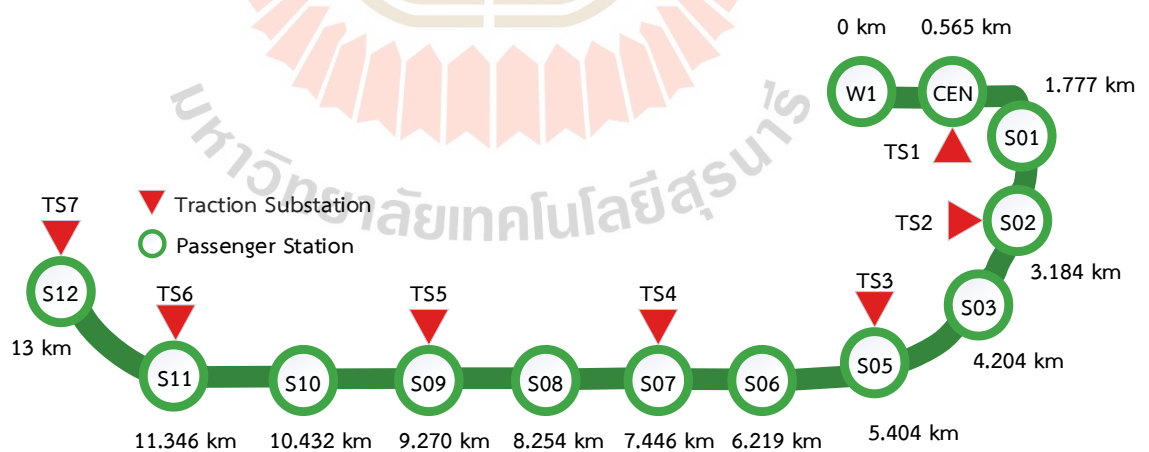
Parameters	Specific data
Vehicle name	BTS CNR Changchun EMU
Tare weight	153 ton
Max. Payload (AW4)	85 ton
Max. Payload (AW2)	52 ton
Max. Payload (AW1)	11 ton
Normal voltage	750 V
Max. Speed	80 km/h
Gear, motor, inverter	98%, 88%, 98%
Max. Auxiliaries	Constant load 270 kW
Max. Acceleration	0.87 m/s ²
Max. Deceleration	1 m/s ²
Regenerative brake efficiency	70%
Train resistance	A = 4025, B = 118.67, C = 0.871

ตารางที่ 5.2 ตำแหน่งสถานีขนส่งและตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

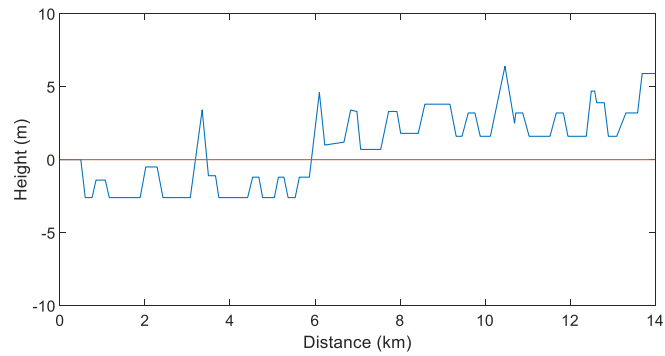
Station name	Station code	Station Position (km)	Traction substation Position (km)
สยามกีฬาแห่งชาติ (Nation stadium)	W1	0	-
สยาม (Siam)	CEN	0.565	0.565
ราชดำริ (Ratchadamri)	S01	1.777	-
ศาลาแดง (Sala Daeng)	S02	3.184	3.184
ช่องนนทรี (Chong Nonsi)	S03	4.204	-
สุรศักดิ์ (Surasak)	S05	5.404	5.404
สะพานตากสิน (Saphan Taksin)	S06	6.219	-
กรุงธนบุรี (Krung Thon Buri)	S07	7.446	7.446
วงเวียนใหญ่ (Wongwian Yai)	S08	8.254	-
โพธิ์นิมิต (Pho Nimit)	S09	9.270	9.270
ตลาดพลู (Talat Phlu)	S10	10.432	-
วุฒากาศ (Wulthakat)	S11	11.346	11.346
บางหว้า (Bang Wa)	S12	13.009	13.009

ตารางที่ 5.3 ตารางเวลารถไฟ

Track up				Track down			
Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)	Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)
W1	0	0	0	S12	0	0	0
CEN	46	59	20	S11	80	103	20
S1	35	136	20	S10	70	71	20
S2	30	178	20	S9	70	83	20
S3	30	134	20	S8	70	74	20
S5	30	153	20	S7	60	71	20
S6	46	79	20	S6	80	83	20
S7	80	83	20	S5	46	79	20
S8	60	69	20	S3	30	153	20
S9	70	76	20	S2	30	132	20
S10	70	83	20	S1	30	178	20
S11	70	71	20	CEN	35	136	20
S12	80	103	20	W1	46	59	20



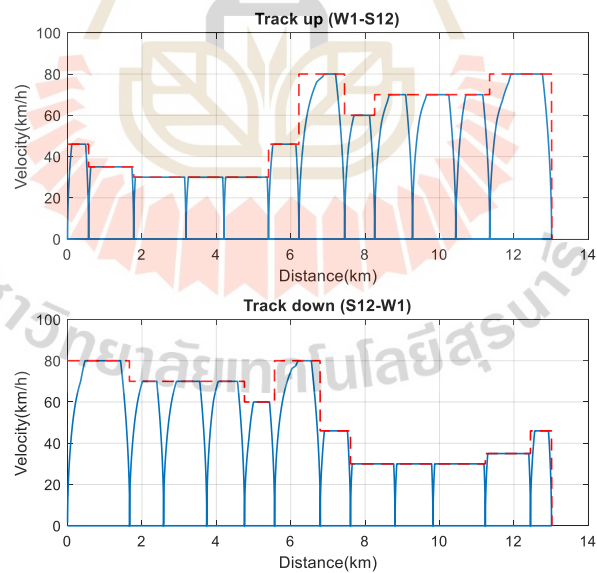
รูปที่ 5.1 เส้นทางเดินรถไฟฟ้ายาสีลม



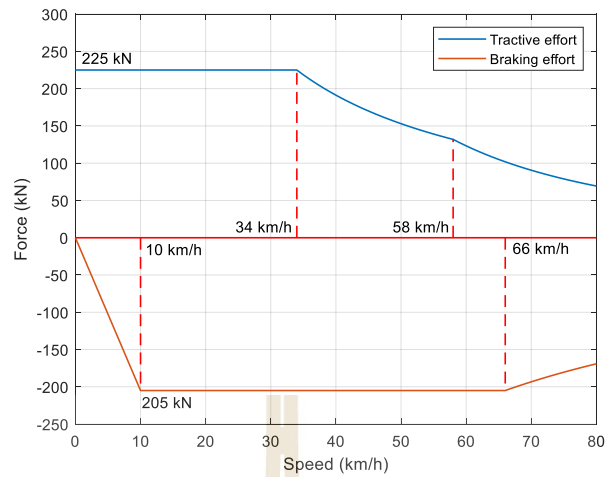
รูปที่ 5.2 ระดับความชันของเส้นทางรถไฟฟ้าสายสีลม

ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

Parameters	Specific data
Voltage no-load	790 V
Third rail resistance	6.70 m Ω /km (W1-S6), 8.23 m Ω /km (S6-S12)
Substation short-circuit resistance	13.3 m Ω (CEN-S5), 14.70 m Ω (S7-S12)

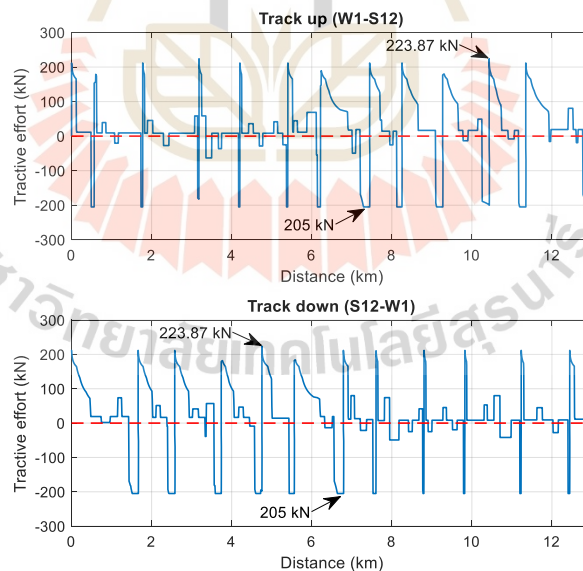


รูปที่ 5.3 ความเร็วของรถไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง



รูปที่ 5.4 คุณลักษณะแรงฉุดของรถไฟฟ้า

คุณลักษณะของแรงฉุดและแรงเบรกของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.4 โดยแรงฉุดสูงสุดของรถไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 225 kN และมีแรงเบรกสูงสุดของรถไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 205 kN แรงฉุดของรถไฟฟ้าเทียบกับระยะทางแสดงดังรูปที่ 5.5 มีแรงฉุดสูงสุดเท่ากับ 223.87 kN และมีแรงเบรกสูงสุดเท่ากับ 205 kN



รูปที่ 5.5 แรงฉุดของรถไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง

พารามิเตอร์การจัดตารางเวลารถไฟเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO แสดงดังตารางที่ 5.5 มีจำนวนฝูงอนุภาคเท่ากับ 100 (Swarmsize = 100) และมีพารามิเตอร์การจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA แสดงดังตารางที่ 5.6 มีจำนวนประชากรเท่ากับ 100 (PopulationSize = 100) โดยการ

จัดตารางเวลารถไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดทั้งสองวิธีมีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดทั้งหมด 48 ค่า (nvars) โดยแบ่งเป็นหาเวลาจอดที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร 24 ช่วงเวลา แบ่งเป็นขาออกและขาเข้าอย่างละ 12 ช่วงเวลา มีเวลาจอดที่สถานีรับส่งผู้โดยสารอยู่ในช่วง 20 s ถึง 45 s หาค่าความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้าที่ใช้เดินทางระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสาร 24 ค่าความเร็ว แบ่งเป็นขาเข้า และขาออก อย่างละ 12 ค่า มีความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้าที่ใช้เดินทางระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสารอยู่ในช่วง 90% ของความเร็วจำกัด ถึง ความเร็วจำกัดในแต่ละสถานีรับส่งผู้โดยสาร

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

nvars	48
lb	20 (nvars 1-24) ,0.9× speed limitup (nvars 25-36), 0.9× speed limitdown (nvars 37-48)
up	45 (nvars 1-24), speed limit up (nvars 25-36), speed limit down (nvars 37-48)
Function tolerance	10^{-3}
พารามิเตอร์สำหรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO	
Swarmsize	100
MaxStalleriterations	20
พารามิเตอร์สำหรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA	
PopulationSize	100
MaxStallerGenerations	50

5.3 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้า BTS สายสีลมแบบหลายขบวน

การจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้า BTS สายสีลมแบบหลายขบวนรายละเอียด การสร้างแบบจำลองแสดงในหัวข้อที่ 4.2 - 4.5 และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแสดงในหัวข้อที่ 5.2 ใช้พารามิเตอร์ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO และ GA ในตารางที่ 5.5 แบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาเร่งด่วน ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน และ นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน โดยช่วงเวลาเร่งด่วนจะมีระยะห่างระหว่างรถไฟฟ้าอยู่ที่ 3.45 นาที ใช้น้ำหนักผู้โดยสารเฉลี่ยชนิด AW4 หมายถึงสถานการณ์ผู้โดยสาร 8 คนต่อตารางเมตร ช่วงเวลาไม่เร่งด่วนจะมีระยะห่างระหว่างรถไฟฟ้าอยู่ที่ 6 นาที ใช้น้ำหนักผู้โดยสารเฉลี่ยชนิด AW2 หมายถึงสถานการณ์ผู้โดยสาร 5 คนต่อตารางเมตร และนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน จะมีระยะห่างระหว่างรถไฟฟ้าอยู่ที่ 8 นาที ใช้น้ำหนักผู้โดยสารเฉลี่ยชนิด AW1 หมายถึงสถานการณ์ผู้โดยสารเต็มทุกที่นั่ง โดยแต่ละช่วงเวลาจะประกอบไปด้วย 4 คือ กรณีที่ 1 ไม่จัดตารางเวลา และไม่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน กรณีที่ 2 ไม่จัดตารางเวลา และพิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน กรณีที่ 3 การจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO และกรณีที่ 4 จัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ทำการจำลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

กรณีที่ 1 นั้นเป็นกรณีที่ไม่นำพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรก (กำลังไฟฟ้าเป็นลบ) ที่ไหลย้อนกลับเข้าไปในสายส่งตัวนำรางที่สาม โดยพิจารณาเฉพาะช่วงที่กำลังไฟฟ้าของรถไฟเป็นบวก กรณีที่ 2 มี LL เป็นตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนนั้นจะคล้ายกับกรณีที่ 1 แตกต่างกันว่านำพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรก (กำลังไฟฟ้าเป็นลบ) ช่วยจ่ายให้กำลังไฟฟ้าเสริมของตัวรถไฟเอง และนำกำลังไฟฟ้าที่ไหลย้อนกลับไปในสายส่งตัวนำรางที่สามมาช่วยแบ่งปันพลังงานให้กับรถไฟที่กำลังเร่งในระบบเพื่อช่วยลดการจ่ายพลังงานของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีที่ 3 และ 4 จะคล้ายกับกรณีที่ 2 แต่จะทำการหาค่าเหมาะที่สุดของตารางเวลาเพื่อให้ช่วงเวลาเร่งกับเบรกของรถไฟชิงโครโนส์กันเพื่อให้สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนให้กับรถไฟที่กำลังเร่งในระบบได้สูงมากขึ้น มีผลการจำลองเปรียบเทียบแต่ละกรณีในแต่ละช่วงเวลาดังนี้

การจัดตารางเวลาเหมาะที่สุดของระบบรถไฟไฟฟ้าเป็นการปรับช่วงเวลาเร่งและเบรกของรถไฟให้ชิงโครโนส์กัน เพื่อให้สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟได้สูงขึ้นเพื่อลดการจ่ายพลังงานจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนที่สามารถนำไปใช้ได้เทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกจ่ายคืนพลังงาน ($\%E_{reg}$) ดังสมการที่ (5.1) โดยที่ E_{brake} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกจ่ายคืนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.2) เมื่อ $P_{brake,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกจ่ายคืนพลังงานของรถไฟขบวนที่ i

$$\%E_{reg} = \frac{E_{reg,cons}}{E_{brake,cons}} \times 100 \quad (5.1)$$

$$E_{brake,cons} = \sum_{i=1}^I \int_{t=0}^T P_{brake,i} dt \quad (5.2)$$

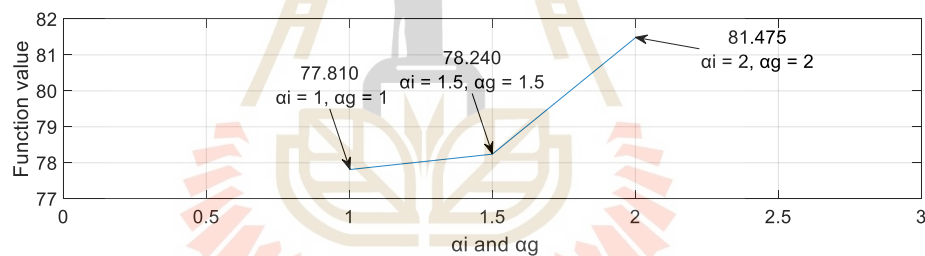
การประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ($\%E_{save}$) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.3)

$$\%E_{save} = \left[1 - \frac{E_{sub,cons}}{E_{train,cons} + E_{loss,line}} \right] \times 100 \quad (5.3)$$

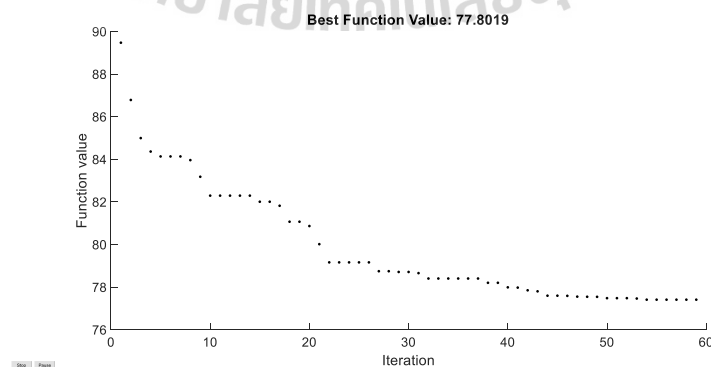
5.3.1 ช่วงเวลาเร่งด่วน

มีระยะเวลาระหว่างรถไฟฟ้ายูอยู่ที่ 3.45 นาที และมีมวลผู้โดยสารเฉลี่ยชนิด AW4 หมายถึงสถานการณ์ผู้โดยสาร 8 คนต่อตารางเมตร

ทำการปรับค่า α_i และ α_g โดยการสุ่มเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO สำหรับจัดตารางเวลารถไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาเร่งด่วน สุ่มทั้งหมด 3 รอบ รอบที่ 1 ให้ค่า α_i เท่ากับ 1 และ α_g เท่ากับ 1 รอบที่ 2 ให้ค่า α_i เท่ากับ 1.5 และ α_g เท่ากับ 1.5 และรอบที่ 3 ให้ค่า α_i เท่ากับ 2 และ α_g เท่ากับ 2 ผลการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยใช้ค่า α_i และ α_g ทั้ง 3 รอบ แสดงดังรูปที่ 5.6 ค่า α_i และ α_g เท่ากับ 1 ได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 77.810 ดังนั้นการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO ในช่วงเวลาเร่งด่วนจะใช้ค่า α_i เท่ากับ 1 และ α_g เท่ากับ 1 ในการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด 30 รอบ มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการหาอัตราส่วนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนน้อยที่สุดด้วยวิธี PSO ในช่วงเวลาเร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.7 และผลการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตารางเวลารถไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาเร่งด่วนด้วยวิธี PSO แสดงดังตารางที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ผลการปรับ α_i และ α_g ในช่วงเวลาเร่งด่วน



รูปที่ 5.7 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีจัดตารางเวลารถไฟเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO ในช่วงเวลาเร่งด่วน

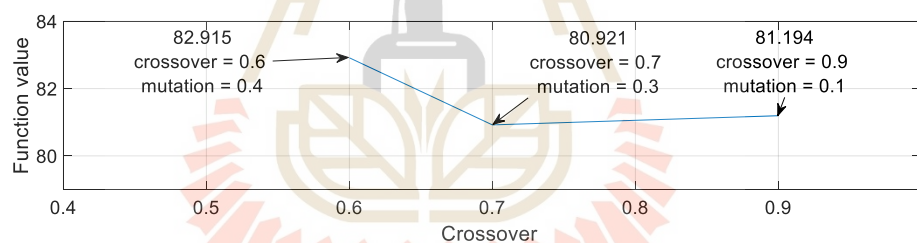
ตารางที่ 5.6 ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดในช่วงเวลาเร่งด่วนด้วยวิธี PSO

Track up				Track down			
Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)	Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)
W1	0	0	0	S12	0	0	0
CEN	42	62	22	S11	80	103	20
S1	35	136	21	S10	66	72	44
S2	30	178	20	S9	68	84	43
S3	30	134	21	S8	69	75	26
S5	30	153	21	S7	56	73	33
S6	45	80	21	S6	76	84	23
S7	80	83	22	S5	44	81	21
S8	58	70	24	S3	28	163	33
S9	70	76	45	S2	30	132	21
S10	63	87	44	S1	30	178	41
S11	70	71	24	CEN	32	147	21
S12	77	105	37	W1	41	63	24
Objective value (%)				77.802			
Energy substations consumption (MWh)				7.234			
Energy trains consumption (MWh)				9.210			
Energy loss line consumption (MWh)				0.088			
Mean				80.551			
S.D.				1.221			
C.V.				1.516			

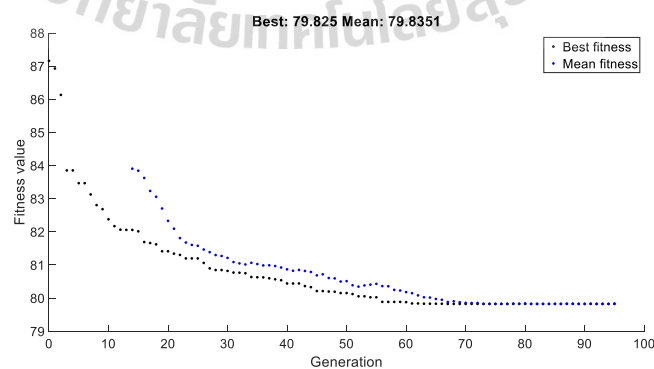
จากตารางที่ 5.6 มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งเป็นอัตราส่วนพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับพลังงานที่รถไฟใช้รวมกับพลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุดเท่ากับ 77.802 % ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีการกระจายตัวของข้อมูล หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 1.221 มีค่าการกระจายตัวของข้อมูลที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากมีจำนวนรถไฟวิ่งพร้อมกัน 12 ขบวน มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน (C.V.) เท่ากับ 1.516% ตามมาตรฐานการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันน้อยกว่า 5% ถือว่ายอมรับได้ ที่ขาไปสถานีรับส่งผู้โดยสาร CEN, S6, S8, S10 และ S17 มีความเร็วจำกัดต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกรณีก่อนจัดตารางเวลาเท่ากับ 4 km/h, 1 km/h, 2 km/h, 7km/h, และ 3 km/h ตามลำดับ มีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารต่ำสุดเท่ากับ 20 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S2 และมีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารสูงสุดที่ 45 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S9 ที่ขากลับสถานีรับส่งผู้โดยสาร S10, S9, S8, S7, S6, S5, S3, CEN และ W1 มีความเร็วจำกัดต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกรณีก่อนจัดตารางเวลาเท่ากับ 4 km/h, 2 km/h, 1 km/h, 4 km/h, 4 km/h, 2km/h, 2 km/h, 3 km/h และ 5 km/h ตามลำดับ มีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารต่ำสุดเท่ากับ 20 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S11 และมีเวลา

หยุดของรถไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารสูงสุดเท่ากับ 45 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S10 เมื่อความเร็วจำกัดระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสารมีค่าต่ำกว่ากรณีก่อนจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดส่งผลให้ระยะเวลาวิ่งระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสาร และเวลาหยุดของรถไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารมีค่าเปลี่ยนไปจะส่งผลต่อตารางเวลาการวิ่งของรถไฟฟ้า

ทำการปรับค่า crossover และ mutation โดยการสุ่มเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA สำหรับจัดตารางเวลารถไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาเร่งด่วน สุ่มทั้งหมด 3 รอบ รอบที่ 1 มีค่า crossover เท่ากับ 0.9 และ mutation เท่ากับ 0.1 รอบที่ 2 มีค่า crossover เท่ากับ 0.7 และ mutation เท่ากับ 0.3 และรอบที่ 3 มีค่า crossover เท่ากับ 0.6 และ mutation เท่ากับ 0.4 ผลการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยใช้ค่า crossover และ mutation ทั้ง 3 รอบ ในช่วงเวลาเร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.8 ค่า crossover และ mutation เท่ากับ 0.7 และ 0.3 ตามลำดับ ได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 80.921 ดังนั้นการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ในช่วงเวลาเร่งด่วนจะใช้ค่า crossover เท่ากับ 0.7 และ mutation เท่ากับ 0.3 ในการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด 30 รอบ มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการหาอัตราส่วนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนน้อยที่สุดด้วยวิธี GA ในช่วงเวลาเร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.9 และผลการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตารางเวลารถไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาเร่งด่วนด้วยวิธี GA แสดงดังตารางที่ 5.7



รูปที่ 5.8 ผลการปรับ crossover และ mutation ในช่วงเวลาเร่งด่วน



รูปที่ 5.9 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีจัดตารางเวลารถไฟเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ในช่วงเวลาเร่งด่วน

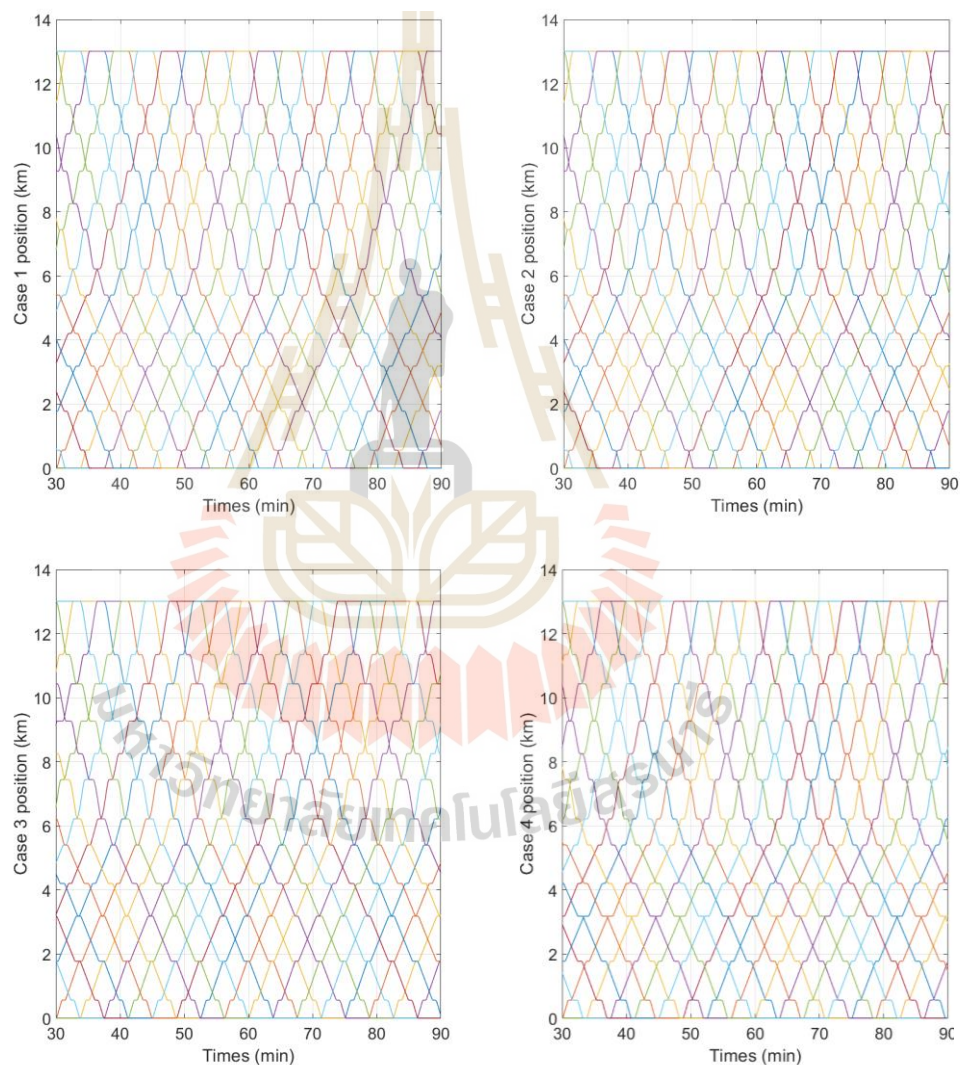
ตารางที่ 5.7 ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดในช่วงเวลาเร่งด่วนด้วยวิธี GA

Track up				Track down			
Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)	Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)
W1	0	0	0	S12	0	0	0
CEN	42	62	21	S11	79	103	21
S1	32	146	20	S10	70	71	20
S2	29	184	35	S9	70	83	20
S3	30	134	21	S8	68	75	20
S5	27	168	20	S7	60	71	20
S6	46	79	20	S6	80	83	21
S7	80	83	20	S5	41	85	23
S8	55	71	20	S3	27	168	28
S9	69	77	20	S2	28	140	39
S10	69	84	20	S1	29	184	33
S11	65	73	20	CEN	33	143	40
S12	80	103	28	W1	44	61	20
Objective value (%)				79.825			
Energy substations consumption (MWh)				7.410			
Energy trains consumption (MWh)				9.192			
Energy loss line consumption (MWh)				0.091			
Mean				81.242			
SD				0.785			
CV				0.966			

จากตารางที่ 5.7 มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งเป็นอัตราส่วนพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับพลังงานที่รถไฟใช้รวมกับพลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุดเท่ากับ 79.825 % ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีการกระจายตัวของข้อมูล หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.785 มีค่าการกระจายตัวของข้อมูลที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากมีจำนวนรถไฟวิ่งพร้อมกัน 12 ขบวน มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน (C.V.) เท่ากับ 0.966% ตามมาตรฐานการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันน้อยกว่า 5% ถือว่ายอมรับได้ ที่ขาไปสถานีรับส่งผู้โดยสาร CEN, S1, S2, S5, S8, S9, S10 และ S11 มีความเร็วจำกัดต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกรณีก่อนจัดตารางเวลาเท่ากับ 4 km/h, 3 km/h, 1 km/h, 3 km/h, 5 km/h, 1km/h, 1km/h และ 5 km/h ตามลำดับ มีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารต่ำสุดเท่ากับ 20 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S1, S5, S6, S7, S8, S9, S10 และ S11 และมีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารสูงสุดที่ 35 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S2 ที่ขากลับสถานีรับส่งผู้โดยสาร S11, S8, S5, S3, S2, S1, CEN และ W1 มีความเร็วจำกัดต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกรณีก่อนจัดตารางเวลาเท่ากับ 1 km/h, 2 km/h, 5 km/h, 3 km/h, 2 km/h, 1 km/h, 2 km/h และ 3 km/h ตามลำดับ มีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร

ต่ำสุดเท่ากับ 20 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S10, S9, S8, S7 และ W1 มีเวลาหยุดของรถไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารสูงสุดเท่ากับ 40 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร CEN เมื่อความเร็วจำกัดระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสารมีค่าต่ำกว่ากรณีก่อนจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดส่งผลให้ระยะเวลาวิ่งระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสาร และเวลาหยุดของรถไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารมีค่าเปลี่ยนไปจะส่งผลต่อตารางเวลาการวิ่งของรถไฟฟ้า

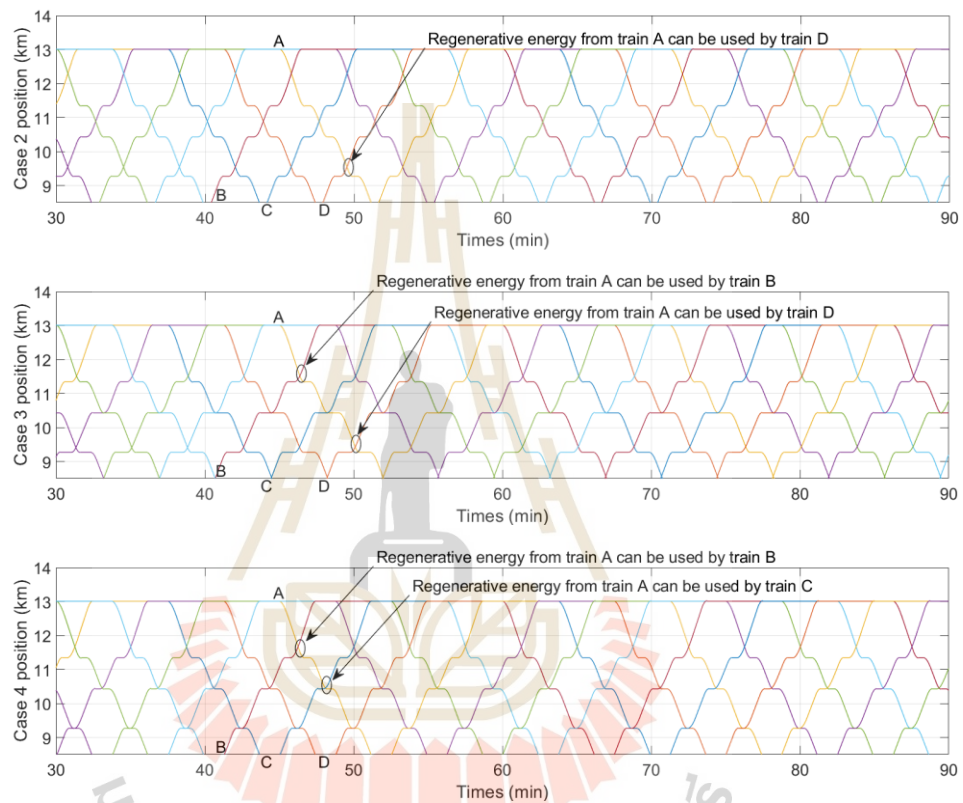
มีตำแหน่งรถไฟฟ้าต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.10 ในช่วงเวลาเดียวกันมีขบวนรถไฟฟ้าวิ่งพร้อมกัน 12 ขบวน ประกอบด้วยขาไป 6 ขบวน และขากลับ 6 ขบวน



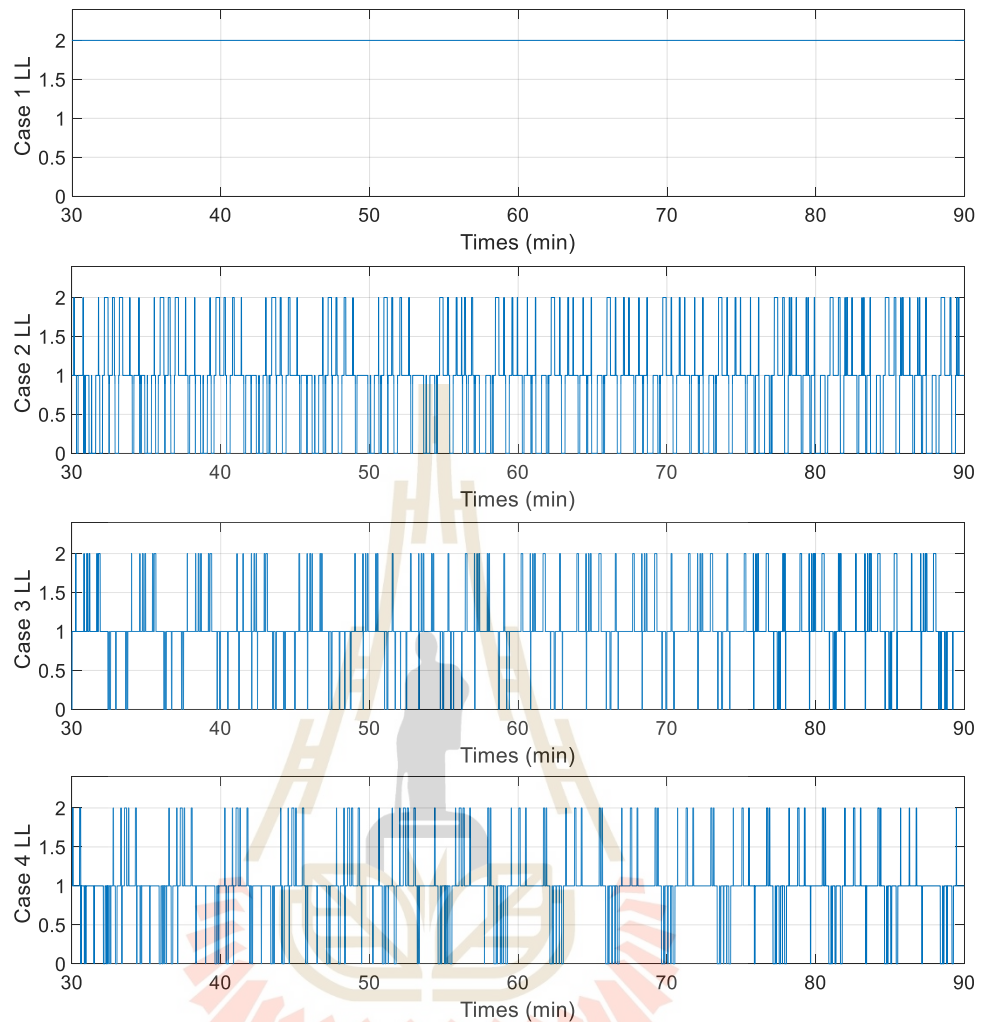
รูปที่ 5.10 ตำแหน่งรถไฟฟ้าต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน

ตัวอย่างตำแหน่งของรถไฟฟ้าต่อเวลาที่สามารถแบ่งปันพลังงานดเบรกจ่ายคืนได้ใน ช่วงเวลาเร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.11 กรณีที่ 2 เป็นกรณีก่อนจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด รถไฟฟ้าขบวน

A สามารถแบ่งปันพลังงานได้ช่วงเวลาเดียวโดยสามารถแบ่งปันกับรถไฟฟ้าขบวน D เท่านั้น กรณีที่ 3 สามารถเพิ่มช่วงเวลาการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟฟ้าโดยเพิ่มมาเป็น 3 ช่วงเวลา โดยรถไฟฟ้าขบวน A สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนให้กับรถไฟฟ้าขบวน B C และ D กรณีที่ 4 สามารถเพิ่มช่วงเวลาการแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟฟ้าได้เช่นกันโดยสามารถแบ่งปันได้ 2 ช่วงเวลา รถไฟฟ้าขบวน A สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนให้กับรถไฟฟ้าขบวน B และ C

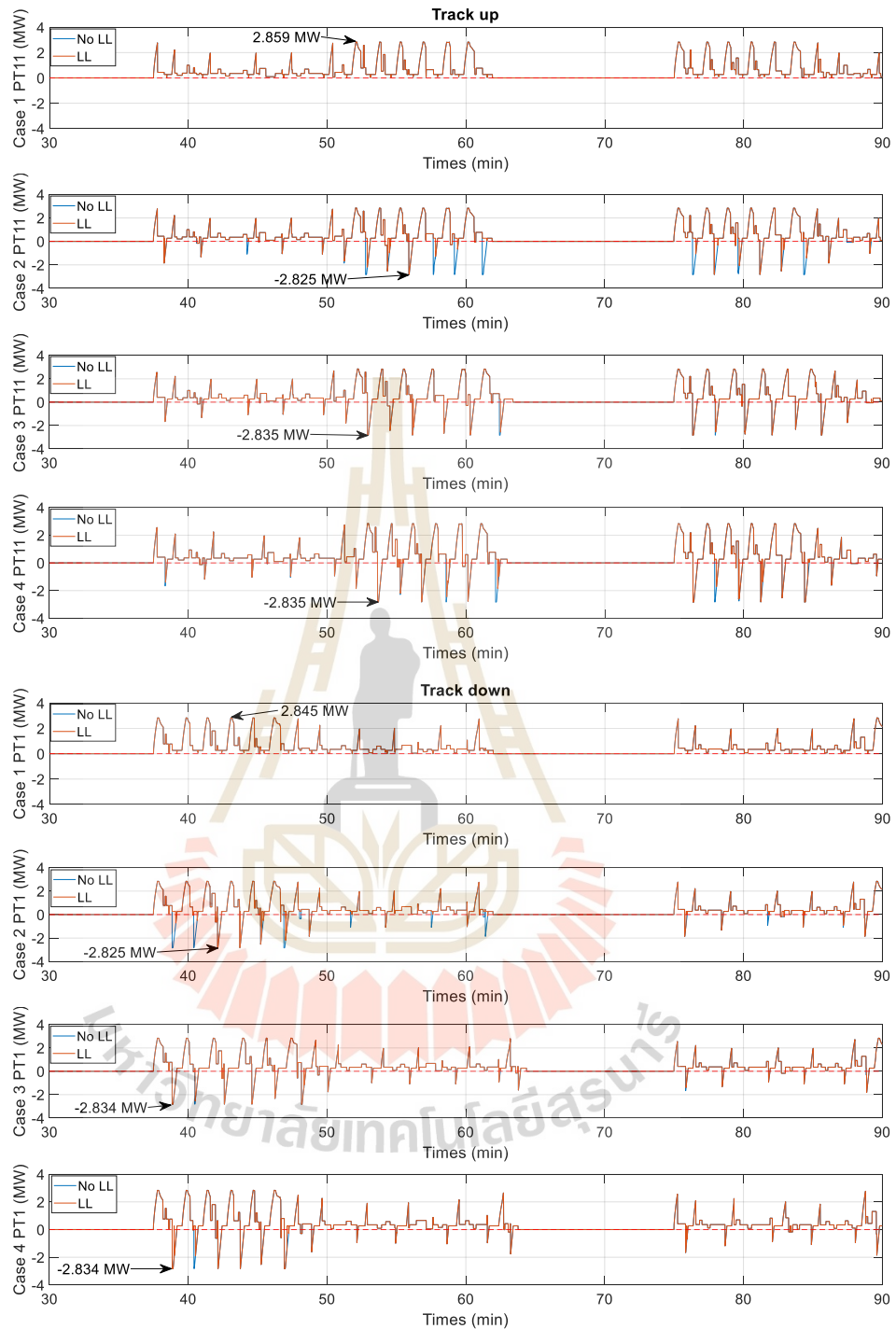


รูปที่ 5.11 ตัวอย่างตำแหน่งรถไฟต่อเวลาที่สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนได้ในช่วงเวลาเร่งด่วน

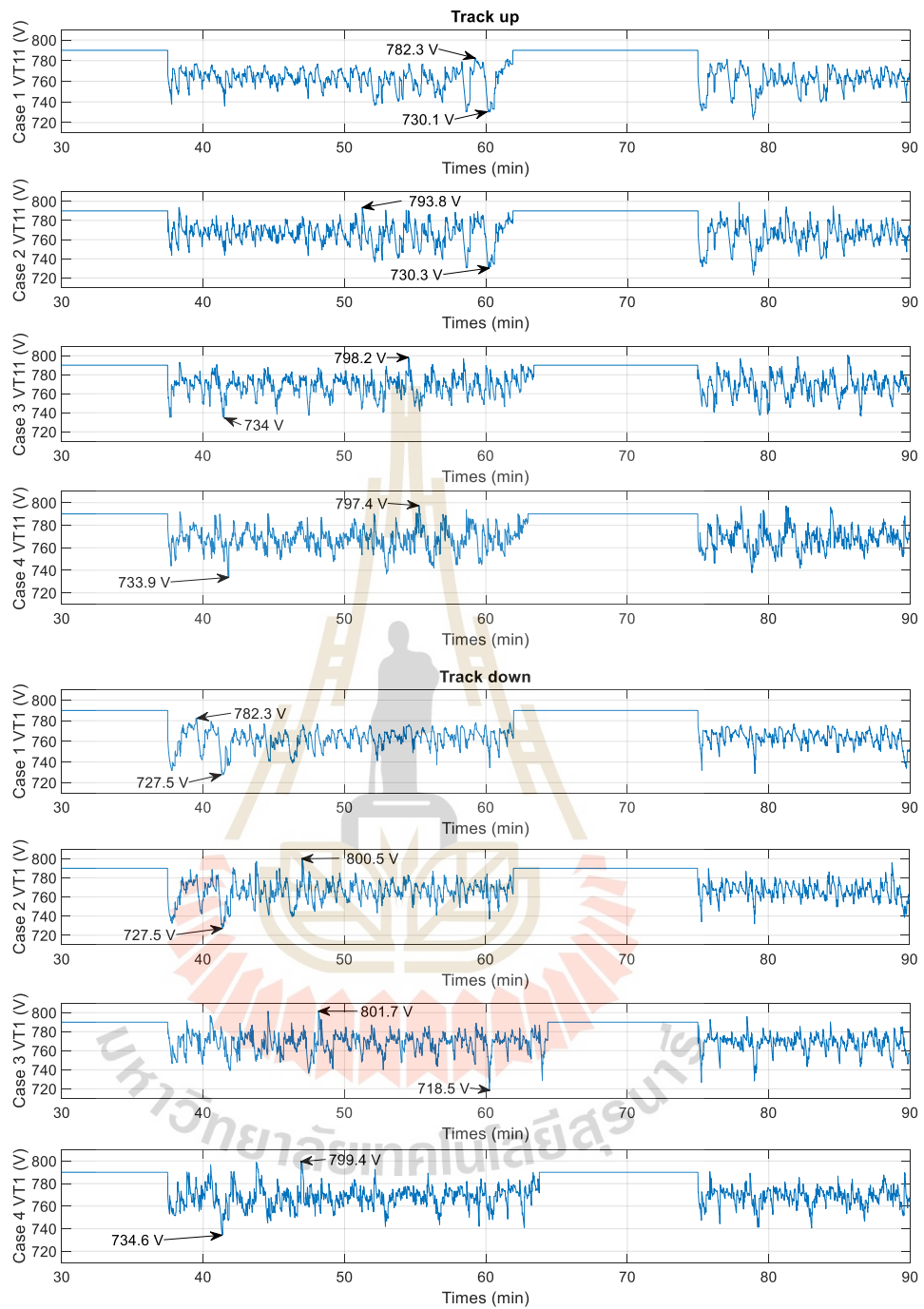


รูปที่ 5.12 ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน

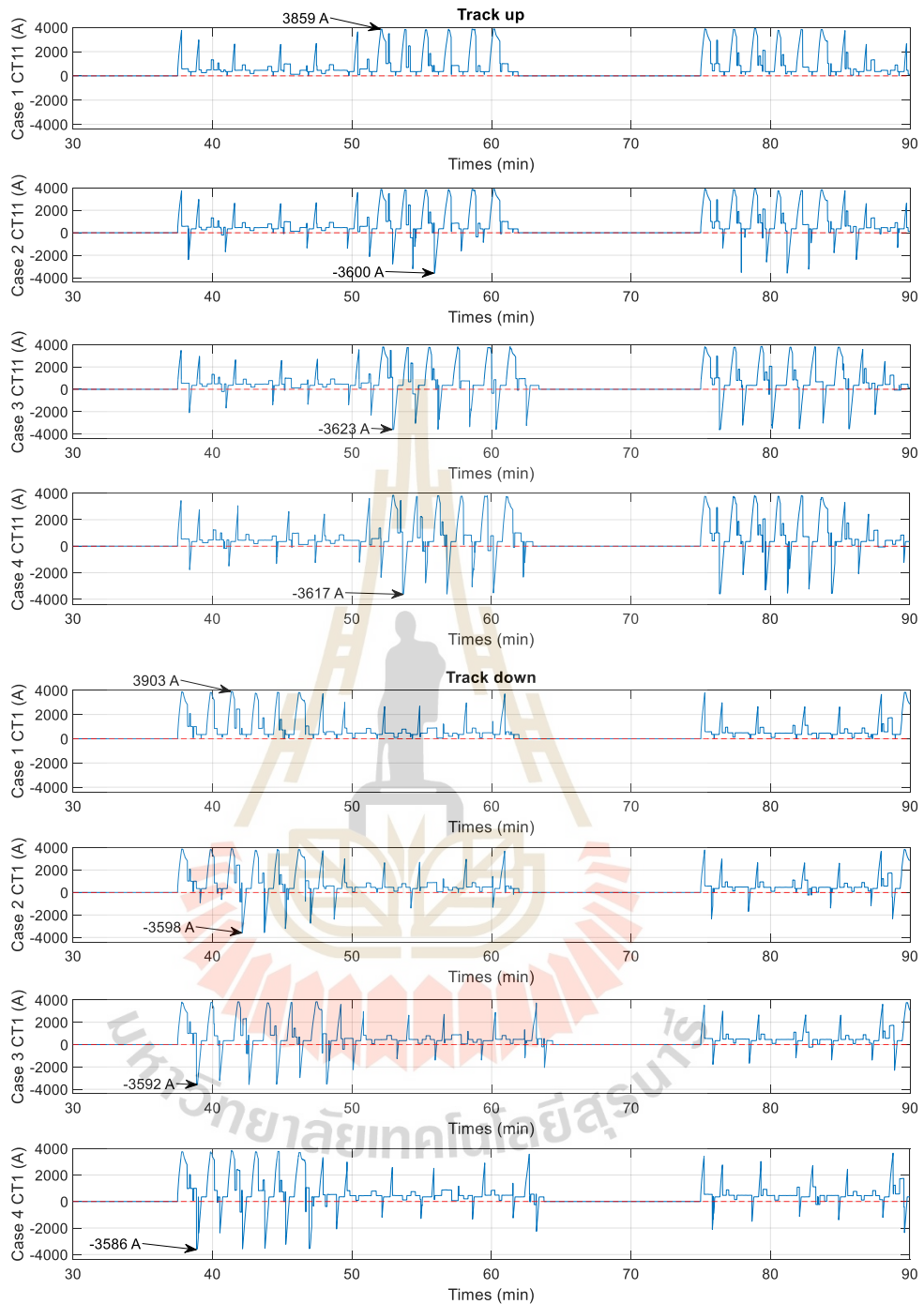
ตัวตรวจสอบการแบ่งพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อช่วงเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.12 จะเห็นว่ากรณีที่ 1 ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนจะมีค่าเท่ากับ 2 เสมอเนื่องจากไม่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน กรณีที่ 2 จะมีตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนมีค่าเท่ากับ 0 หลายช่วงเวลาเนื่องจากช่วงเวลาเร่งและเบรกซึ่งโครโนซ์กันต่ำส่งผลให้ไม่สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนได้ กรณีที่ 3 และ 4 เป็นการจัดตารางเวลาเหมาะที่สุดจะช่วยให้ช่วงเวลาที่รถไฟเร่งและเบรกซึ่งโครโนซ์กันสูงขึ้นจะส่งให้ช่วงเวลาที่ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนมีค่าเท่ากับ 0 น้อยกว่ากรณีที่ 2 โดยกรณีที่ 3 จะมีค่าตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนเท่ากับ 0 น้อยที่สุดเนื่องจากช่วงเวลาเร่งและเบรกซึ่งโครโนซ์กันสูงที่สุด



รูปที่ 5.13 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 11 และ 1 ใช้ในการเคลื่อนที่ก่อน และหลังตรวจสอบการ
แบ่งปัน พลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน



รูปที่ 5.14 แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 11 และ 1 ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน



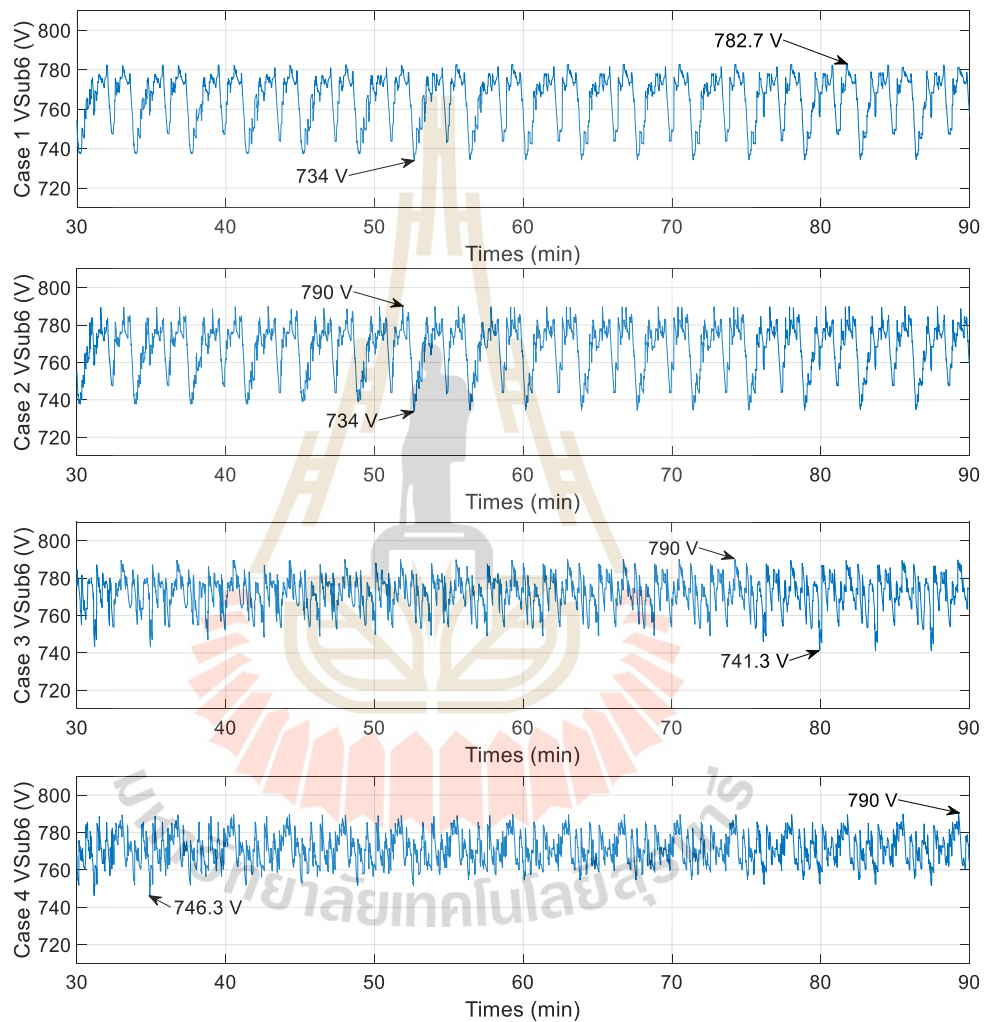
รูปที่ 5.15 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 11 และ 1 ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน

กำลังไฟฟ้าก่อนและหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลา แรงดันไฟฟ้าต่อเวลา และกระแสไฟฟ้าต่อเวลาที่รถไฟขบวนที่ 11 และ 1 ใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาเร่งด่วน แสดงดังรูปที่ 5.13 - 5.15 จากรูปที่ 5.13 กรณีที่ 1 ค่ากำลังไฟฟ้าของรถไฟจะมีเฉพาะค่าบวกเท่านั้นไม่พิจารณาพลังงานการเบรกจ่ายคืน โดยกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.859 MW และ 2.845 MW ที่รถไฟขบวนที่ 11 และรถไฟขบวนที่ 1 ตามลำดับ กรณีที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าหลังจากตรวจสอบพลังงานเบรกจ่ายคืนจะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าก่อนตรวจสอบพลังงานการเบรกจ่ายคืน โดยมีกำลังไฟฟ้าลบต่ำสุดเท่ากับ -2.825 MW เท่ากันที่รถไฟขบวนที่ 11 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนมีค่าต่ำเป็นบางสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เนื่องจากช่วงเวลาเร่งและเบรกของรถไฟฟ้างานเชิงโครโนซ์กันต่ำทำให้มีช่วงเวลาที่สามารถแบ่งปันพลังงานการเบรกจ่ายคืนได้น้อย กรณีที่ 3 และ 4 มีกำลังไฟฟ้าก่อนและหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากมีช่วงเวลาเร่งและเบรกของรถไฟฟ้างานเชิงโครโนซ์กันสูงซึ่งส่งผลให้สามารถนำพลังงานเบรกจ่ายคืนแบ่งปันให้กับรถไฟที่กำลังเร่งในระบบมากขึ้น โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าลบหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่ำสุดเท่ากับ -2.835 MW และ -2.834 MW ที่รถไฟขบวนที่ 11 และรถไฟขบวนที่ 1 ตามลำดับ แต่กรณีที่ 3 จะมีกำลังไฟฟ้าลบที่สูงกว่าในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ S11 และ S12 ที่ขาไป และที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ S11 ขากลับ ที่สถานีรับส่งผู้โดยสารใด ๆ ที่กำลังไฟฟ้าลบถ้ามีค่าต่ำมาก ๆ จะสามารถแบ่งปันพลังงานการเบรกจ่ายคืนให้กับรถไฟที่กำลังเร่งในระบบได้สูงในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนั้น ๆ

จากรูปที่ 5.14 แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่กรณีที่ 1 จะมีแรงดันสูงสุดไม่เกินแรงดันไร้โหลด หรือมีค่าเท่ากับ 790 V และมีแรงดันไฟฟ้าต่ำช่วงที่รถไฟกำลังเร่งโดยมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 730.1 V และ 727.5 V ที่รถไฟขบวนที่ 11 และ 1 ตามลำดับ กรณีที่ 2 มีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันไร้โหลดในช่วงแบ่งปันพลังงานระหว่างรถไฟ โดยมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 793.8 V และ 800.5 V ที่รถไฟขบวนที่ 11 และ 1 ตามลำดับ และมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากรณีที่ 1 กรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าที่รถไฟสูงที่สุด คือ กรณีที่ 3 มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 798.2 V และ 801.7 V ที่รถไฟขบวนที่ 11 และรถไฟขบวนที่ 1 ตามลำดับ และเป็นกรณีที่ มีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดที่รถไฟขบวนที่ 1 มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 718.5 V แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าต่ำถ้ารถไฟทำงานในโหมดเร่งในบริเวณใกล้เคียงกันหลายขบวน และบริเวณสถานีรับส่งผู้โดยสารไม่มีสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีที่รถไฟแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟได้สูงจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟจะมีค่าสูงเช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 5.15 กระแสไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่กรณีที่ 1 มีกระแสไฟฟ้าเฉพาะค่าบวกเท่านั้นเนื่องจากพิจารณาเฉพาะรถไฟทำงานในโหมดขับเคลื่อนไม่พิจารณาโหมดเบรกจ่ายคืนพลังงานโดยค่ากระแสไฟฟ้าที่รถไฟจะมีเฉพาะค่าบวกมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่เท่ากับ 3859 A และ 3903 A ที่รถไฟขบวนที่ 11 และ 1 ตามลำดับ กระแสไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบเมื่อทำงานในโหมดเบรกจ่ายคืนพลังงาน กระแสไฟฟ้าลบที่รถไฟจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการเชิงโครโนซ์ของการเร่งและเบรกของรถไฟ เมื่อกระแสไฟฟ้าลบมีค่าต่ำนั้นหมายความว่าสามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนในช่วงเวลานั้นได้สูงเช่นเดียวกัน กรณีที่มีกระแสไฟฟ้าเป็นลบต่ำสุด คือ กรณีที่ 3 โดยมีค่า

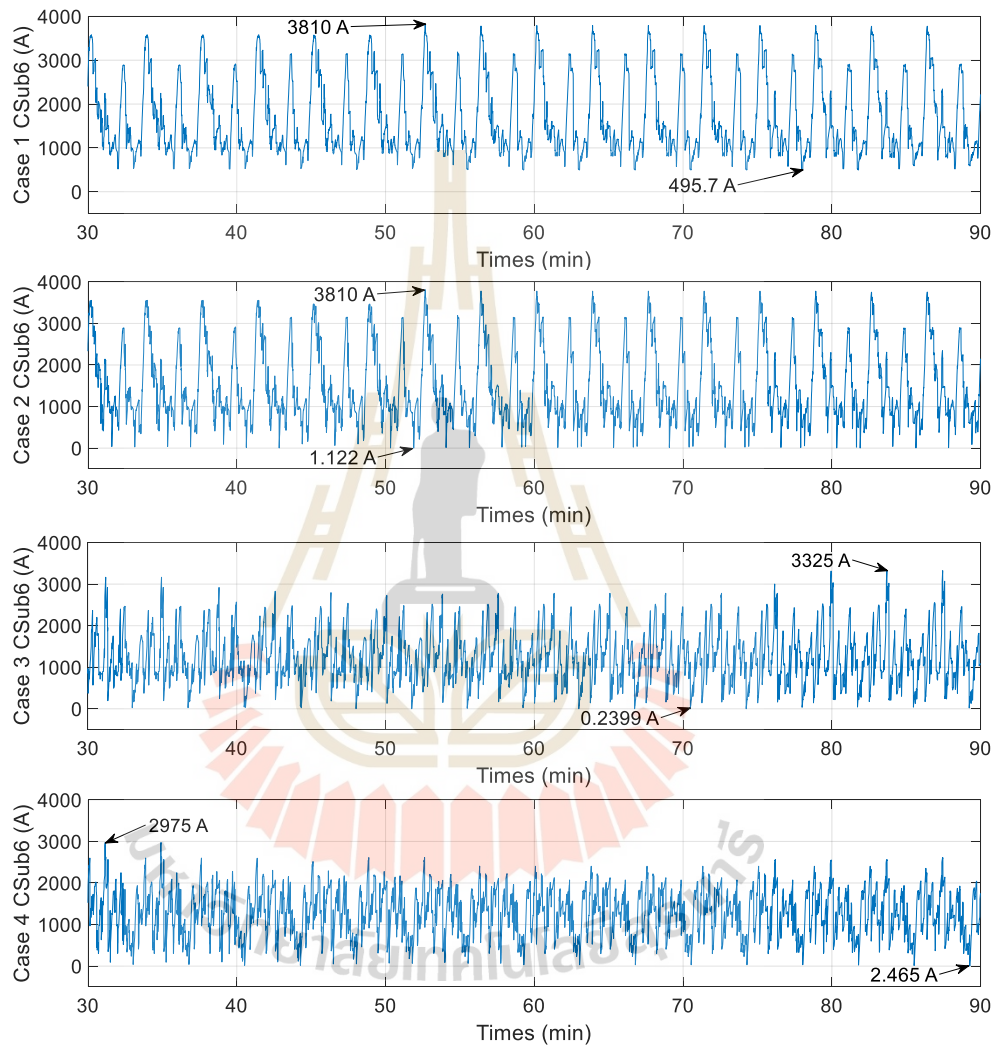
กระแสไฟฟ้าต่ำที่สุดอยู่เท่ากับ -3623 A และ -3592 A ที่รถไฟขบวนที่ 11 และ 1 ตามลำดับ ลักษณะกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าคันที่เหลือในระบบมีลักษณะเหมือนกัน แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่อเวลา กระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่อเวลา และกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.16 – 5.18



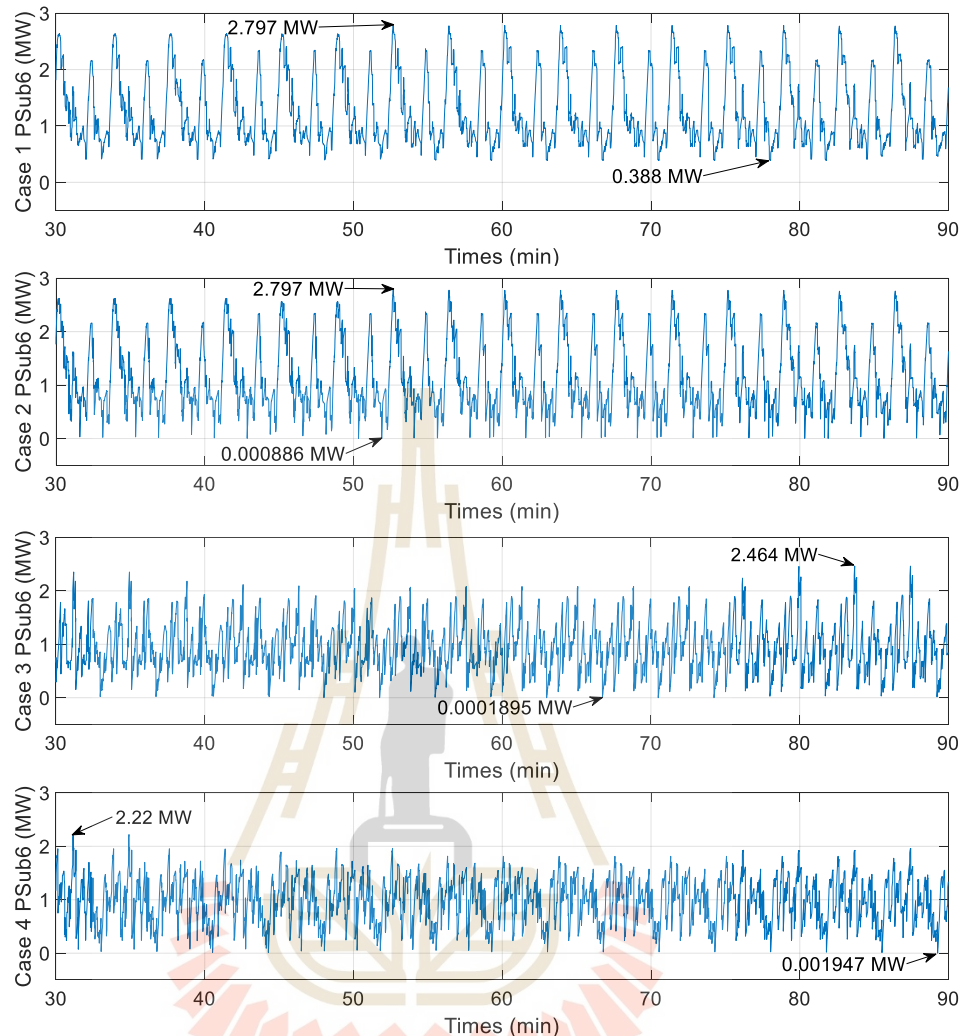
รูปที่ 5.16 แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน

จากรูปที่ 5.16 แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 มีค่าแรงดันไฟฟ้าตกน้อยสุดในกรณีที่ 4 โดยมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 746.3 V โดยมีแรงดันตกเท่ากับ 43.7 V แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีค่าแรงดันตกสูงเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่ง และตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนอยู่ห่างจากตำแหน่งที่รถไฟฟ้าเร่ง แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีค่าสูงเมื่อเกิดการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟหรือช่วยลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้า

ขับเคลื่อน และเมื่อเกิดการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนจะสามารถลดแรงดันตกที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ โดยกรณีที่ 1 มีแรงดันรรมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 782.7 V กรณีที่เหลือจะพิจารณาการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสูงสุดเท่ากับแรงดันไร้โหลด หรือมีค่าเท่ากับ 790 V กรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเฉลี่ยสูงสุดที่สุด คือ กรณีที่ 3



รูปที่ 5.17 กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน



รูปที่ 5.18 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วน

จากรูปที่ 5.18 และ 5.19 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีค่าสูงเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่ง และตำแหน่งของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกับตำแหน่งที่รถไฟเร่งอยู่ห่างกันมาก ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีค่าต่ำเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก กรณีที่ 1 และ 2 เป็นกรณีก่อนจัดตารางเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วนมีช่วงเวลาเร่งและเบรกของรถไฟฟ้าที่ซึ่งโครโนซ์กันต่ำส่งผลให้มีค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 สูง โดยมีกระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 3810 A และ 2.797 MW ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 กรณีที่ 4 จะมีช่วงเวลาการชิงโครโนซ์กันระหว่างรถไฟสูงที่สุด จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าลดลงเนื่องจากการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟ ทำให้สามารถช่วยลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ โดยมีค่ากระแสไฟฟ้า และ

กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 2975 A และ 2.22 MW เป็นกรณีที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดต่ำที่สุด ลักษณะแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่เหลือนี้อาจมีลักษณะคล้ายกัน

เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าหลายขบวนในช่วงเวลาเร่งด่วนกรณี 1 ถึง 4 แสดงดังตารางที่ 5.8 โดยที่ TT คือ เวลาที่รถไฟฟ้าใช้เคลื่อนที่จากสถานี W1 ถึง S12 จะเห็นว่ากรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO และ GA ในช่วงเวลาเร่งด่วน หรือกรณี 3 และ 4 สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และสามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟฟ้าได้สูงกว่ากรณีไม่จัดตารางเวลาที่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนในช่วงเวลาเร่งด่วน หรือกรณี 2 โดยกรณีที่ลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้สูงที่สุด คือ กรณีที่ 3 กรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO ในช่วงเวลาเร่งด่วน โดยสามารถลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ 22.198% และสามารถนำพลังงานเบรกจ่ายคืนแบ่งปันระหว่างรถไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 93.015%

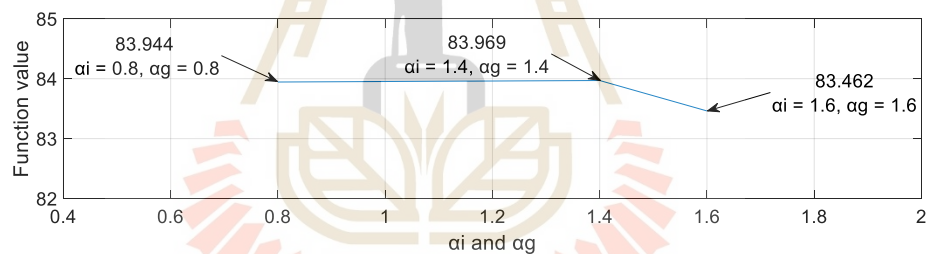
ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากรณีต่าง ๆ ในช่วงเวลาเร่งด่วน

Timetable	Case	$E_{sub,cons}$ (MWh)	$E_{train,cons}$ (MWh)	$E_{brake,cons}$ (MWh)	$E_{reg,cons}$ (MWh)	$E_{loss,line}$ (MWh)	TT (min)	E_{reg} (%)	E_{save} (%)
Before	1	9.261	9.171	0	0	0.090	24	0	0
	2	8.152	9.171	2.348	1.118	0.098	24	47.615	12.059
After	3	7.234	9.210	2.219	2.064	0.088	25.17	93.015	22.198
	4	7.410	9.192	2.252	1.873	0.091	25	83.171	20.175

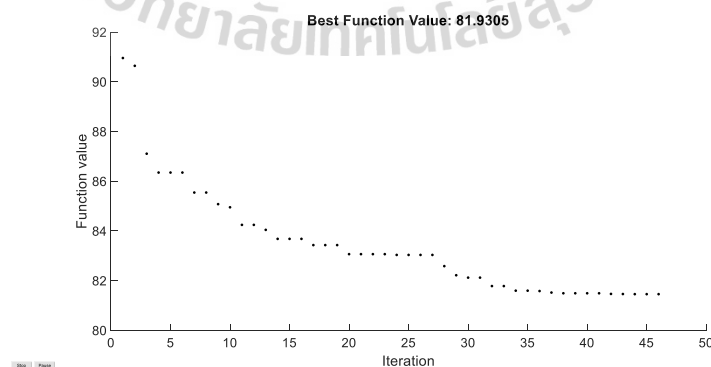
5.3.2 ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

มีระยะเวลาระหว่างรถไฟฟ้ายูที่ 6 นาที และมีมวลผู้โดยสารเฉลี่ยชนิด AW2 หมายถึงสถานการณ์ผู้โดยสาร 5 คนต่อตารางเมตร

ทำการปรับค่า α_i และ α_g โดยการสุ่มเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO สำหรับจัดตารางเวลารถไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนช่วงเวลาไม่เร่งด่วน สุ่มทั้งหมด 3 รอบ รอบที่ 1 ให้ค่า α_i เท่ากับ 0.8 และ α_g เท่ากับ 0.8 รอบที่ 2 ให้ค่า α_i เท่ากับ 1.6 และ α_g เท่ากับ 1.6 และรอบที่ 3 ให้ค่า α_i เท่ากับ 1.4 และ α_g เท่ากับ 1.4 ผลการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยใช้ค่า α_i และ α_g ทั้ง 3 รอบ แสดงดังรูปที่ 5.19 ค่า α_i และ α_g เท่ากับ 1.6 ได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 83.462 ดังนั้นการจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนจะใช้ค่า α_i เท่ากับ 1.6 และ α_g เท่ากับ 1.6 ในการหาจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุด 30 รอบ มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการหาอัตราส่วนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนน้อยที่สุดด้วยวิธี PSO ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน แสดงดังรูปที่ 5.20 และผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตารางเวลารถไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนด้วยวิธี PSO แสดงดังตารางที่ 5.9



รูปที่ 5.19 ผลการปรับ α_i และ α_g ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน



รูปที่ 5.20 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีจัดตารางเวลารถไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

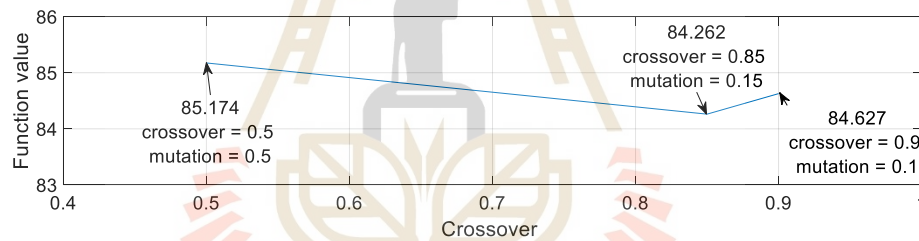
ตารางที่ 5.9 ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดช่วงเวลาไม่เร่งด่วนด้วยวิธี PSO

Track up				Track down			
Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)	Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)
W1	0	0	0	S12	0	0	0
CEN	44	60	20	S11	80	101	21
S1	32	146	45	S10	63	72	26
S2	30	178	26	S9	63	86	20
S3	30	132	37	S8	65	77	28
S5	28	163	29	S7	58	70	22
S6	45	79	20	S6	80	82	27
S7	73	84	20	S5	42	83	24
S8	60	68	44	S3	29	158	37
S9	63	78	20	S2	30	132	20
S10	68	83	28	S1	27	196	24
S11	65	72	23	CEN	32	146	28
S12	73	106	24	W1	44	60	20
Objective value (%)				81.931			
Energy substations consumption (MWh)				4.375			
Energy trains consumption (MWh)				5.292			
Energy loss line consumption (MWh)				0.048			
Mean				83.221			
SD				0.678			
CV (%)				0.814			

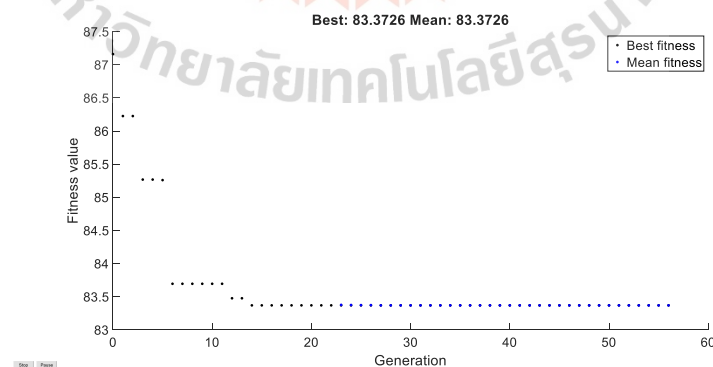
จากตารางที่ 5.9 มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งเป็นอัตราส่วนพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับพลังงานที่รถไฟไฟฟ้าใช้รวมกับพลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุดเท่ากับ 81.931 % ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีการกระจายตัวของข้อมูล หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.678 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนเท่ากับ 0.814% ตามมาตรฐานการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันน้อยกว่า 5% ถือว่ายอมรับได้ ที่ขาไปสถานีรับส่งผู้โดยสาร CEN, S1, S5, S6, S7, S9, S10, S11 และ S12 มีความเร็วจำกัดต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกรณีก่อนจัดตารางเวลาเท่ากับ 2 km/h, 3 km/h, 2 km/h, 1 km/h, 7 km/h, 7 km/h, 2 km/h, 5 km/h และ 7 km/h ตามลำดับ มีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารต่ำสุดเท่ากับ 20 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S2 และ S7 มีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารสูงสุดที่ 45 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S1 ที่ขากลับสถานีรับส่งผู้โดยสาร S10, S9, S8, S7, S5, S3, S1, CEN และ W1 มีความเร็วจำกัดต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกรณีก่อนจัดตารางเวลาเท่ากับ 7 km/h, 7 km/h, 5 km/h, 2 km/h, 4 km/h, 1 km/h, 3 km/h, 3 km/h และ 2 km/h ตามลำดับ มีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารต่ำสุดเท่ากับ 20 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S9 และมีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารสูงสุด

เท่ากับ 37 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S3 เมื่อความเร็วจำกัดระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสารมีค่าต่ำกว่ากรณีก่อนจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดส่งผลให้ระยะเวลาวิ่งระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสาร และเวลาหยุดของรถไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารมีค่าเปลี่ยนไปจะส่งผลต่อตารางเวลาการวิ่งของรถไฟฟ้า

ทำการปรับค่า crossover และ mutation โดยการสุ่มเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA สำหรับจัดตารางเวลารถไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน สุ่มทั้งหมด 3 รอบ รอบที่ 1 มีค่า crossover เท่ากับ 0.5 และ mutation เท่ากับ 0.5 รอบที่ 2 มีค่า crossover เท่ากับ 0.9 และ mutation = 0.1 และรอบที่ 3 มีค่า crossover เท่ากับ 0.85 และ mutation เท่ากับ 0.15 ผลการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยใช้ค่า crossover และ mutation ทั้ง 3 รอบ แสดงดังรูปที่ 5.21 ค่า crossover และ mutation เท่ากับ 0.85 และ 0.15 ตามลำดับ ได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 84.262 ดังนั้นการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนจะใช้ค่า crossover เท่ากับ 0.85 และ mutation เท่ากับ 0.15 ในการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด 30 รอบ มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการหาอัตราส่วนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนน้อยที่สุดด้วยวิธี GA ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.22 และผลการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตารางเวลารถไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนด้วยวิธี GA แสดงดังตารางที่ 5.10



รูปที่ 5.21 ผลการปรับ crossover และ mutation ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน



รูปที่ 5.22 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีจัดตารางเวลารถไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

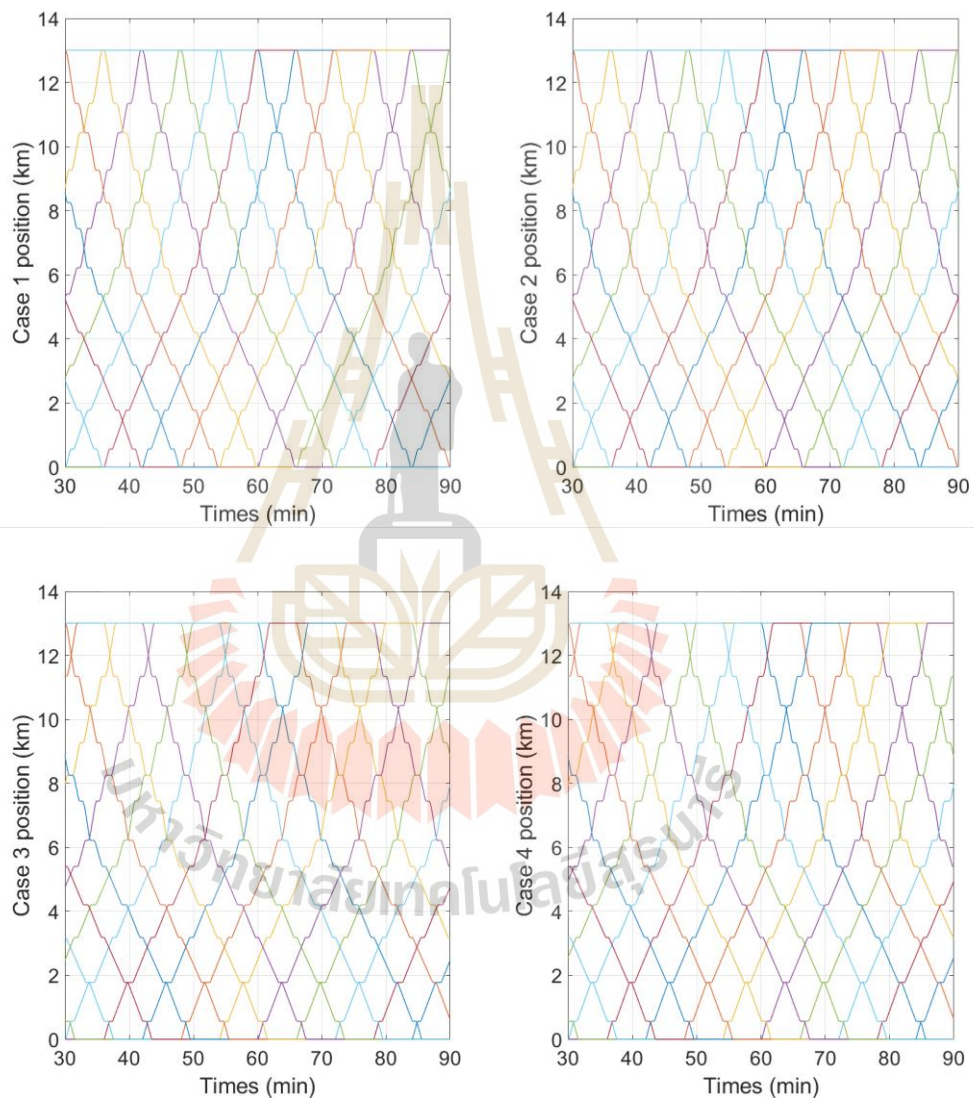
ตารางที่ 5.10 ผลการจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุดในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนด้วยวิธี GA

Track up				Track down			
Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)	Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)
W1	0	0	0	S12	0	0	0
CEN	45	59	21	S11	79	102	22
S1	34	139	39	S10	64	72	26
S2	29	184	23	S9	69	83	21
S3	29	136	23	S8	63	78	28
S5	29	158	22	S7	56	71	22
S6	43	82	31	S6	80	82	29
S7	78	82	41	S5	44	81	29
S8	56	70	43	S3	27	168	22
S9	63	78	22	S2	27	144	21
S10	66	84	20	S1	28	190	22
S11	64	72	28	CEN	33	143	30
S12	73	106	21	W1	44	60	30
Objective value (%)				83.373			
Energy substations consumption (MWh)				4.451			
Energy trains consumption (MWh)				5.291			
Energy loss line consumption (MWh)				0.048			
Mean				84.418			
SD				0.658			
CV (%)				0.780			

จากตารางที่ 5.10 มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งเป็นอัตราส่วนพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับพลังงานที่รถไฟไฟฟ้าใช้ร่วมกับพลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุดเท่ากับ 83.373 % ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีการกระจายตัวของข้อมูล หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.658 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนเท่ากับ 0.780% ตามมาตรฐานการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันน้อยกว่า 5% ถือว่ายอมรับได้ ที่เข้าไปสถานีรับส่งผู้โดยสาร CEN ถึง S12 มีความเร็วจำกัดต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกรณีก่อนจัดตารางเวลาเท่ากับ 1 km/h, 1 km/h, 1 km/h, 1 km/h, 1 km/h, 3 km/h, 2 km/h, 4 km/h, 7 km/h 4 km/h, 6 km/h และ 7 km/h ตามลำดับ มีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารต่ำสุดเท่ากับ 20 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S10 มีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารสูงสุดที่ 43 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S8 ที่ขากลับสถานีรับส่งผู้โดยสาร S11 ถึง W1 มีความเร็วจำกัดต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกรณีก่อนจัดตารางเวลากว่า 1 สถานีผู้รับส่งโดยสาร S8 โดยมีค่าเท่ากับ 1 km/h, 6 km/h, 1 km/h, 7 km/h, 4 km/h, 2 km/h, 3 km/h, 3 km/h, 2 km/h, 2 km/h และ 2 km/h ตามลำดับ มีเวลาหยุดของรถไฟที่สถานีรับส่งผู้โดยสารต่ำสุดเท่ากับ 21 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S9 และ S2 และมีเวลาหยุดของรถไฟที่

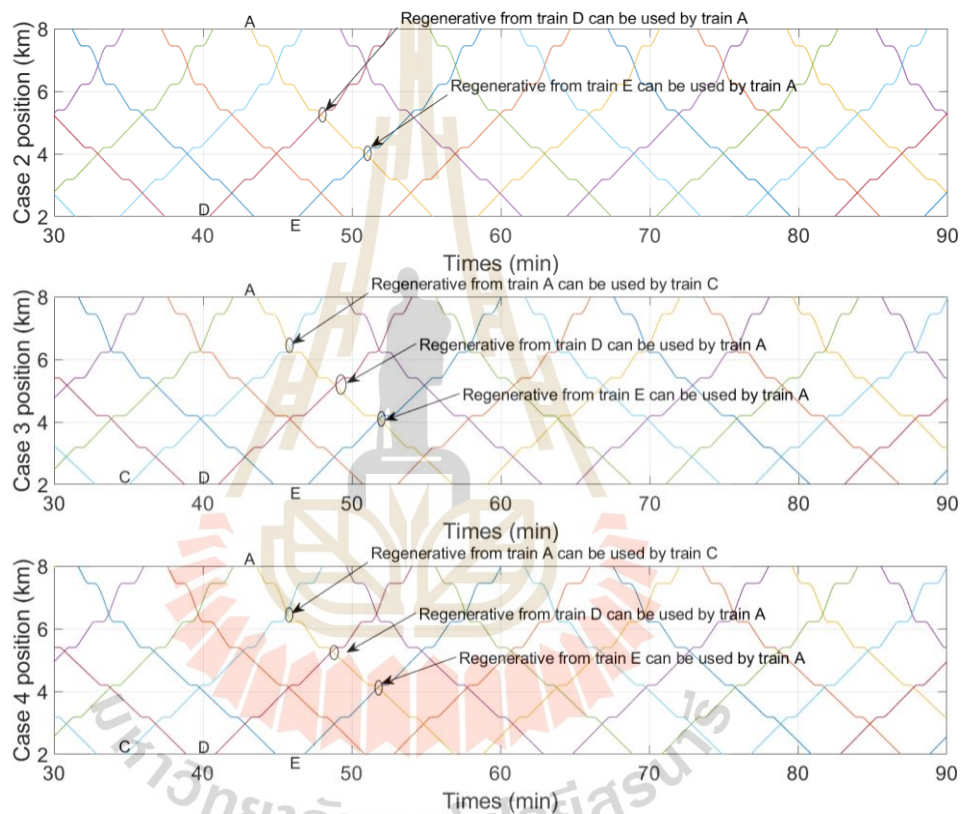
สถานีรับส่งผู้โดยสารสูงสุดเท่ากับ 30 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร CEN และ W1 เมื่อความเร็วจำกัดระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสารมีค่าต่ำกว่ากรณีก่อนจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดส่งผลให้ระยะเวลาวิ่งระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสาร และเวลาหยุดของรถไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารมีค่าเปลี่ยนไปจะส่งผลต่อตารางเวลาการวิ่งของรถไฟฟ้า

มีตำแหน่งรถไฟฟ้าต่อเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.23 ในช่วงเวลาเดียวกันมีขบวนรถไฟฟ้าวิ่งพร้อมกัน 8 ขบวน ประกอบด้วยขาไป 4 ขบวน และขากลับ 4 ขบวน

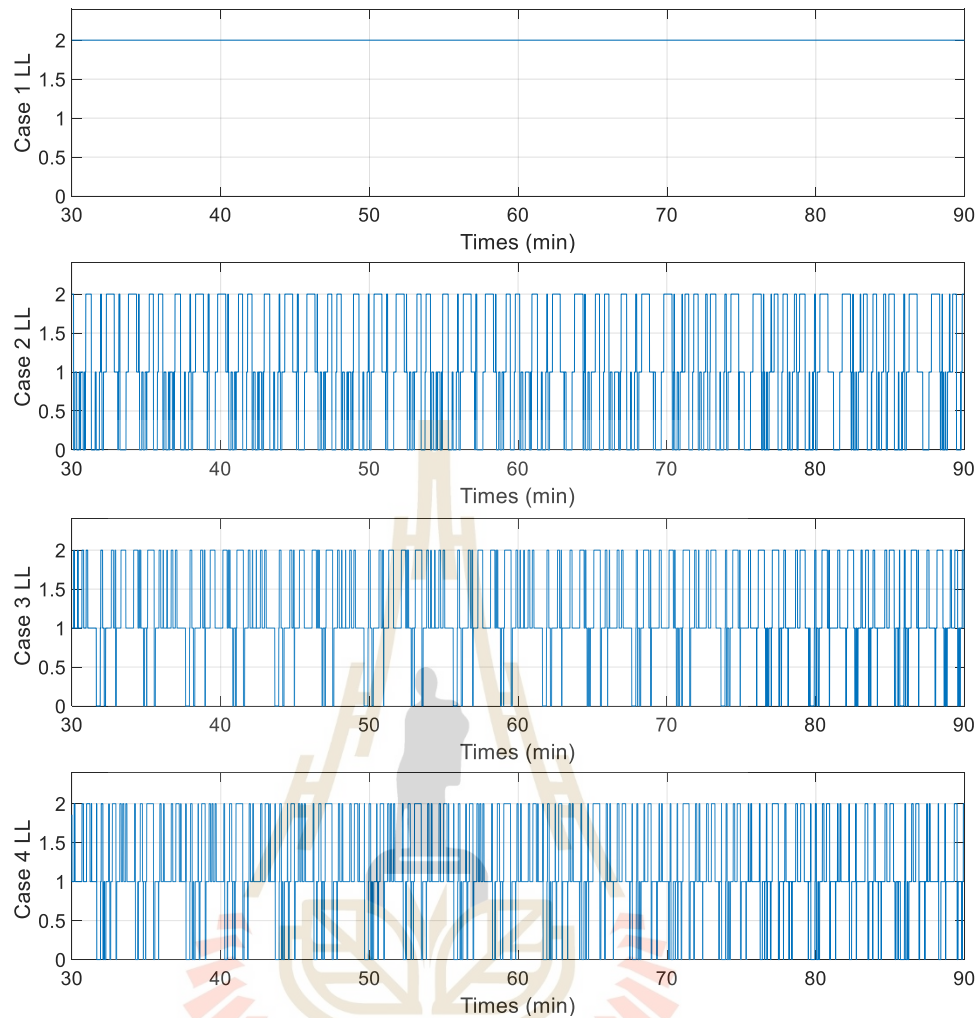


รูปที่ 5.23 ตำแหน่งรถไฟฟ้าต่อเวลาในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

ตัวอย่างตำแหน่งของรถไฟต่อเวลาที่สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนได้ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.24 กรณีที่ 2 เป็นกรณีก่อนจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด โดยรถไฟฟ้ายขบวน D และ E สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนให้กับรถไฟฟ้ายขบวน A กรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 สามารถเพิ่มช่วงเวลาการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟฟ้ายขบวน A ได้โดยเพิ่มมาเป็น 3 ช่วงเวลา โดยรถไฟฟ้ายขบวน A สามารถแบ่งปันพลังงานให้กับรถไฟฟ้ายขบวน C รถไฟฟ้ายขบวน D สามารถแบ่งปันพลังงานให้กับรถไฟฟ้ายขบวน A และรถไฟฟ้ายขบวน E สามารถแบ่งปันพลังงานให้กับรถไฟฟ้ายขบวน A

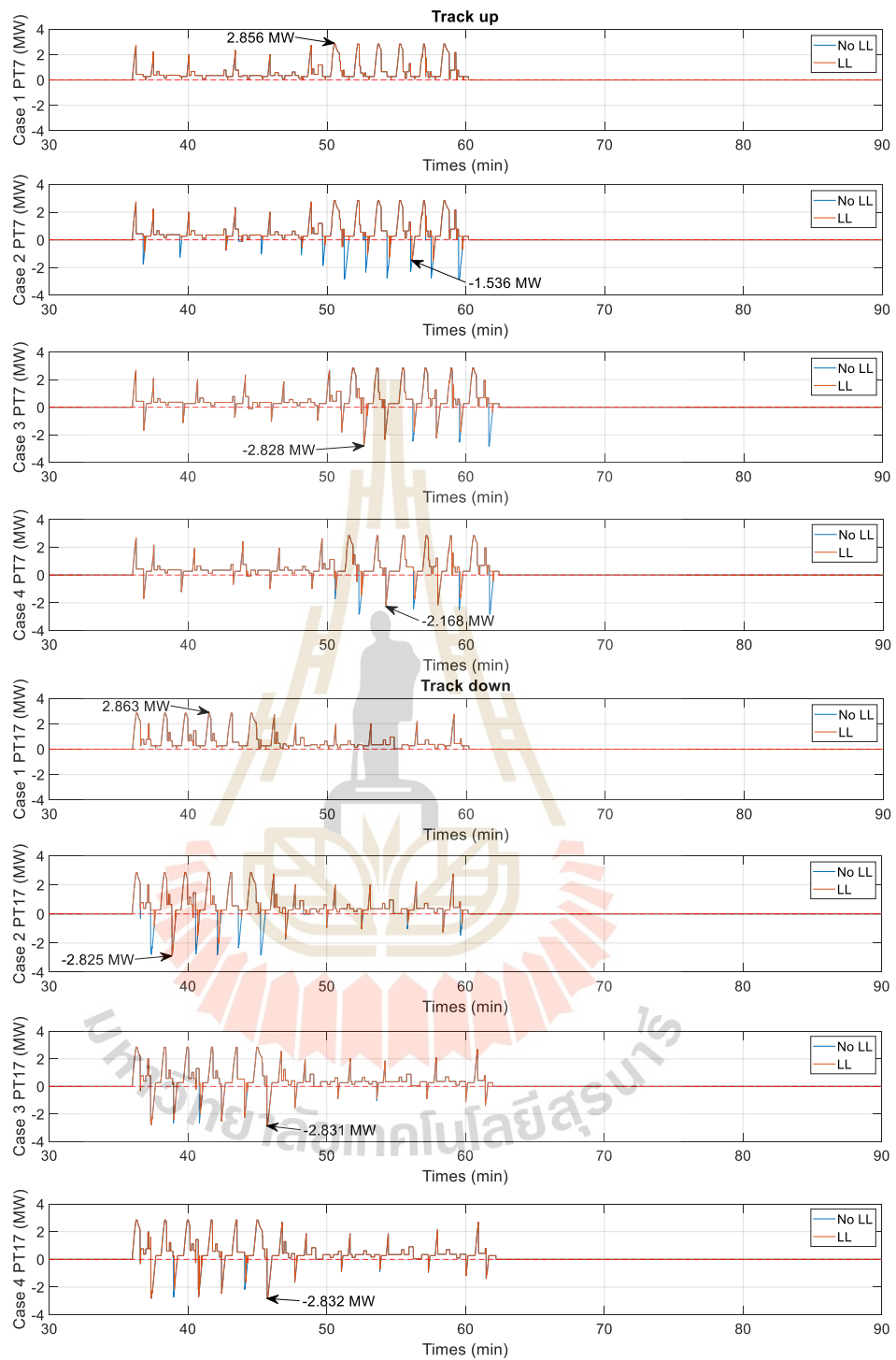


รูปที่ 5.24 ตัวอย่างตำแหน่งรถไฟต่อเวลาที่สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนได้ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

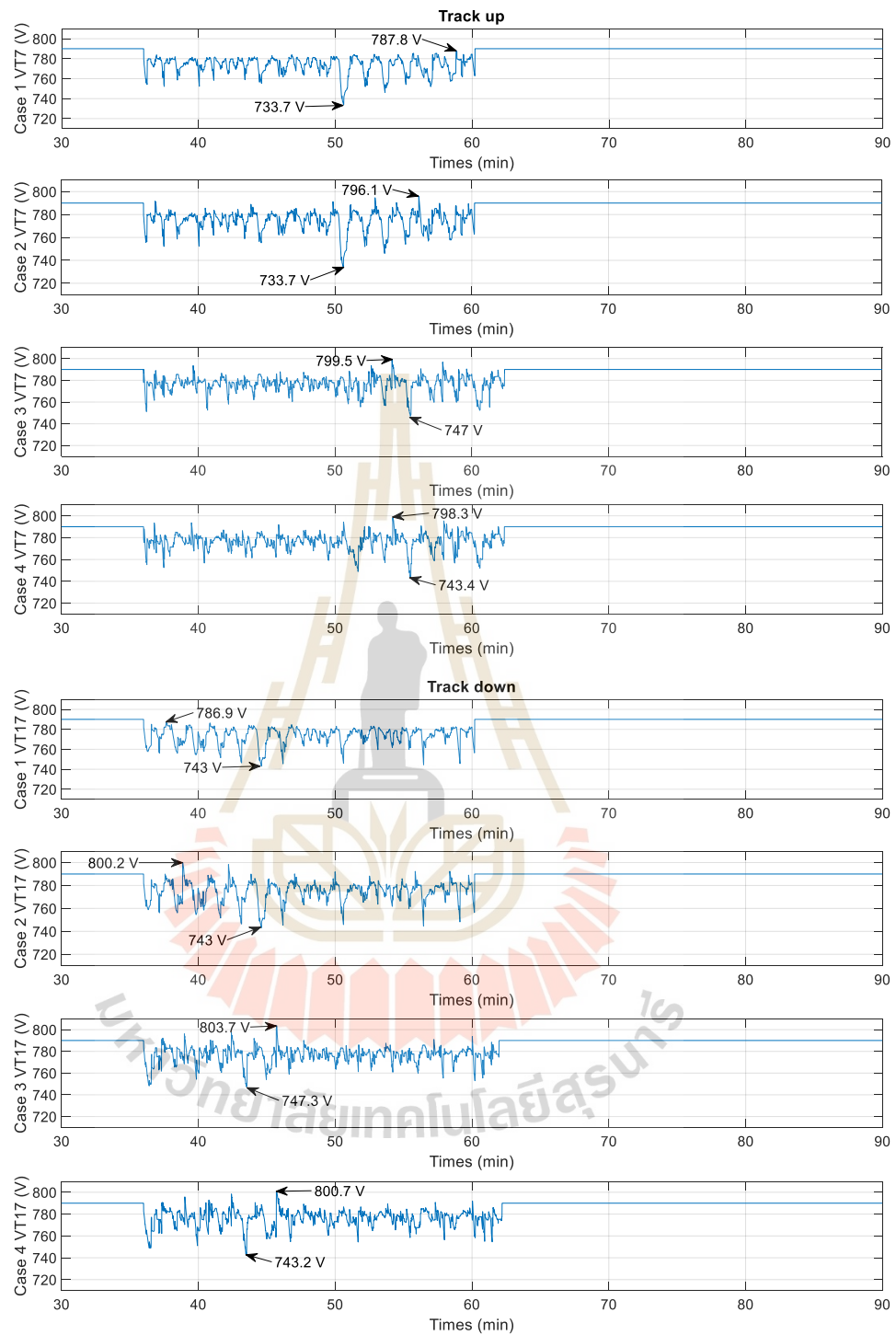


รูปที่ 5.25 ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลาในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

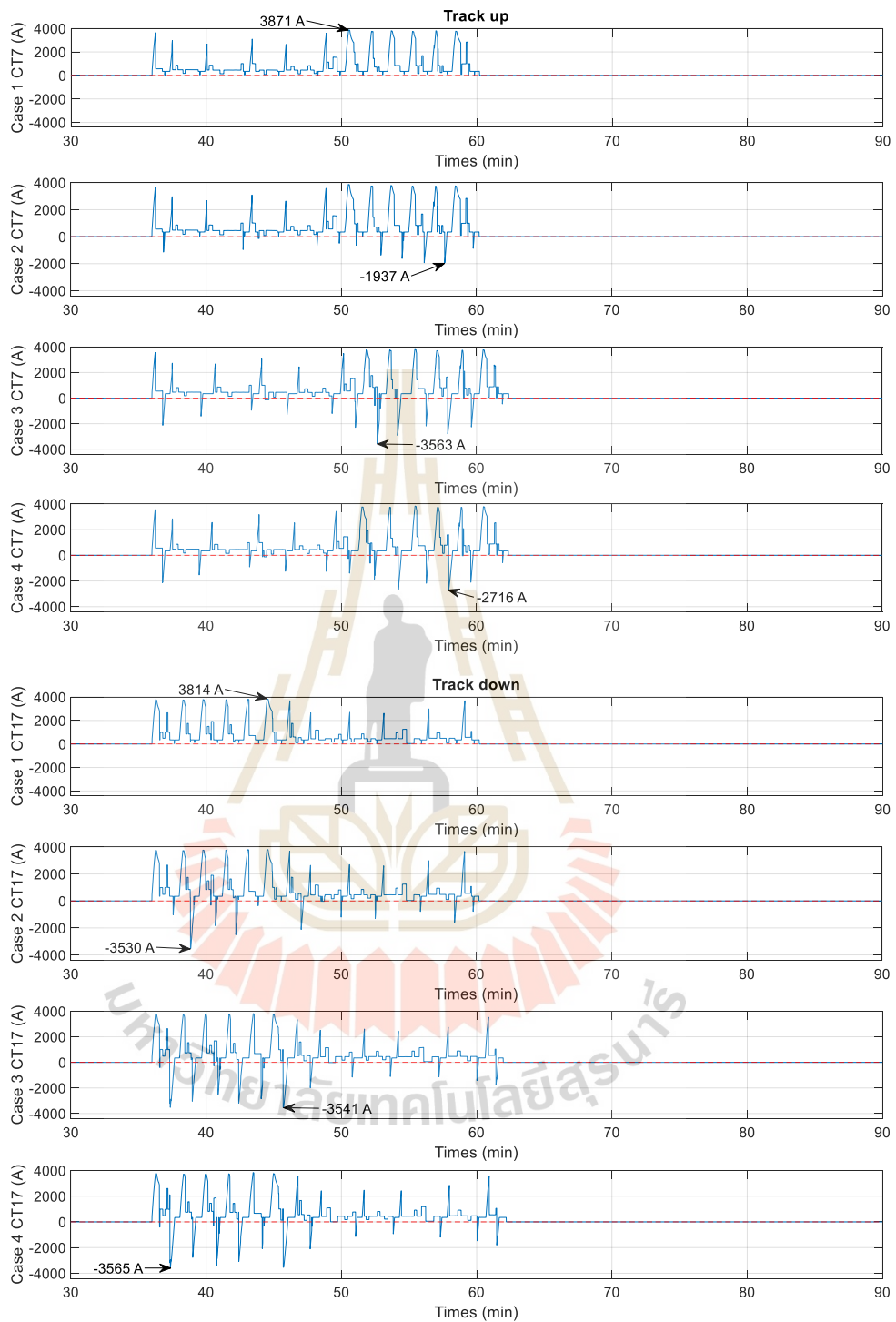
ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลาในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.25 จะเห็นว่ากรณีที่ 1 ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนจะมีค่าเท่ากับ 2 เสมอเหมือนช่วงเวลาเร่งด่วน กรณีที่ 2 มีค่าตัวตรวจสอบพลังงานเบรกจ่ายคืนต่ำสุดที่ค่า 0 บางช่วงเวลาเนื่องจากช่วงเวลาเร่งและเบรกซึ่งโครโนซ์กันต่ำทำให้ไม่สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟฟ้าได้ กรณีที่ 3 และ 4 เป็นการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดช่วยให้ช่วงเวลาที่รถไฟเร่งและเบรกซึ่งโครโนซ์กันสูงขึ้นส่งผลให้ช่วงเวลาที่ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนมีค่าเท่ากับ 0 น้อยกว่ากรณีที่ 2 โดยกรณีที่ 3 จะมีช่วงเวลาที่ค่าตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนเท่ากับ 0 น้อยที่สุดเนื่องจากช่วงเวลาเร่งและเบรกซึ่งโครโนซ์กันสูงที่สุด โดยตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนจะมีช่วงเวลาที่ค่าเป็น 0 มากกว่าช่วงเวลาเร่งด่วนทุกกรณี เนื่องจากช่วงเวลาเร่งและเบรกไม่ซึ่งโครโนซ์กัน และมีจำนวนรถไฟที่วิ่งพร้อมกันน้อยกว่าช่วงเวลาเร่งด่วนทำให้มีช่วงเวลาที่รถไฟเร่งและเบรกซึ่งโครโนซ์กันน้อยลง



รูปที่ 5.26 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 17 ใช้ในการเคลื่อนที่ก่อน และหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลาในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน



รูปที่ 5.27 แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 17 ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อเวลาในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

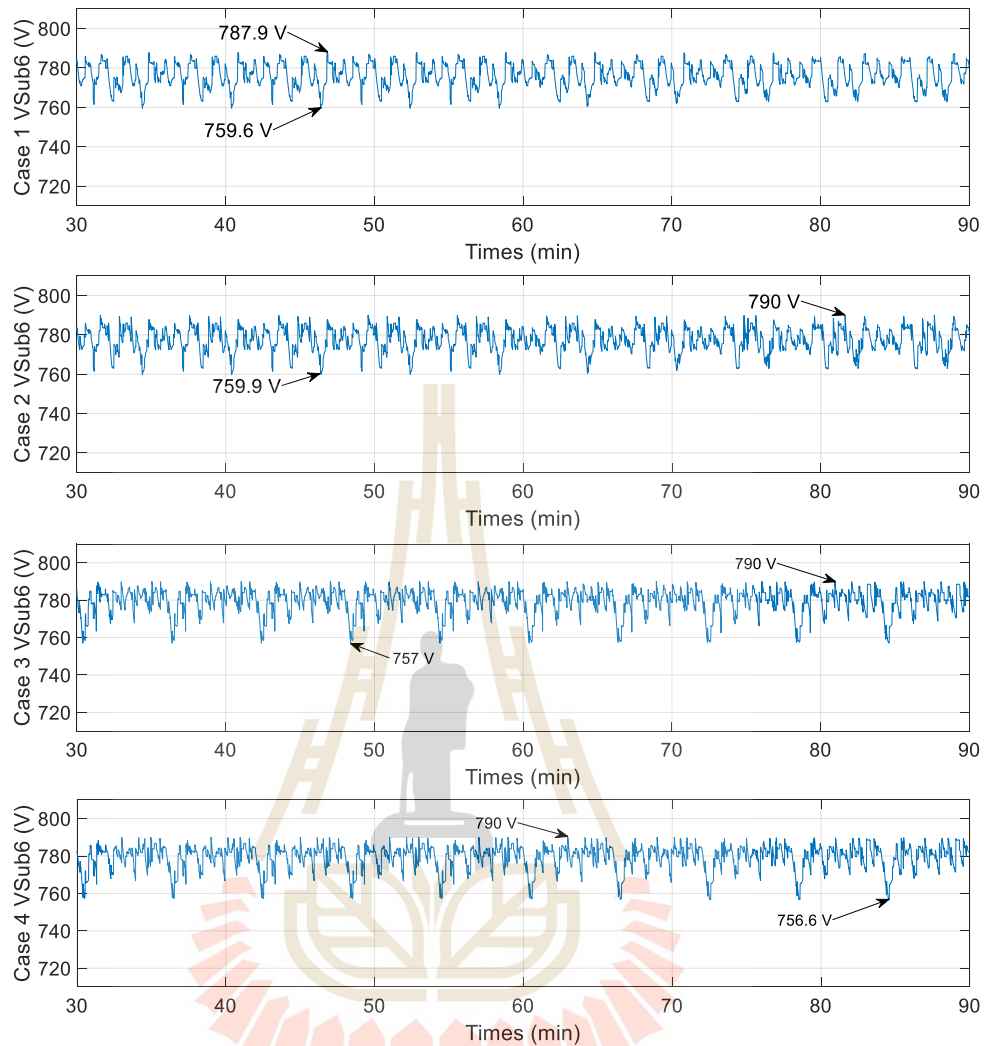


รูปที่ 5.28 กระแสไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 17 ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อเวลาในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

กำลังไฟฟ้าก่อนและหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลา แรงดันไฟฟ้าต่อเวลา และกระแสไฟฟ้าต่อเวลาที่รถไฟขบวนที่ 7 และ 17 ใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.26 – 5.28 จากรูปที่ 5.26 กรณีที่ 1 ค่ากำลังไฟฟ้าของรถไฟจะมีเฉพาะค่าบวกเท่านั้นไม่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน เหมือนช่วงเวลาเร่งด่วน โดยกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.856 MW และ 2.863 MW ที่รถไฟขบวนที่ 7 และ 17 ตามลำดับ กรณีที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าหลังจากตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนจะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าก่อนตรวจสอบพลังงานเบรกจ่ายคืนเนื่องจากช่วงเวลาการเร่งและเบรกของรถไฟที่ซิงโครไนซ์กันต่ำโดยมีค่ากำลังไฟฟ้าลบต่ำสุดเท่ากับ -1.536 MW และ -2.825 MW ที่รถไฟขบวนที่ 7 และ 17 ตามลำดับ กรณีที่ 3 กำลังไฟฟ้าก่อนและหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากมีช่วงเวลาเร่งและเบรกของรถไฟที่ซิงโครไนซ์กันสูงขึ้น โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่ำสุดเท่ากับ -2.828 MW และ -2.831 MW ที่รถไฟขบวนที่ 7 และ 17 ตามลำดับ กรณีที่ 4 มีกำลังไฟฟ้าหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ต่ำกว่ากรณีที่ 2 แต่สูงกว่ากรณีที่ 3 ที่รถไฟขบวนที่ 7 โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ -2.168 MW ที่สถานีรับส่งผู้โดยสารใด ๆ ที่กำลังไฟฟ้าลบถ้ามีค่าต่ำมาก ๆ จะสามารถแบ่งปันพลังงานการเบรกจ่ายคืนให้กับรถไฟที่กำลังเร่งในระบบได้สูงในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนั้น

จากรูปที่ 5.27 แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่กรณีที่ 1 จะมีแรงดันสูงสุดไม่เกินแรงดันไรโพลต์ หรือ 790 V เหมือนช่วงเวลาเร่งด่วน มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 787.8 V และ 786.9 V ที่รถไฟขบวนที่ 7 และ 17 ตามลำดับ รถไฟจะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำช่วงที่รถไฟกำลังเร่ง โดยมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดอยู่เท่ากับ 733.7 V และ 743 V ที่รถไฟขบวนที่ 7 และ 17 ตามลำดับ และเป็นกรณีที่แรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด กรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าที่รถไฟสูงที่สุด คือ กรณีที่ 3 ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 799.5 V และ 803.7 V ที่รถไฟขบวนที่ 7 และ 17 ตามลำดับ โดยช่วงเวลาไม่เร่งด่วนจะมีค่าแรงดันรถไฟต่ำสุดสูงกว่าช่วงเวลาเร่งด่วนเนื่องจากมีจำนวนรถไฟวิ่งพร้อมกันน้อยกว่า

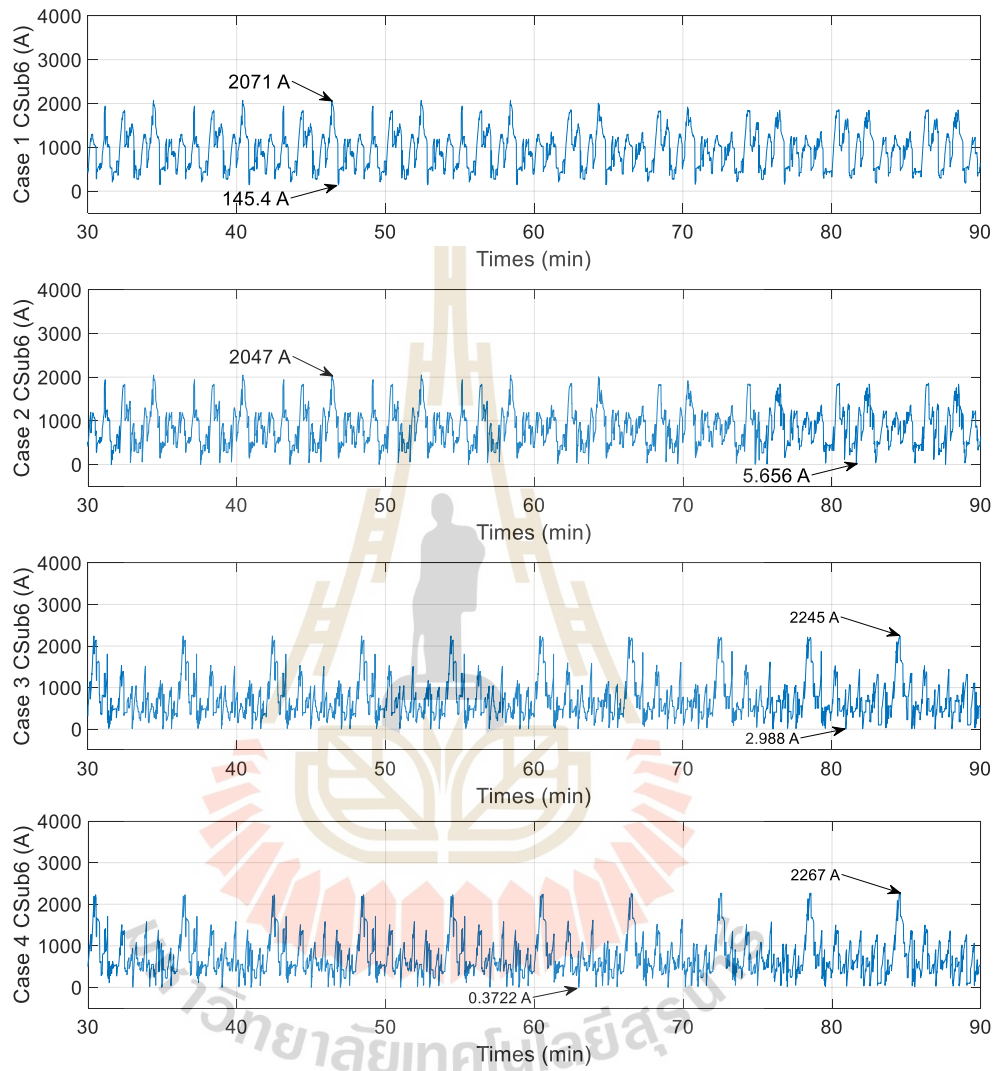
จากรูปที่ 5.28 กระแสไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่กรณีที่ 1 มีกระแสไฟฟ้าเฉพาะค่าบวกเท่านั้นเนื่องจากกรณีรถไฟทำงานในโหมดเร่งกระแสไฟฟ้าที่รถไฟจะมีค่าเป็นบวกโดยมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่เท่ากับ 3871 A และ 3814 A ที่รถไฟขบวนที่ 7 และ 17 ตามลำดับ สูงกว่าช่วงเวลาเร่งด่วน ค่ากระแสไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่จะมีค่าเป็นลบเมื่อทำงานในโหมดเบรกจ่ายคืนพลังงาน ค่ากระแสไฟฟ้านั้นจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการซิงโครไนซ์ของการเร่งและเบรกของรถไฟ เมื่อค่ากระแสไฟฟ้านั้นมีความหมายว่าสามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนได้สูงเช่นเดียวกันจะเห็นว่ากรณีที่ 3 และ 4 มีลักษณะใกล้เคียงกันโดยมีค่ากระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่กรณีที่ 3 มีค่ากระแสไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ -3563 A ที่รถไฟขบวนที่ 17 โดยช่วงเวลาไม่เร่งด่วนนั้นมีจำนวนรถไฟที่วิ่งพร้อมกันน้อยกว่าช่วงเวลาเร่งด่วนทำให้เวลาที่รถไฟเร่งและเบรกซิงโครไนซ์กันต่ำกว่าส่งผลให้กำลังไฟฟ้าลบ และกระแสไฟฟ้านั้นมีค่าสูงกว่าช่วงเวลาเร่งด่วน ลักษณะกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของรถไฟที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟคันที่เหลือในระบบมีลักษณะเหมือนกัน แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่อเวลา กระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่อเวลา และกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่อเวลาในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.29 – 5.31



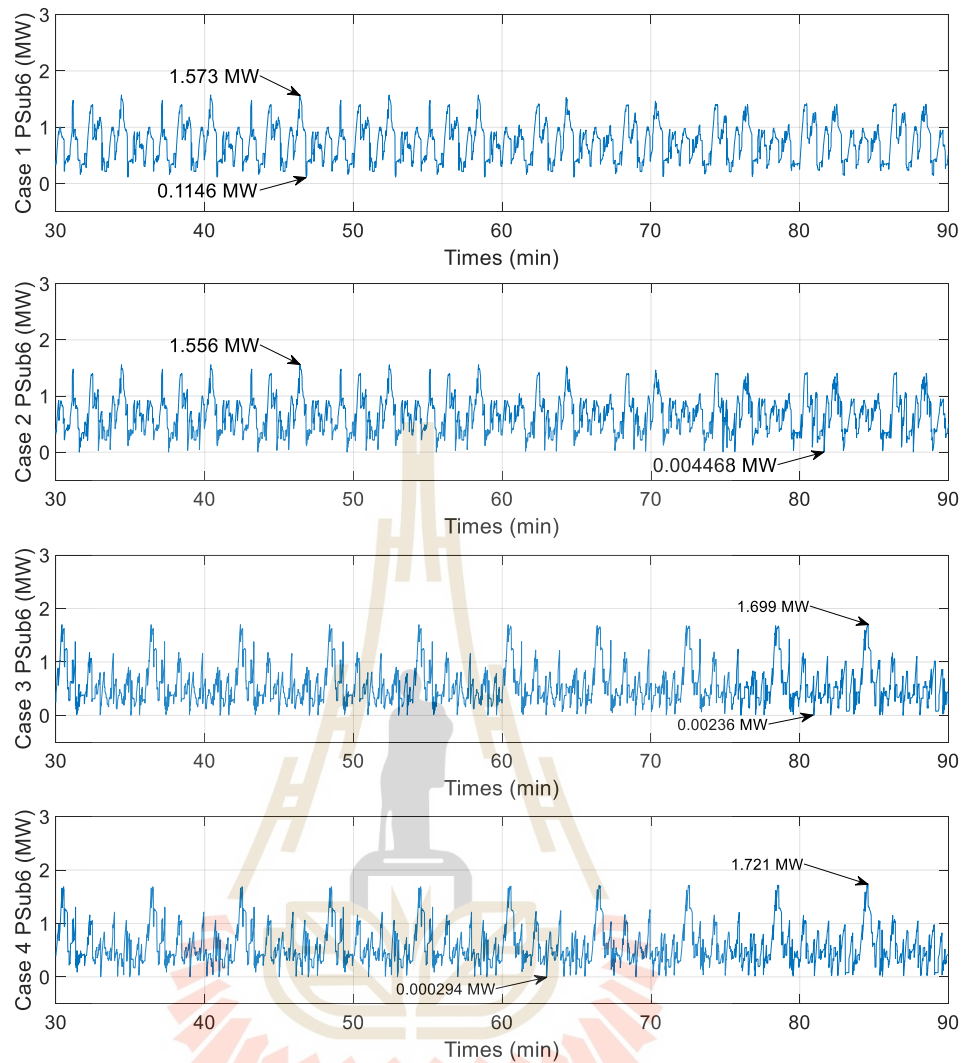
รูปที่ 5.29 แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

จากรูปที่ 5.29 แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 มีค่าต่ำสุดที่กรณีที่ 4 โดยมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 756.6 V โดยมีแรงดันตกเท่ากับ 33.4 V แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีค่าแรงดันตกสูงเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่ง และตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนอยู่ห่างจากตำแหน่งที่รถไฟฟ้าเร่ง แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีค่าสูงเมื่อเกิดการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟฟ้า หรือช่วยลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีที่ 1 แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 788.1 V กรณีที่เหลือที่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสูงสุดที่ 790 V จากรูปที่ 5.25 กรณีที่มีช่วงเวลาที่แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเฉลี่ยสูงที่สุดคือกรณีที่ 3 แต่ก็มีแรงดันตกสูงกว่ากรณีที่ 1 และ 2 เนื่องจากหลังจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดเกิดการปรับช่วงเวลากการวิ่งของรถไฟฟ้าทำให้เกิดการเร่งของรถไฟฟ้าพร้อมกันหลายขบวน ช่วงเวลาไม่เร่งด่วนจะมีแรงดันตกของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนน้อยกว่าช่วงเวลา

เร่งด่วนเนื่องจากมีจำนวนรถไฟฟ้าที่วิ่งพร้อมกันน้อยกว่าส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าช่วงเวลาเร่งด่วน



รูปที่ 5.30 กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาช่วงเวลาไม่เร่งด่วน



รูปที่ 5.31 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขั้วเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

จากรูปที่ 5.28 และ 5.29 กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขั้วเคลื่อนที่จะมีค่าสูงเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่ง และตำแหน่งของสถานีไฟฟ้าขั้วเคลื่อนที่กับตำแหน่งที่รถไฟเร่งอยู่ห่างกันมาก กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขั้วเคลื่อนที่จะมีค่าต่ำเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรกจ่ายคืนพลังงาน กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขั้วเคลื่อนที่ 6 กรณีที่ 3 และ 4 เป็นกรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO และ GA นอกช่วงเวลาเร่งด่วน มีค่าสูงกว่ากรณีที่ 1 และ 2 เนื่องจากหลังจากจัดตารางเหมาะสมที่สุดแล้วมีรถไฟฟ้าเร่งพร้อมกันหลายขบวนที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยกรณีที่มีกระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขั้วเคลื่อนที่ 6 สูงที่สุด คือกรณีที่ 4 โดยมีค่ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 2267 A และ 1.721 MW ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ 3 มีค่ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของสถานีไฟฟ้าขั้วเคลื่อนที่ 6 ต่ำที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 724.97 A และ 0.56 MW กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของสถานีไฟฟ้าขั้วเคลื่อนที่จะมีค่าต่ำเมื่อมีการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟฟ้าทำให้สามารถลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้า

จากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ ลักษณะแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่เหลื่อมมีลักษณะคล้ายกัน

เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าหลายขบวน กรณีที่ 1 ถึง 4 แสดงดังตารางที่ 5.11 จะเห็นว่ากรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO และ GA ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน หรือกรณีที่ 3 และ 4 สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และสามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟได้สูงกว่ากรณีไม่จัดตารางเวลาที่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน หรือกรณีที่ 2 โดยกรณีที่ลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้สูงสุด คือ กรณีที่ 3 กรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน โดยสามารถลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ 18.069% และสามารถนำพลังงานเบรกจ่ายคืนแบ่งปันระหว่างรถไฟได้สูงสุดที่ 78.208%

ตารางที่ 5.11 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากรณีต่าง ๆ ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

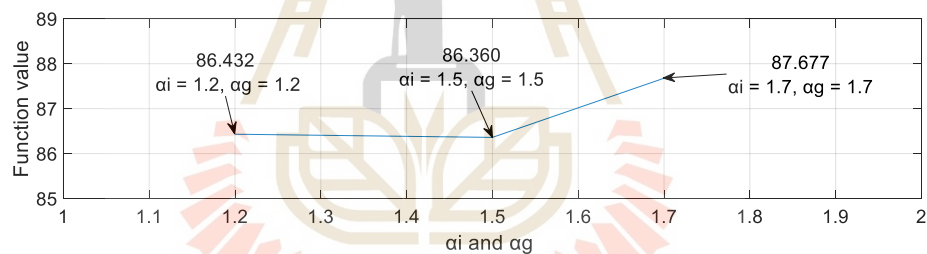
Timetable	Case	$E_{sub,cons}$ (MWh)	$E_{train,cons}$ (MWh)	$E_{brake,cons}$ (MWh)	$E_{reg,cons}$ (MWh)	$E_{loss,line}$ (MWh)	TT (min)	E_{reg} (%)	E_{save} (%)
Before	1	5.393	5.348	0	0	0.045	24	0	0
	2	5.021	5.348	1.369	0.375	0.048	24	27.392	6.950
After	3	4.375	5.292	1.234	0.965	0.048	25.59	78.208	18.069
	4	4.451	5.291	1.220	0.888	0.048	26.01	72.745	16.627



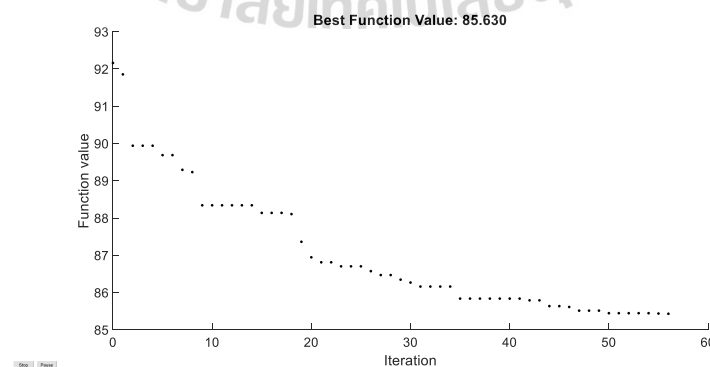
5.3.3 นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

มีระยะเวลาระหว่างรถไฟฟ้ายูที่ 8 นาที และมีมวลผู้โดยสารเฉลี่ยชนิด AW1 หมายถึงสถานการณ์ผู้โดยสารนั่งเต็มทุกที่นั่ง

ทำการปรับค่า α_i และ α_g โดยการสุ่มเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO สำหรับจัดตารางเวลารถไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาเร่งด่วน สุ่มทั้งหมด 3 รอบ รอบที่ 1 ให้ค่า α_i เท่ากับ 1.2 และ α_g เท่ากับ 1.2 รอบที่ 2 ให้ค่า α_i เท่ากับ 1.7 และ α_g เท่ากับ 1.7 และรอบที่ 3 ให้ค่า α_i เท่ากับ 1.5 และ α_g เท่ากับ 1.5 ผลการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยใช้ค่า α_i และ α_g ทั้ง 3 รอบ แสดงดังรูปที่ 5.32 ค่า α_i และ α_g เท่ากับ 1.5 ได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 86.360 ดังนั้นการจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วนจะใช้ค่า α_i เท่ากับ 1.5 และ α_g เท่ากับ 1.5 ในการหาจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด 30 รอบ มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการหาอัตราส่วนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนน้อยที่สุดด้วยวิธี PSO นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน แสดงดังรูปที่ 5.33 และผลการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตารางเวลารถไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนอกช่วงเวลาเร่งด่วนด้วยวิธี PSO แสดงดังตารางที่ 5.12



รูปที่ 5.32 ผลการปรับ α_i และ α_g นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน



รูปที่ 5.33 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีจัดตารางเวลารถไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

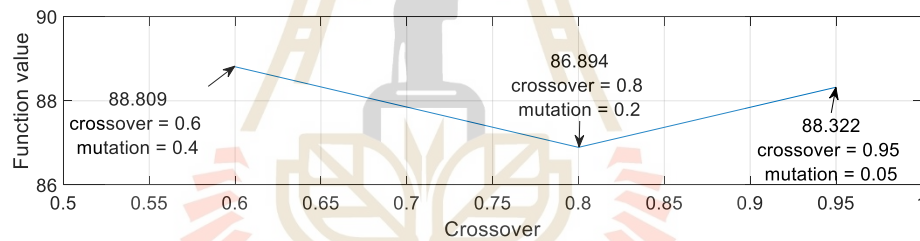
ตารางที่ 5.12 ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน ด้วยวิธี PSO

Track up				Track down			
Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)	Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)
W1	0	0	0	S12	0	0	0
CEN	44	60	45	S11	77	101	45
S1	32	146	43	S10	65	71	34
S2	29	184	20	S9	70	82	23
S3	30	132	41	S8	64	77	20
S5	30	153	22	S7	60	67	23
S6	46	78	43	S6	80	81	20
S7	72	84	21	S5	45	79	45
S8	60	67	27	S3	28	163	21
S9	63	78	20	S2	30	132	21
S10	65	85	21	S1	29	184	30
S11	66	70	21	CEN	33	143	21
S12	80	101	32	W1	45	59	38
Objective value (%)				85.630			
Energy substations consumption (MWh)				3.224			
Energy trains consumption (MWh)				3.740			
Energy loss line consumption (MWh)				0.025			
Mean				86.493			
SD				0.495			
CV (%)				0.572			

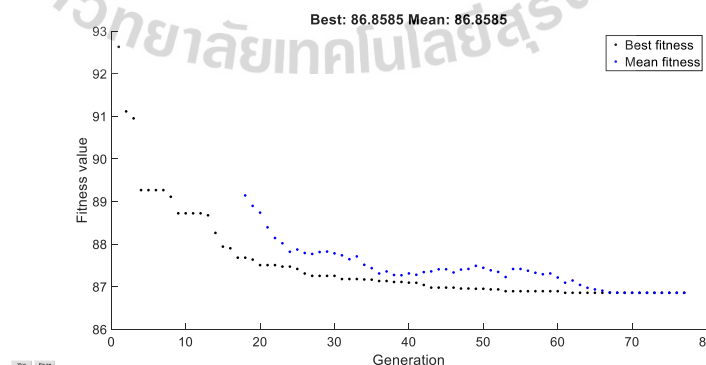
จากตารางที่ 5.12 มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งเป็นอัตราส่วนพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับพลังงานที่รถไฟไฟฟ้าใช้ร่วมกับพลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุดเท่ากับ 85.630 % ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีการกระจายตัวของข้อมูล หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.495 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนเท่ากับ 0.572% ตามมาตรฐานการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันน้อยกว่า 5% ถือว่ายอมรับได้ ที่ขาไปสถานีรับส่งผู้โดยสาร CEN, S1, S2, S7, S9, S10 และ S11 มีความเร็วจำกัดต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกรณีก่อนจัดตารางเวลาเท่ากับ 2 km/h, 3 km/h, 1 km/h, 8 km/h, 7 km/h, 5 km/h และ 4 km/h ตามลำดับ มีเวลาหยุดของรถไฟไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารต่ำสุดเท่ากับ 20 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S1 และ S9 มีเวลาหยุดของรถไฟไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารสูงสุดที่ 45 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร CEN ที่ขากลับสถานีรับส่งผู้โดยสาร S11, S10, S8, S5, S3, S1, CEN และ W1 มีความเร็วจำกัดต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกรณีก่อนจัดตารางเวลาเท่ากับ 3 km/h, 5 km/h, 6 km/h, 1 km/h, 2 km/h, 1 km/h, 2 km/h และ 1 km/h ตามลำดับ มีเวลาหยุดของรถไฟไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารต่ำสุดเท่ากับ 20 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S8 และมีเวลาหยุดของรถไฟไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารสูงสุดเท่ากับ 45 วินาที ที่สถานีรับส่ง

ผู้โดยสาร S11 เมื่อความเร็วจำกัดระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสารมีค่าต่ำกว่ากรณีก่อนจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดส่งผลให้ระยะเวลาวิ่งระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสาร และเวลาหยุดของรถไฟไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารมีค่าเปลี่ยนไปจะส่งผลต่อตารางเวลาการวิ่งของรถไฟไฟฟ้า

ทำการปรับค่า crossover และ mutation โดยการสุ่มเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA สำหรับจัดตารางเวลารถไฟไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน สุ่มทั้งหมด 3 รอบ รอบที่ 1 มีค่า crossover เท่ากับ 0.6 และ mutation เท่ากับ 0.4 รอบที่ 2 มีค่า crossover เท่ากับ 0.95 และ mutation = 0.05 และรอบที่ 3 มีค่า crossover เท่ากับ 0.8 และ mutation เท่ากับ 0.2 ผลการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยใช้ค่า crossover และ mutation ทั้ง 3 รอบ แสดงดังรูปที่ 5.34 ค่า crossover และ mutation เท่ากับ 0.8 และ 0.2 ตามลำดับ ได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 86.894 ดังนั้นการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วนจะใช้ค่า crossover เท่ากับ 0.8 และ mutation เท่ากับ 0.2 ในการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด 30 รอบ มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการหาอัตราส่วนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนน้อยที่สุดด้วยวิธี GA นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.35 และผลการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตารางเวลารถไฟไฟฟ้าเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วนด้วยวิธี GA แสดงดังตารางที่ 5.13



รูปที่ 5.34 ผลการปรับ crossover และ mutation นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน



รูปที่ 5.35 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีจัดตารางเวลารถไฟเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

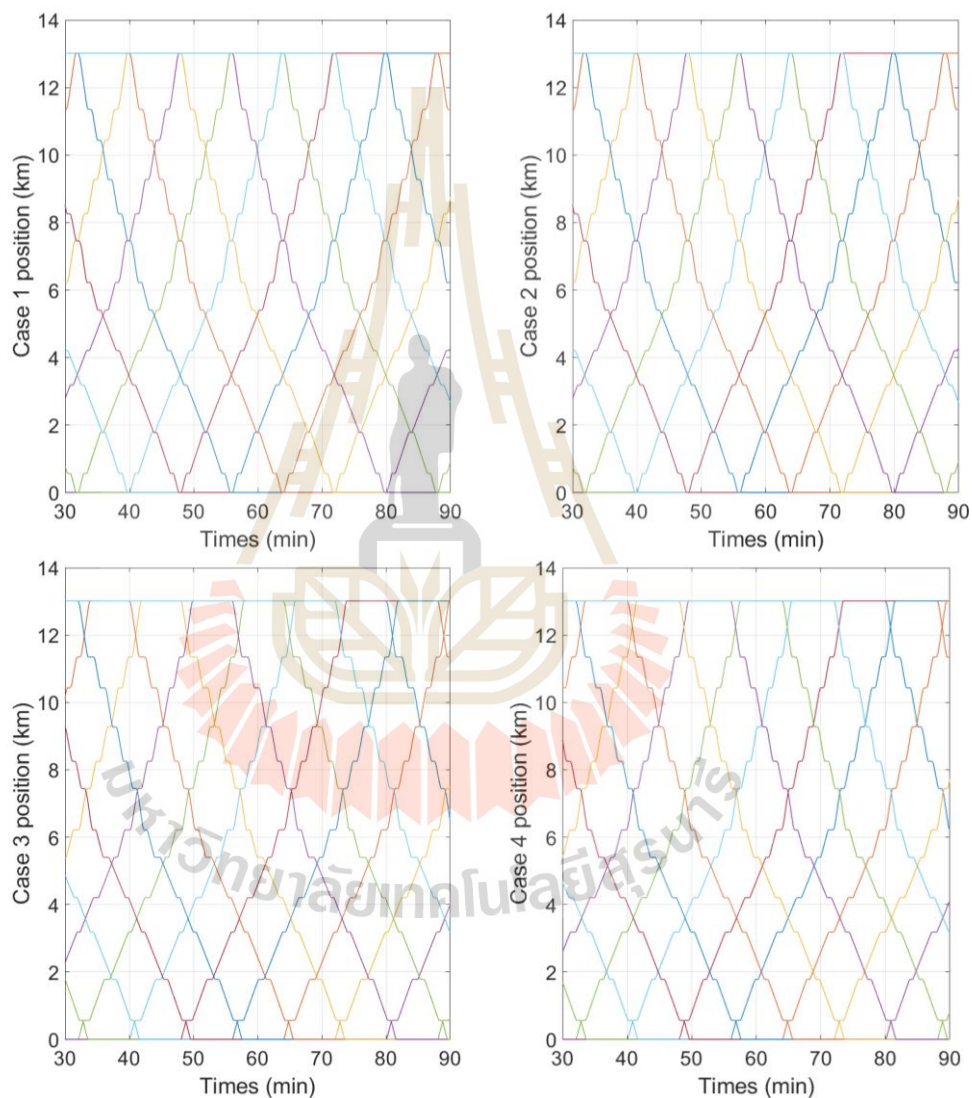
ตารางที่ 5.13 ผลการจัดตารางเวลาเหมาะที่สุดนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน ด้วยวิธี GA

Track up				Track down			
Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)	Station code	Speed limit (km/h)	Arrive time (s)	Dwell time (s)
W1	0	0	0	S12	0	0	0
CEN	43	61	30	S11	78	102	27
S1	33	143	21	S10	66	70	27
S2	29	184	41	S9	68	83	21
S3	28	140	38	S8	70	74	27
S5	29	158	20	S7	58	69	21
S6	44	81	38	S6	77	82	20
S7	80	81	20	S5	42	83	37
S8	60	67	22	S3	28	163	33
S9	70	74	22	S2	28	140	27
S10	66	84	20	S1	30	178	26
S11	65	71	20	CEN	32	146	30
S12	75	104	36	W1	42	62	33
Objective value (%)				86.859			
Energy substations consumption (MWh)				3.261			
Energy trains consumption (MWh)				3.729			
Energy loss line consumption (MWh)				0.025			
Mean				87.677			
SD				0.601			
CV (%)				0.686			

จากตารางที่ 5.13 มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งเป็นอัตราส่วนพลังงานที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับพลังงานที่รถไฟไฟฟ้าใช้ร่วมกับพลังงานสูญเสียในระบบต่ำที่สุดเท่ากับ 86.859 % ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีการกระจายตัวของข้อมูล หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.601 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนเท่ากับ 0.686% ตามมาตรฐานการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันน้อยกว่า 5% ถือว่ายอมรับได้ ที่ขาไปสถานีรับส่งผู้โดยสาร CEN, S1, S2, S3, S5, S6, S10, S11 และ S12 มีความเร็วจำกัดต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกรณีก่อนจัดตารางเวลาเท่ากับ 3 km/h, 2 km/h, 1 km/h, 2 km/h, 1 km/h, 2 km/h, 4 km/h, 5 km/h และ 5 km/h ตามลำดับ มีเวลาหยุดของรถไฟไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารต่ำสุดเท่ากับ 20 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S5, S7, S10 และ S11 มีเวลาหยุดของรถไฟไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารสูงสุดที่ 41 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S2 ที่ขากลับสถานีรับส่งผู้โดยสาร S11 ถึง W1 มีความเร็วจำกัดต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกรณีก่อนจัดตารางเวลากว่าสถานีผู้รับส่งโดยสาร S8 และ S1 โดยมีค่าเท่ากับ 2 km/h, 4 km/h, 2 km/h, 2 km/h, 3 km/h, 4 km/h, 2 km/h, 2 km/h, 3 km/h และ 4 km/h ตามลำดับ มีเวลาหยุดของรถไฟไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารต่ำสุดเท่ากับ 20 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S9 และมีเวลา

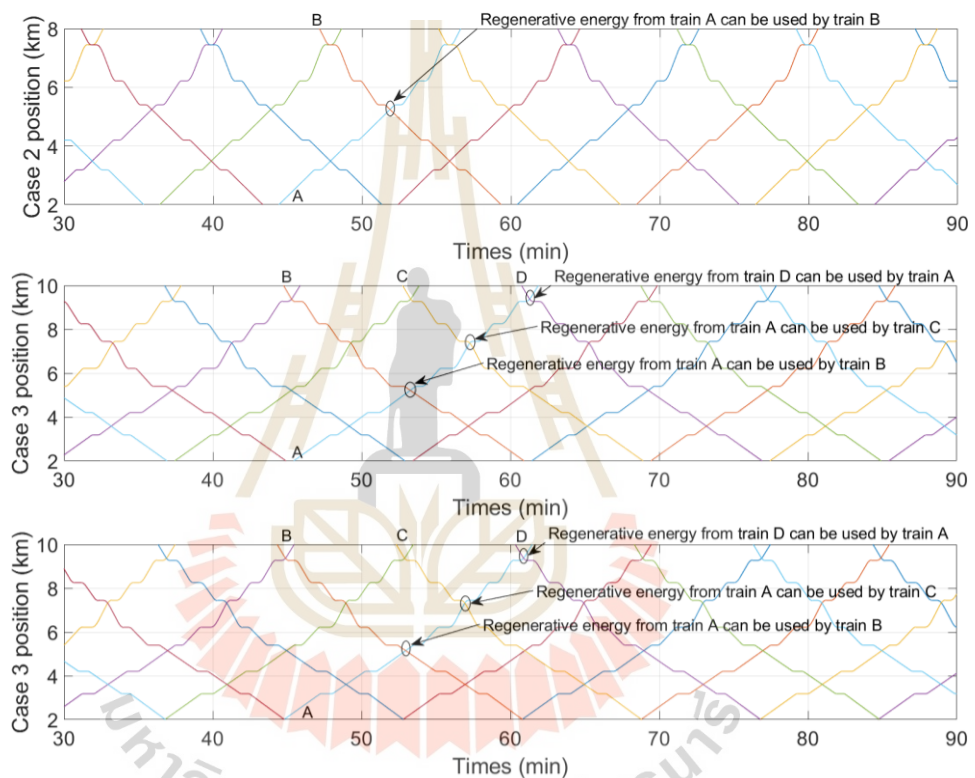
หยุดของรถไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารสูงสุดเท่ากับ 37 วินาที ที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร S5 เมื่อความเร็วจำกัดระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสารมีค่าต่ำกว่ากรณีก่อนจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดส่งผลให้ระยะเวลาวิ่งระหว่างสถานีรับส่งผู้โดยสาร และเวลาหยุดของรถไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสารมีค่าเปลี่ยนไปจะส่งผลต่อตารางเวลาการวิ่งของรถไฟฟ้า

มีตำแหน่งรถไฟฟ้าต่อเวลานอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.36 ในช่วงเวลาเดียวกันมีขบวนรถไฟวิ่งพร้อมกัน 6 ขบวน ประกอบด้วยขาไป 3 ขบวน และขากลับ 3 ขบวน

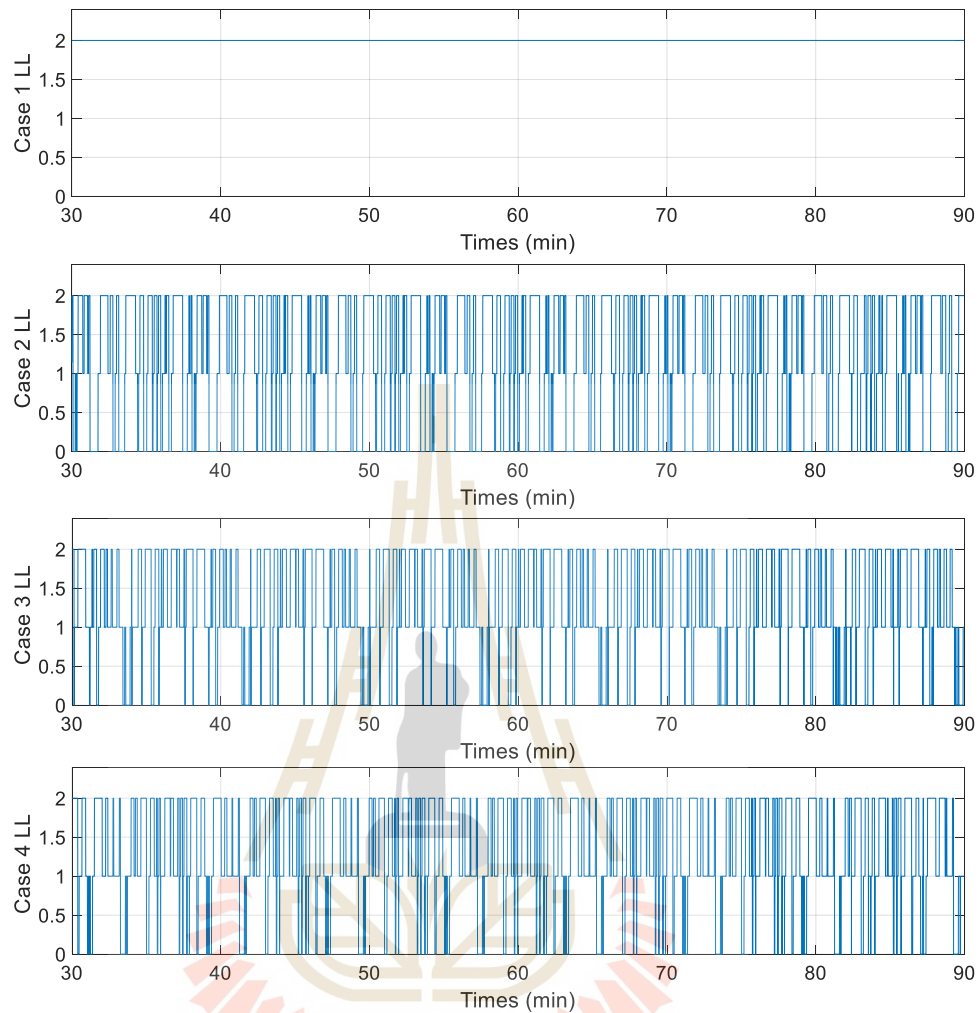


รูปที่ 5.36 ตำแหน่งรถไฟฟ้าต่อเวลานอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

ตัวอย่างตำแหน่งของรถไฟที่สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนได้ต่อเวลาออก
 ช่วงเวลาไม่เร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.37 กรณีที่ 2 เป็นกรณีก่อนจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด โดยรถไฟ
 ขบวน A สามารถแบ่งปันพลังงานได้ช่วงเวลาเดียวโดยสามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนกับ
 รถไฟฟ้าขบวน B เท่านั้น กรณีที่ 3 สามารถเพิ่มช่วงเวลาการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่าง
 รถไฟโดยเพิ่มมาเป็น 3 ช่วงเวลา โดยรถไฟขบวน A สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนให้กับรถไฟ
 ขบวน B และ C และสามารถรับพลังงานเบรกจ่ายคืนจากรถไฟขบวน D ได้ กรณีที่ 4 จะคล้ายกับ
 กรณีที่ 3

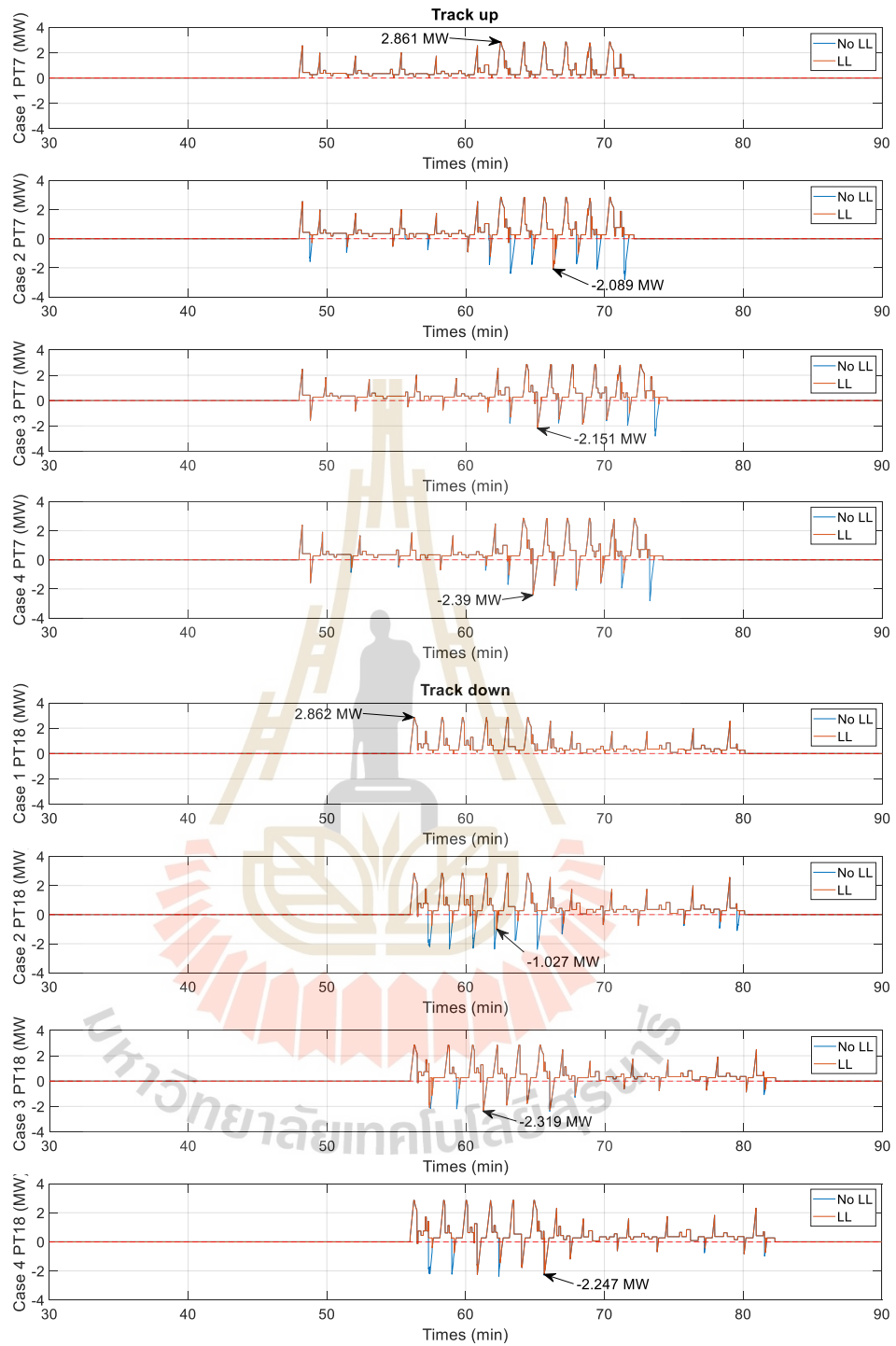


รูปที่ 5.37 ตัวอย่างตำแหน่งรถไฟต่อเวลาที่สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนได้นอกช่วงเวลา
 ไม่เร่งด่วน

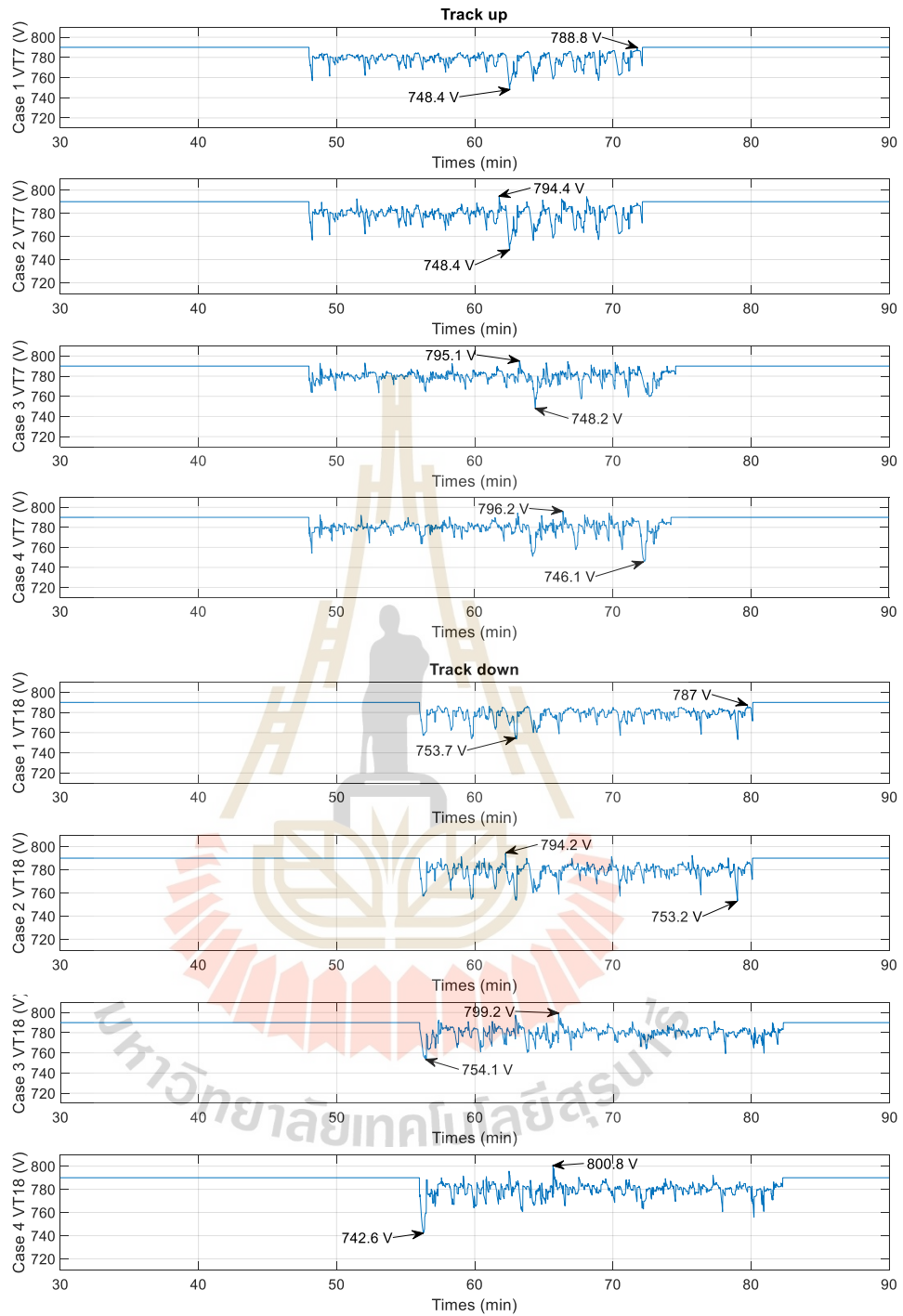


รูปที่ 5.38 ตัวคูณปรับลดพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลานอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

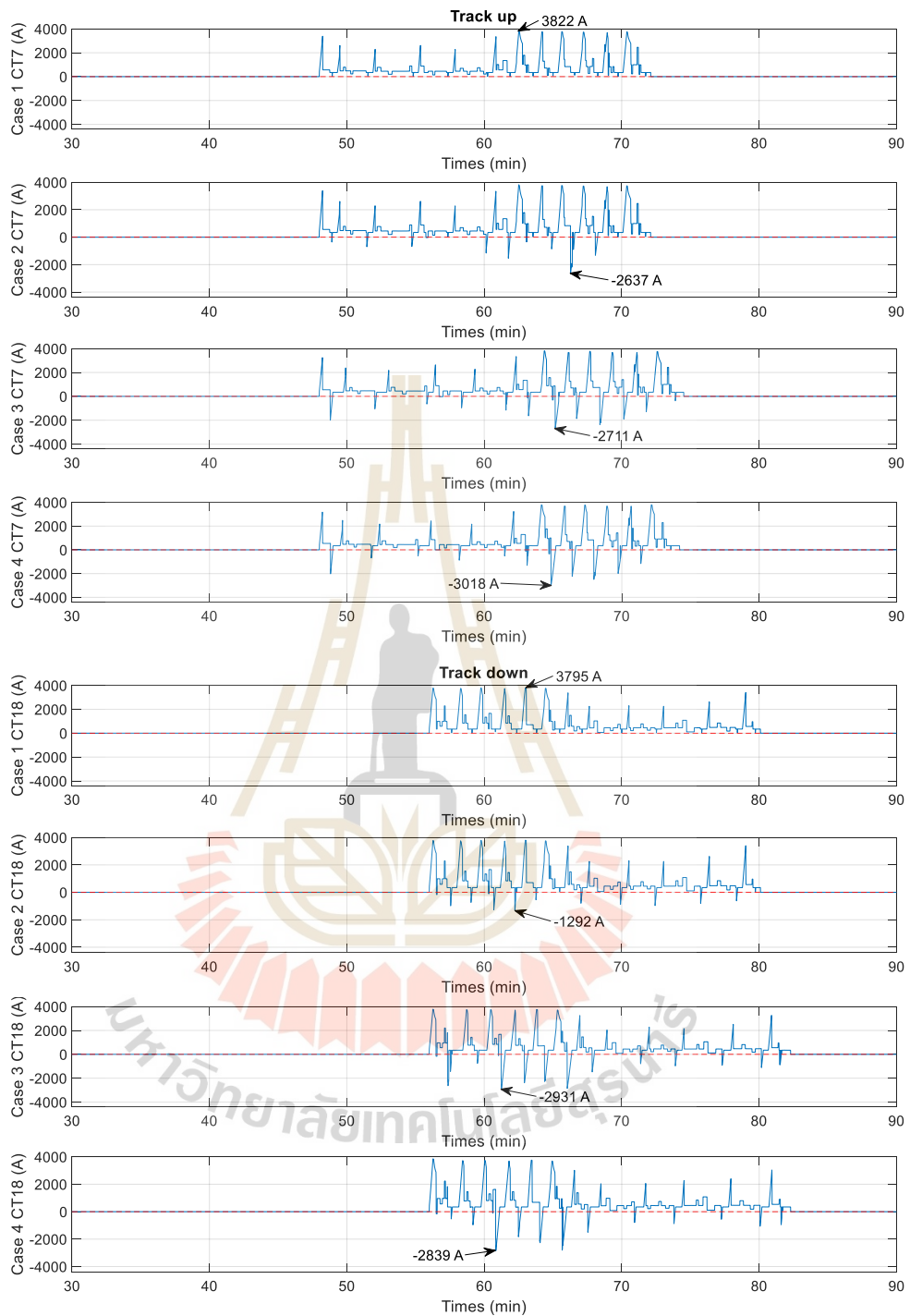
ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลานอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน แสดงดังรูปที่ 5.38 จะเห็นว่ากรณีที่ 1 ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนจะมีค่าเท่ากับ 2 เสมอ เหมือนกับช่วงเวลาเร่งด่วน และช่วงเวลาไม่เร่งด่วน กรณีที่ 2 มีตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนเท่ากับ 0 หลายช่วงเวลาเป็นกรณีก่อนจัดตารางเวลาเหมาะที่ทำให้ช่วงเวลาการเร่งและเบรกของรถไฟฟ้าซึ่งโครโนชันกันต่ำ กรณีที่ 3 และ 4 เป็นการจัดตารางเวลาเหมาะที่สุดช่วยให้ช่วงเวลาที่รถไฟฟ้าเร่งและเบรกซึ่งโครโนชันกันสูงขึ้นส่งผลให้มีช่วงเวลาในตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนเท่ากับ 0 น้อยกว่ากรณีที่ 2 โดยกรณีที่ 3 จะมีช่วงเวลาในตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนเท่ากับ 0 น้อยที่สุด ตัวตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วนมีช่วงเวลาที่มีค่าเท่ากับ 0 มากที่สุดเนื่องจากมีช่วงเวลาเร่ง และเบรกของรถไฟฟ้าที่ซึ่งโครโนชันกันต่ำที่สุด และมีจำนวนรถไฟที่วิ่งพร้อมกันน้อยที่สุดส่งผลให้ช่วงเวลาที่สามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนได้น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับช่วงเวลาเร่งด่วน และช่วงเวลาไม่เร่งด่วน



รูปที่ 5.39 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ใช้ในการเคลื่อนที่ก่อน และหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลานานกว่าไม่เร่งด่วน



รูปที่ 5.40 แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อเวลาออกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

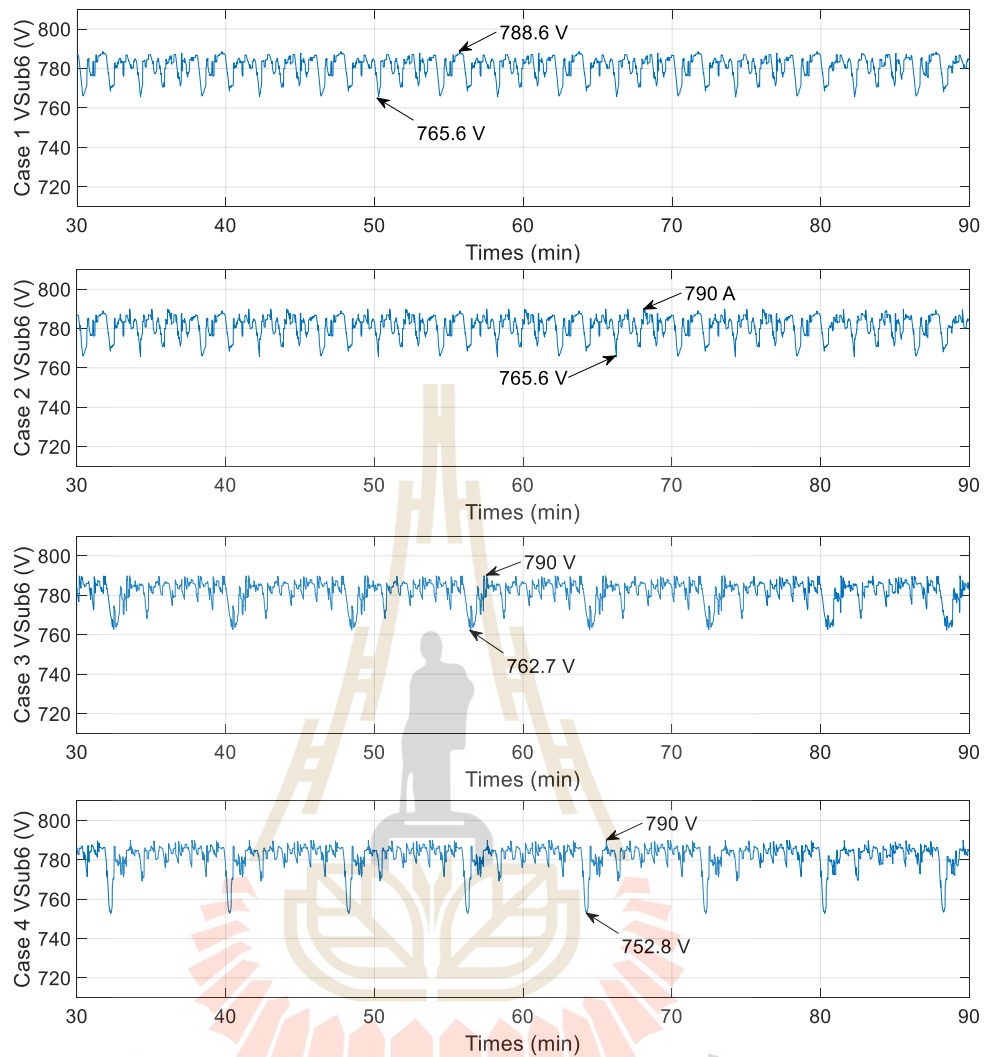


รูปที่ 5.41 กระแสไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อเวลานอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

กำลังไฟฟ้าก่อนและหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่อเวลา แรงดันไฟฟ้าต่อเวลา และกระแสไฟฟ้าต่อเวลาที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ใช้ในการเคลื่อนที่นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.39 - 5.41 จากรูปที่ 5.39 กรณีที่ 1 จะเหมือนกับช่วงเวลาเร่งด่วน และช่วงเวลาไม่เร่งด่วน โดยมีเฉพาะกำลังไฟฟ้าที่เป็นค่าบวกเท่านั้นไม่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 2.861 MW และ 2.862 MW ที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ตามลำดับ กรณีที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนจะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าก่อนคูณปรับเนื่องจากช่วงเวลาการเร่งและเบรกของรถไฟฟ้าที่ซิงโครไนซ์กันต่ำโดยมีค่ากำลังไฟฟ้าลบสูงสุดเท่ากับ -2.089 MW และ -1.027 MW ที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ตามลำดับ กรณีที่ 3 มีค่ากำลังไฟฟ้าหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ต่ำที่สุดที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 18 โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ -2.319 MW กรณีที่ 4 มีค่ากำลังไฟฟ้าหลังตรวจสอบการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนต่ำที่สุดที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ -2.39 MW ที่สถานีรับส่งผู้โดยสารใด ๆ ที่กำลังไฟฟ้าลบถ้ามีค่าต่ำมาก ๆ จะสามารถแบ่งปันพลังงานการเบรกจ่ายคืนให้กับรถไฟฟ้าที่กำลังเร่งในระบบได้สูงในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนั้น ๆ

จากรูปที่ 5.40 แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่กรณีที่ 1 จะมีแรงดันสูงสุดไม่เกินแรงดันไรโหลด หรือ 790 V มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 748.4 V และ 753.7 V ที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ตามลำดับ กรณีที่เหลือเป็นจะพิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนโดยมีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันไรโหลดในช่วงแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟฟ้า กรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด คือ กรณีที่ 4 มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 797.1 V และ 800.8 V ที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ตามลำดับ และเป็นกรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 746.1 V และ 742.6 V รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ตามลำดับ

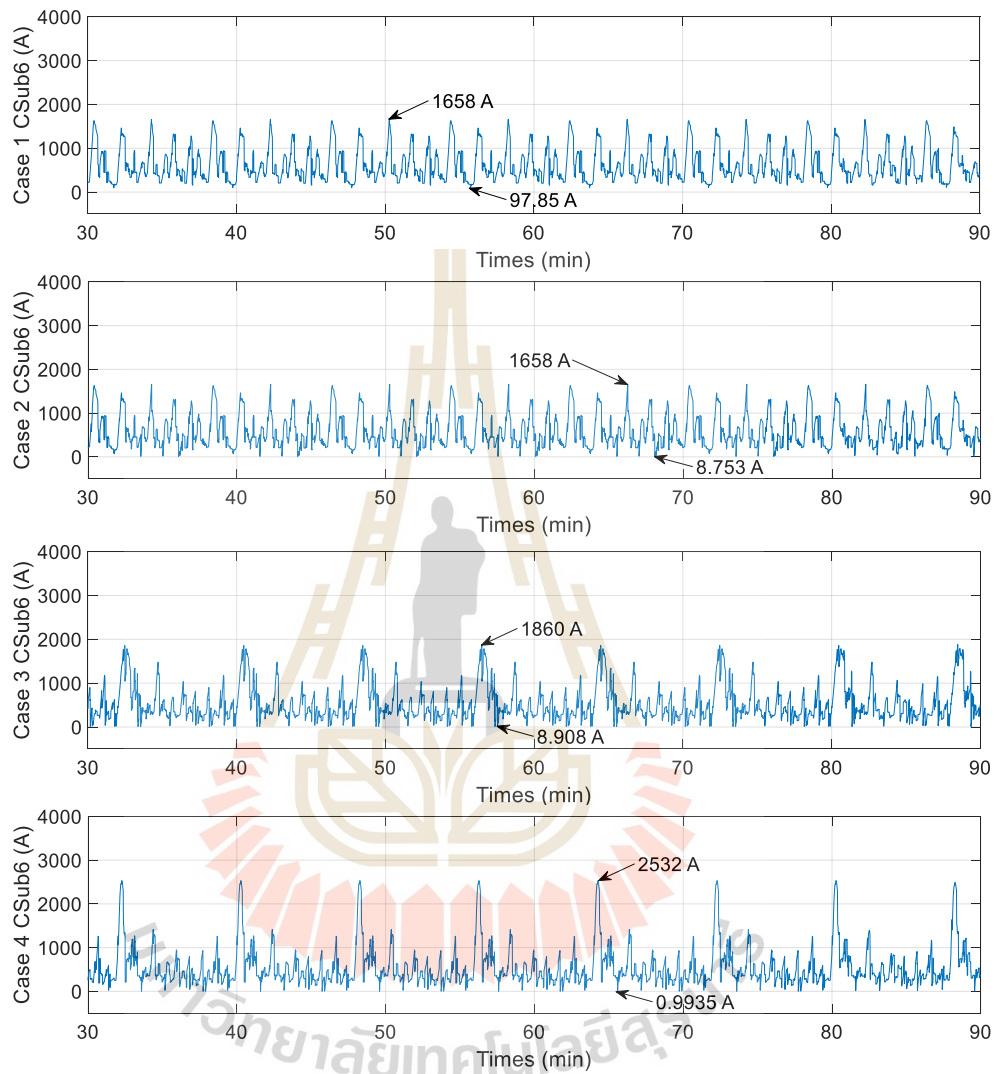
จากรูปที่ 5.41 กระแสไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่กรณีที่ 1 จะมีกระแสเฉพาะค่าบวกเท่านั้นเนื่องจากกรณีรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่งค่ากระแสไฟฟ้าที่รถไฟจะมีค่าเป็นบวกเหมือนช่วงเวลาเร่งด่วน และช่วงเวลาไม่เร่งด่วน โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 3822 A และ 3795 A ที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 และ 18 ตามลำดับ ค่ากระแสไฟฟ้าที่รถไฟจะมีค่าเป็นลบเมื่อทำงานในโหมดเบรกจ่ายคืนพลังงาน ค่ากระแสไฟฟ้าลบที่รถไฟจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการซิงโครไนซ์ของการเร่งและเบรกของรถไฟฟ้าเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าลบมีค่าต่ำนั้นหมายความว่าสามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนได้สูงเช่นเดียวกัน จะเห็นว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่รถไฟกรณีที่ 3 และ 4 นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วนมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่กรณีที่ 3 มีค่ากระแสไฟฟ้าลบต่ำสุดเท่ากับ -2931 A ที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 18 กรณีที่ 4 มีค่ากระแสไฟฟ้าลบต่ำสุดเท่ากับ -3018 A ที่รถไฟฟ้าขบวนที่ 7 นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน จะมีขบวนรถไฟฟ้าวิ่งพร้อมกันน้อยที่สุดส่งผลให้ช่วงเวลาเวลาที่รถไฟเร่งและเบรกซิงโครไนซ์กันต่ำที่สุดทำให้ค่ากำลังไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าลบที่รถไฟมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับช่วงเวลาเร่งด่วน และช่วงเวลาไม่เร่งด่วน แต่แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของรถไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุด ลักษณะกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าคันที่เหลือในระบบมีลักษณะเหมือนกัน แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่อเวลา กระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่อเวลา และกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่อเวลาออกช่วงเวลาเร่งด่วนแสดงดังรูปที่ 5.42 - 5.44



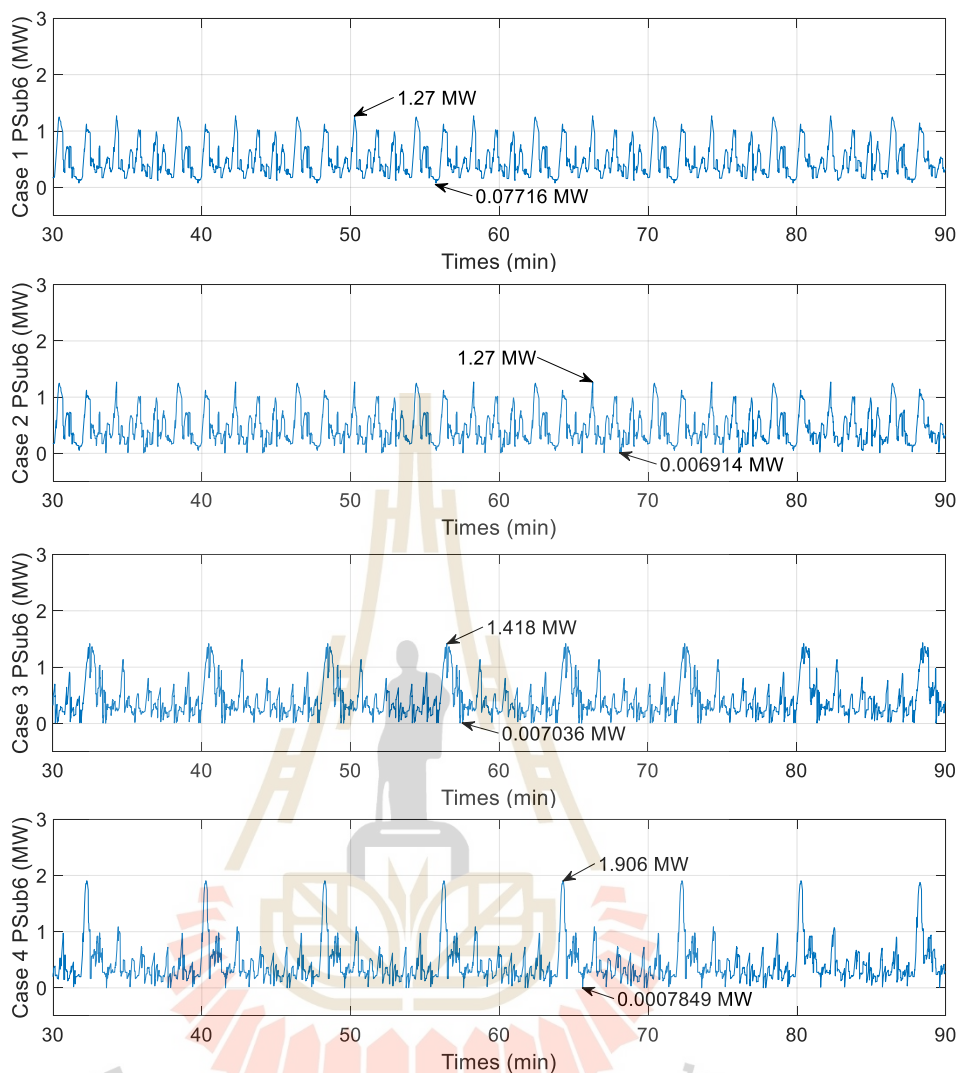
รูปที่ 5.42 แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาออกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 มีค่าต่ำสุดที่กรณีที่ 4 มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 752.8 V โดยมีแรงดันตกเท่ากับ 37.2 V แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีค่าแรงดันตกสูงเมื่อรถไฟทำงานในโหมดเร่ง และตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนอยู่ห่างจากตำแหน่งที่รถไฟไฟฟ้าเร่ง แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีค่าสูงเมื่อเกิดการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟหรือช่วยลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีที่ 1 มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 788.6 V กรณีที่เหลือที่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนมีค่าแรงดันที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสูงสุดที่ 790 V จากรูปที่ 5.36 กรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่สุดคือกรณีที่ 3 มีค่าเท่ากับ 781.95 V แต่จะมีแรงดันตกสูงกว่ากรณีที่ 1 และ 2 เนื่องจากเมื่อจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดจะทำให้มีรถไฟไฟฟ้าเร่งพร้อมกันหลายขบวนที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับช่วงเวลาเร่งด่วน และช่วงเวลาไม่เร่งด่วนแรงดันตกที่

สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกรณีก่อนจัดตารางเวลาจะมีแรงดันตกที่น้อยที่สุดเนื่องจากมีจำนวนรถไฟที่วิ่งพร้อมกันน้อยที่สุด และมีช่วงเวลาที่สามารถแบ่งปันพลังงานกันได้น้อยที่สุด



รูปที่ 5.43 กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลานอกช่วงเวลาที่ไม่มีแรงดัน



รูปที่ 5.44 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่อเวลาออกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีค่าสูงเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่ง และตำแหน่งของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกับตำแหน่งที่รถไฟฟ้าเร่งอยู่ห่างกันมาก ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีค่าต่ำเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรกจ่ายคืนพลังงาน กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 กรณีที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาเร่งด่วน และช่วงเวลาไม่เร่งด่วน ค่ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากมีจำนวนรถไฟฟ้าวิ่งพร้อมกันน้อยที่สุด ส่งผลให้สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจ่ายพลังงานน้อยที่สุด กรณีที่ 3 และ 4 มีค่ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูงกว่ากรณีก่อนจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดเนื่องจากจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดแล้วมีรถไฟเร่งพร้อมกันหลายขบวนที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน กรณีที่ 3 มีค่ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 ต่ำที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 547.55 A และ 0.43 MW กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีค่าต่ำเมื่อ

มีการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟฟ้าเพราะช่วยลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ ลักษณะแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่เหลือมีลักษณะคล้ายกัน

เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าหลายขบวนนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน กรณีที่ 1 ถึง 4 แสดงดังตารางที่ 5.14 จะเห็นว่ากรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO และ GA นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน หรือกรณีที่ 3 และ 4 สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และสามารถแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟได้สูงกว่ากรณีไม่จัดตารางเวลาที่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน หรือกรณีที่ 2 โดยกรณีที่ลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้สูงที่สุด คือ กรณีที่ 3 กรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน โดยสามารถลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ 14.370% และสามารถนำพลังงานเบรกจ่ายคืนแบ่งปันระหว่างรถไฟได้สูงที่สุดที่ 70.280%

ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟกรณีต่าง ๆ นอกช่วงเวลาเร่งด่วนสุด ๆ

Timetable	Case	$E_{sub,cons}$ (MWh)	$E_{train,cons}$ (MWh)	$E_{brake,cons}$ (MWh)	$E_{reg,cons}$ (MWh)	$E_{loss,line}$ (MWh)	TT (min)	E_{reg} (%)	E_{save} (%)
Before	1	3.699	3.673	0	0	0.026	24	0	0
	2	3.520	3.673	0.830	0.179	0.026	24	21.566	4.839
After	3	3.224	3.740	0.770	0.541	0.025	26	70.280	14.370
	4	3.261	3.729	0.779	0.493	0.025	25.37	63.320	13.141

จากผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในช่วงเวลาเร่งด่วนแสดงดังตารางที่ 5.6 – 5.8 ช่วงเวลาไม่เร่งด่วนแสดงดังตารางที่ 5.9 – 5.11 และนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน แสดงดังตารางที่ 5.12 – 5.14 เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ 2 พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน และกรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO และ GA หรือกรณีที่ 3 และ 4 ในช่วงเวลาต่าง ๆ จะเห็นว่ากรณีที่ 3 และ 4 สามารถลดการจ่ายพลังงานโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้มากกว่ากรณีที่ 2 (ไม่จัดตารางเวลา) และช่วงเวลาที่สามารถนำพลังงานเบรกจ่ายคืนมาแบ่งปันระหว่างรถไฟได้สูงที่สุด คือ ช่วงเวลาเร่งด่วนในกรณีที่ 3 โดยสามารถนำพลังงานเบรกจ่ายคืนมาแบ่งปันระหว่างรถไฟได้สูงที่สุดที่ 93.015% เนื่องจากมีจำนวนรถไฟฟ้าที่วิ่งในช่วงเวลาเดียวกันสูงที่สุดที่ 12 ขบวน ส่งผลให้สามารถเพิ่มช่วงเวลาที่ชาร์จโครโนระหว่าง การเร่งและเบรกของรถไฟฟ้าได้สูงที่สุด ทำให้สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้สูงที่สุดที่ 22.198% และกรณีที่ 3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO เป็นวิธีแก้ปัญหา ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ดีที่สุดจากตารางที่ 5.8, 5.11 และ 5.14 จะเห็นว่า กรณีที่ 3 การจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO จะสามารถนำพลังงานเบรกจ่ายคืนมาแบ่งปันระหว่างรถไฟได้สูงกว่า และลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้สูงกว่ากรณีที่ 4 การจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA

5.4 สรุป

บทนี้นำเสนอพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง และผลการจำลองการเคลื่อนของรถไฟฟ้า BTS สายสีลมแบบหลายขบวน กรณีที่ 1 ไม่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรก กรณีที่ 2 พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนโดยแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนให้กับรถไฟฟ้าที่เร่งในระบบ กรณีที่ 3 และ 4 พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืนร่วมกับการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO และ GA พบว่ากรณีที่นำเสนอสามารถประหยัดพลังงานในระบบรถไฟฟ้าได้ รวมทั้งเสนอกรณีศึกษาช่วงเวลาการจำลองที่แตกต่างกัน จากผลการจำลองพบว่ากรณีที่ 3 การจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดในช่วงเวลาเร่งด่วนด้วยวิธี PSO สามารถนำพลังงานเบรกจ่ายคืนมาแบ่งปันระหว่างรถไฟฟ้าได้สูงที่สุด และสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้สูงที่สุด



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอวิธีการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานในรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรง โดยสร้างแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรงแบบตัวนำเดี่ยวที่นำพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกมาช่วยแบ่งปันพลังงานให้กับรถไฟฟ้าที่กำลังเร่งในระบบร่วมกับการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด เพื่อเพิ่มการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนที่ได้จากการเบรกและลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ด้วยโปรแกรม MATLAB กรณีศึกษา รถไฟฟ้า BTS สายสีลม หรือ รถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ 6 รอบพระชนมพรรษาสาย 2 แบบหลายขบวน โดยเปรียบเทียบการจำลอง 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาเร่งด่วน ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน และนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน โดยแต่ละช่วงเวลาประกอบไปด้วย 4 กรณี ได้แก่ กรณีไม่พิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน กรณีพิจารณาพลังงานเบรกจ่ายคืน กรณีการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Particle swarm optimization และกรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Genetic algorithm และเปรียบเทียบวิธีในการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดเพื่อลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน จากผลการจำลองพบว่ากรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดสามารถลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้สูงที่สุดในทุกช่วงเวลา โดยในช่วงเวลาเร่งด่วนสามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้สูงที่สุดที่กรณีจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Particle swarm optimization โดยสามารถเพิ่มช่วงเวลาชิงโครโนระหว่างรถไฟเร่งและเบรกได้สูงที่สุด และสามารถนำพลังงานเบรกจ่ายคืนมาแบ่งปันระหว่างรถไฟได้สูงถึง 93.015% ส่งผลให้สามารถลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้สูงถึง 22.198% เมื่อเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่รวมกับพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากตัวต้านทานตัวนำไฟฟ้ารางที่สาม โดยวิธีการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Particle swarm optimization เป็นวิธีที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยไม่พิจารณาโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยของรถไฟฟ้า ซึ่งในความเป็นจริงนั้นรถไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ด้วยโหมดความเฉื่อย ดังนั้น การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าให้เหมือนกับระบบจริงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ด้วยโหมดความเฉื่อย และวิทยานิพนธ์เล่มนี้ไม่พิจารณาความคลาดเคลื่อนเวลาหยุดของรถไฟฟ้าที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร ในการดำเนินงานจริง ถ้าเวลาจอดของรถไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีความคลาดเคลื่อนอาจส่งผลต่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และการแบ่งปันพลังงานเบรกจ่ายคืนระหว่างรถไฟฟ้า



รายการอ้างอิง

- ฉันทชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2550). เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ฉันทชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2561). ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์. (2560). กลยุทธ์การตัดค้อยอดสำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บ ประจุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.
- นัชพร สุตพรหม. (2562). การหาดำแหน่งและขนาดเหมาะที่สุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบบริมทาง สำหรับรถไฟฟ้่ากระแสตรงหนึ่งขบวน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.
- Kampeerawat, W., & Koseki T. (2017). 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.
- Kulworawanichpong, T. (2015). Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method. **Journal of Transportation** 23. Pp. 241-251.
- Yang, Z., Yang, Z., Lin, F., Xia, H., & Li, X. (2016). Adjustment of metro train operation curve for efficiently using regenerative energy. **IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. pp. 3806-3811.
- Wang, Y., Miao, J., & Wei, Yuanfang. (2010). The Research of Traction Motor Energy-Saving Regenerative Braking Control Technology. **2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation**. pp. 930-933.

- Shangguan, W., Wang, J., Wang, H., Wang, J., and Li, S. (2011). The Braking Mode Simulation and Analysis for High-speed Railway. **2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications**. Pp. 683-686
- Scheepmaker, G. M., & Goverde, Rob. M. P. (2016). Energy-efficient train control Including regenerative braking with catenary efficiency. **2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)**.
- Dominguez, M., Cardador, A. F., Cucala, A. P., & Pecharroman, R. R. (2012). Energy Saving in Metropolitan Railway Substations Through Regenerative Energy Recovery and Optimal Design of ATO Speed Profiles. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**. Pp. 496-504.
- Ceraolo, M., Lutzemberger, G., Frilli, A., & Pugi, L. (2016). Regenerative braking in high speed railway applications: Analysis by different simulation tools. **2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)**.
- Tian, Z., Zhang, G., Zhao, N., Hillmansen, S., Tricolo, P., & Roberts C. (2018). Energy Evaluation for DC Railway Systems with Inverting Substations. **2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)**.
- Serafini, P., & Ukovich, W. (1989). A mathematical model for the fixed-time traffic control problem. **European Journal of Operational Research**. pp. 152-165.
- Andersson, E. V., Peterson, A., & Krasemann, J. T. (2013). Quantifying railway timetable robustness in critical points. **Journal of Rail Transport Planning & Management**. pp. 95-110.
- Ding, S., Li, D. (2016). Cyclic train timetabling model for high speed railway. **2016 International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS)**.
- Gorbachev, A., (2020). Model of Hybrid Timetables for High Speed Urban Tramway Movement. **2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)**.

- Tuytens, D., Fei, H., Mezmaz, M., & Jalwan, J. (2013). Simulation-Based Genetic Algorithm towards an Energy-Efficient Railway Traffic Control **Mathematical Problems in Engineering**.
- Nasri, A., Fekri Moghadam, M., & Mokhtari, H. (2010). Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems. **2010 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)**. pp. 1218-1221.
- Pena-Alcaraz, M., Fernandez, A., Cucala, A., Ramos, A., & Pecharroman R. (2012). Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy. **Journal of Rail and Rapid Transit 2012 226**. pp. 397- 408.
- Fournier, D., Mulard, D., & Fages, F. (2012). Energy optimization of metro timetables: a hybrid approach. **The 18th International Conference on Principles and Parctice of Constraint Programming (CP'12)**. pp. 7-12.
- Yanh, X., Li, X., Gao, Z., Wang, H., & Tang, T. (2013). A Cooperative Scheduling Model for Timetable Optimization in Subway Systems. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation System**. pp. 438-447
- Li, X., & Yang, X. (2013). A stochastic timetable optimization model in subway systems. **International Journal of Uncertainty, Fuzziness & Knowledge-Based Systems 21**. pp. 1-15.
- Li, X., & Lo, H. K. (2014). An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations. **Transportation Research Part B 64**. pp. 73-89.
- Lesel, J., Claisse, G., Debay, P., & Robyns, B., (2016). Design of daily energy optimal timetables for metro lines using metaheuristics. **2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)**.
- Zhao, N., Roberts, C., Hillmansen, S., Tian, Z., Weston, P., & Chen, L. (2017). An integrated metro operation optimization to minimize energy consumption. **Transportation Research Part C 75**. Pp. 168-182.
- Bai, Y., Cao, Y., Yu, Z., Ho, T. K., Roberts, C., & Mao, B. (2019). Cooperative Control of Metro Trains to Minimize Net Energy Consumption. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**.

- Elbelkasi, M. S., Badran, E. A., & Abdel-Rahman, H. (2020). Overview of DC and AC Electric Railway Systems Considering Energy Efficiency Enhancement Methods. **Port-Said Engineering Research Journal**. pp. 128-140.
- Oura, Y., Mochinaga, Y., & Nagasawa, H. (1998). Railway Electric Power Feeding Systems. **Japan Railway & Transport Review**. pp. 48-58.
- Park, T. J., Kim, B. J., & Wang, Y. Y. (2002). A Catenary System Analysis for Studying the Dynamic Characteristics of a High-Speed Rail Pantograph. **KSME International Journal**. pp. 436-447.
- Kurdak Burak. (2010). A Single Phase PLL Base Active Power Filter Solution For power Quality Problems in Railway Electrification Systems using Scott Transformer. **Master Thesis Cukurova University Institute of Natural and Applied Sciences**.
- Frey Sheilah. (2012). Railway Electrification Systems & Engineering. **White Word Publications**. First Edition.
- Jimenez-Octavio, J. R., Sanchez-Rebollo, C. S., & Carnicero, A. (2013). The Dependence on Mechanical Design in Railway Electrification: Focusing on the ac Perspective. **IEEE Electrification Magazine**. pp. 4-10.



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person sitting on a throne, surrounded by a decorative archway. The archway is composed of multiple vertical lines of varying heights, creating a stepped effect. The entire logo is rendered in a light beige or gold color.

ภาคผนวก ก.

ผลการจำลองในช่วงเวลาต่าง ๆ
และผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO และ GA

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 ผลการจำลองช่วงเวลาเร่งด่วน

ตารางที่ ก.1 แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาเร่งด่วน

Case		TSS1(V)	TSS2(V)	TSS3(V)	TSS4(V)	TSS5(V)	TSS6(V)	TSS7(V)
1	Max	780.75	777.59	778.47	779.35	780.13	782.71	785.02
	Mean	769.09	765.99	764.61	762.31	762.46	765.08	769.23
	Min	734.81	746.33	746.69	741.70	742.61	733.99	734.72
2	Max	790	785.73	789.23	790	790	790	790
	Mean	771.28	768.55	767.88	766.51	766.70	767.69	771.08
	Min	736.99	749.56	748.50	741.71	743	733.99	735.53
3	Max	790	788.88	789.52	790	790	790	790
	Mean	772.32	769.82	769.80	769.43	769.82	771.83	774.45
	Min	728.59	735.91	743.21	742.43	742.91	741.12	749.89
4	Max	790	790	789.51	789.80	790	790	790
	Mean	772.04	769.29	769.36	769.08	769.45	771.22	773.83
	Min	745.68	741.59	748.08	751.10	749.03	746.27	753.42

ตารางที่ ก.2 กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาเร่งด่วน

Case		TSS1(A)	TSS2(A)	TSS3(A)	TSS4(A)	TSS5(A)	TSS6(A)	TSS7(A)
1	Max	4150	3284	3256	3286	3224	3810	3761
	Mean	1573	1806	1909	1884	1873	1695	1413
	Min	696.89	933.24	866.90	724.83	671.31	495.74	338.91
2	Max	3986	3041	3120	3285	3197	3810	3706
	Mean	1408	1613	1663	1598	1585	1518	1287
	Min	0.88	321.04	58.12	4.93	2.54	1.12	0.77
3	Max	4617	4067	3518	3236	3203	3325	2728
	Mean	1330	1517	1519	1400	1373	1236	1058
	Min	2.48	84.34	35.92	1.01	10.15	0.24	2.45
4	Max	3333	3640	3152	2646	2787	2975	2488
	Mean	1350	1557	1552	1423	1398	1278	1100
	Min	2.07	5.37	36.84	13.56	0.80	2.46	0.46

ตารางที่ ก.3 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในช่วงเวลาเร่งด่วน

Case		TSS1 (MW)	TSS2 (MW)	TSS3 (MW)	TSS4 (MW)	TSS5 (MW)	TSS6 (MW)	TSS7 (MW)
1	Max	3.05	2.45	2.43	2.44	2.39	2.80	2.76
	Mean	1.206	1.381	1.457	1.432	1.424	1.286	1.075
2	Max	2.94	2.28	2.34	2.44	2.38	2.80	2.73
	Mean	1.08	1.24	1.27	1.22	1.21	1.15	0.98
3	Max	3.36	2.99	2.61	2.40	2.38	2.46	2.05
	Mean	1.02	1.16	1.16	1.07	1.05	0.95	0.81
4	Max	2.49	2.70	2.36	1.99	2.09	2.22	1.87
	Mean	1.04	1.19	1.19	1.09	1.07	0.98	0.85

ก.2 ผลการจำลองช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

ตารางที่ ก.4 แรงแดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

Case		TSS1(V)	TSS2(V)	TSS3(V)	TSS4(V)	TSS5(V)	TSS6(V)	TSS7(V)
1	Max	789.90	785.49	784.90	785.28	786.43	787.86	788.40
	Mean	777.77	775.92	775.21	774.14	774.38	775.98	778.33
	Min	752.41	755.58	751.36	747.89	755.04	759.56	760.74
2	Max	789.96	789.71	789.86	790	790	789.96	790
	Mean	778.41	776.63	776.08	775.19	775.77	777.30	779.28
	Min	754.81	755.58	751.36	747.89	755.04	759.90	762.08
3	Max	789.93	787.48	789.70	790	790	790	790
	Mean	779.36	777.76	777.84	777.69	778.08	779.34	780.70
	Min	751.90	760.40	763.36	757.08	759.79	757	753.38
4	Max	789.94	789.68	790	790	789.90	790	790
	Mean	779.25	777.63	777.55	777.18	777.92	779.18	780.63
	Min	754.99	760.30	758.53	752.89	759.55	756.56	754.38

ตารางที่ ก.5 กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

Case		TSS1(A)	TSS2(A)	TSS3(A)	TSS4(A)	TSS5(A)	TSS6(A)	TSS7(A)
1	Max	2826	2588	2906	2865	2378	2071	1991
	Mean	919	1058	1112	1079	1062	954	794
	Min	233.16	338.83	383.20	321.19	242.60	145.42	108.94
2	Max	2646	2588	2906	2865	2378	2047	1899
	Mean	871	1005	1047	1008	968	864	729
	Min	3.13	22.15	10.79	1.79	0.92	2.78	1.90
3	Max	2865	2225	2003	2239	2055	2245	2491
	Mean	799.80	919.95	914.66	837.37	810.89	724.97	632.61
	Min	5.24	189.60	22.61	0.38	1.40	2.99	2.04
4	Max	2632	2233	2366	2525	2071	2275	2423
	Mean	808.27	930.22	936.18	871.97	821.70	735.90	637.72
	Min	4.79	23.98	0.09	1.06	6.53	0.37	0.25

ตารางที่ ก.6 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

Case		TSS1 (MW)	TSS2 (MW)	TSS3 (MW)	TSS4 (MW)	TSS5 (MW)	TSS6 (MW)	TSS7 (MW)
1	Max	2.13	1.96	2.18	2.14	1.80	1.57	1.51
	Mean	0.71	0.82	0.86	0.83	0.82	0.74	0.62
2	Max	2.00	1.96	2.18	2.14	1.80	1.56	1.45
	Mean	0.68	0.78	0.81	0.78	0.75	0.67	0.57
3	Max	2.15	1.70	1.53	1.70	1.56	1.70	1.88
	Mean	0.62	0.71	0.71	0.65	0.63	0.56	0.49
4	Max	1.99	1.70	1.80	1.90	1.57	1.72	1.83
	Mean	0.63	0.72	0.73	0.67	0.64	0.57	0.49

ก.3 ผลการจำลองนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

ตารางที่ ก.7 แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

Case		TSS1(V)	TSS2(V)	TSS3(V)	TSS4(V)	TSS5(V)	TSS6(V)	TSS7(V)
1	Max	786.96	785.53	786.15	786.61	787.64	788.56	788.79
	Mean	781.42	780.17	779.88	779.24	779.63	780.65	782.11
	Min	758.58	766.46	762.24	759.32	765.87	765.62	759.32
2	Max	790	788.06	789.82	790	790	789.87	789.91
	Mean	781.76	780.63	780.37	779.79	780.28	781.10	782.42
	Min	758.58	766.46	762.24	759.32	765.87	765.62	759.32
3	Max	789.90	789.57	790	789.75	789.69	789.87	789.89
	Mean	781.95	781	781.12	781.27	781.58	781.95	783.04
	Min	764.63	765.02	764.07	764.24	767.03	762.35	759.13
4	Max	790	789.90	790	789.94	790	790	90
	Mean	781.99	780.89	781.01	781.15	781.45	781.80	782.88
	Min	755.56	764.03	765.13	766.06	766.40	752.77	745.72

ตารางที่ ก.8 กระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

Case		TSS1(A)	TSS2(A)	TSS3(A)	TSS4(A)	TSS5(A)	TSS6(A)	TSS7(A)
1	Max	2362	1770	2087	2087	1641	1658	2087
	Mean	644.97	738.79	761.06	731.71	705.45	636.01	536.90
	Min	228.43	336.32	289.39	230.48	160.70	97.85	82.38
2	Max	2362	1770	2087	2087	1641	1658	2087
	Mean	619.86	704.31	724.08	694.65	661.03	605.73	515.51
	Min	1.39	145.58	13.47	1.86	2.42	8.75	5.98
3	Max	1908	1878	1950	1752	1562	1881	2100
	Mean	605.60	677	667.96	593.86	572.66	547.55	473.65
	Min	7.37	32.19	0.07	16.85	20.88	8.91	7.22
4	Max	2589	1952	1870	1629	1606	2532	3012
	Mean	602.04	685.20	676.23	602.33	581.69	557.49	484.12
	Min	0.44	7.16	0.23	3.76	0.25	0.99	1.65

ตารางที่ ก.9 กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน

Case		TSS1 (MW)	TSS2 (MW)	TSS3 (MW)	TSS4 (MW)	TSS5 (MW)	TSS6 (MW)	TSS7 (MW)
1	Max	1.79	1.36	1.59	1.58	1.26	1.27	1.58
	Mean	0.50	0.58	0.59	0.57	0.55	0.49	0.42
2	Max	1.79	1.36	1.59	1.58	1.26	1.27	1.58
	Mean	0.48	0.55	0.56	0.54	0.51	0.47	0.40
3	Max	1.46	1.44	1.49	1.34	1.20	1.43	1.59
	Mean	0.47	0.53	0.52	0.46	0.45	0.43	0.37
4	Max	1.96	1.49	1.43	1.25	1.23	1.91	2.25
	Mean	0.47	0.53	0.53	0.47	0.45	0.43	0.37



ก.4 ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ ก.10 ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO ในช่วงเวลาเร่งด่วน 30 รอบ

Iteration	Objective value	$E_{sub,cons}$ (MWh)	$E_{train,cons}$ (MWh)	$E_{brake,cons}$ (MWh)	$E_{reg,cons}$ (MWh)	$E_{loss,line}$ (MWh)	E_{reg} (%)	E_{save} (%)
1	81.828	7.564	9.153	2.161	1.680	0.091	77.724	18.172
2	79.418	7.377	9.196	2.197	1.912	0.092	87.032	20.582
3	81.151	7.481	9.126	2.150	1.737	0.092	80.795	18.849
4	81.568	7.533	9.142	2.159	1.702	0.093	78.821	18.432
5	80.221	7.450	9.189	2.190	1.837	0.097	83.858	19.779
6	77.810	7.186	9.147	2.212	2.048	0.089	92.621	22.190
7	81.746	7.588	9.187	2.183	1.694	0.095	77.622	18.254
8	80.153	7.399	9.138	2.205	1.831	0.093	83.052	19.847
9	81.162	7.433	9.071	2.160	1.725	0.087	79.843	18.838
10	81.443	7.565	9.193	2.193	1.723	0.096	78.545	18.557
11	81.185	7.521	9.168	2.182	1.742	0.096	79.850	18.815
12	80.429	7.508	9.240	2.209	1.827	0.095	82.728	19.571
13	81.691	7.507	9.095	2.145	1.681	0.095	78.385	18.309
14	80.122	7.422	9.169	2.191	1.841	0.094	84.017	19.878
15	81.211	7.537	9.184	2.194	1.744	0.097	79.474	18.789
16	81.399	7.561	9.194	2.202	1.728	0.094	78.479	18.601
17	81.642	7.603	9.219	2.186	1.710	0.093	78.217	18.358
18	80.603	7.525	9.238	2.210	1.811	0.098	81.961	19.397
19	78.855	7.185	9.024	2.129	1.926	0.088	90.464	21.145
20	79.778	7.481	9.278	2.233	1.896	0.099	84.946	20.222
21	81.871	7.602	9.190	2.187	1.683	0.096	76.980	18.129
22	80.377	7.508	9.244	2.215	1.833	0.097	82.724	19.623
23	77.802	7.234	9.210	2.219	2.064	0.088	93.015	22.198
24	78.461	7.363	9.300	2.161	2.021	0.084	93.553	21.539
25	81.658	7.496	9.086	2.125	1.683	0.093	79.227	18.342
26	82.050	7.601	9.173	2.173	1.662	0.091	76.466	17.950
27	80.345	7.502	9.243	2.211	1.835	0.094	82.981	19.655
28	81.471	7.488	9.098	2.149	1.702	0.092	79.227	18.529
29	80.115	7.477	9.233	2.208	1.855	0.100	84.033	19.885
30	78.952	7.373	9.248	2.248	1.966	0.091	87.439	21.048
Mean	80.551	SD	1.221	CV	1.516			

ตารางที่ ก.11 ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ในช่วงเวลาเร่งด่วน 30 รอบ

Iteration	Objective value	$E_{sub,cons}$ (MWh)	$E_{train,cons}$ (MWh)	$E_{brake,cons}$ (MWh)	$E_{reg,cons}$ (MWh)	$E_{loss,line}$ (MWh)	E_{reg} (%)	E_{save} (%)
1	80.921	7.394	9.051	2.176	1.743	0.086	80.087	19.079
2	81.537	7.284	8.850	2.088	1.648	0.084	78.926	18.463
3	80.335	7.326	9.034	2.197	1.794	0.086	81.643	19.665
4	81.980	7.464	9.013	2.100	1.639	0.091	78.051	18.020
5	80.782	7.271	8.916	2.118	1.730	0.084	81.684	19.218
6	81.055	7.278	8.897	2.122	1.701	0.082	80.140	18.945
7	82.799	7.537	9.012	2.090	1.565	0.090	74.867	17.201
8	81.523	7.409	9.003	2.185	1.679	0.085	76.845	18.477
9	80.415	7.363	9.069	2.204	1.793	0.087	81.379	19.585
10	81.318	7.446	9.070	2.196	1.711	0.086	77.900	18.682
11	81.058	7.386	9.027	2.176	1.726	0.084	79.315	18.942
12	80.804	7.352	9.015	2.162	1.747	0.084	80.797	19.196
13	81.555	7.301	8.870	2.101	1.651	0.081	78.556	18.445
14	79.825	7.410	9.192	2.252	1.873	0.091	83.171	20.175
15	81.954	7.415	8.966	2.135	1.633	0.082	76.487	18.046
16	80.895	7.314	8.957	2.142	1.727	0.085	80.627	19.105
17	80.958	7.281	8.909	2.095	1.712	0.085	81.702	19.042
18	83.146	7.364	8.777	2.035	1.492	0.080	73.305	16.854
19	81.405	7.369	8.968	2.169	1.683	0.084	77.605	18.595
20	80.861	7.341	8.994	2.177	1.738	0.085	79.808	19.139
21	82.603	7.529	9.025	2.120	1.586	0.090	74.779	17.397
22	80.715	7.303	8.963	2.152	1.745	0.085	81.102	19.285
23	80.058	7.305	9.038	2.205	1.820	0.087	82.532	19.942
24	81.255	7.461	9.090	2.123	1.721	0.092	81.045	18.745
25	80.410	7.426	9.147	2.236	1.809	0.088	80.935	19.590
26	81.182	7.269	8.871	2.110	1.685	0.083	79.855	18.818
27	81.986	7.538	9.101	2.147	1.655	0.093	77.114	18.014
28	80.912	7.319	8.960	2.145	1.726	0.086	80.481	19.088
29	82.212	7.355	8.865	2.107	1.592	0.082	75.550	17.788
30	80.790	7.354	9.017	2.190	1.749	0.086	79.858	19.210
Mean	81.242	SD	0.785	CV	0.966			

ตารางที่ ก.12 ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 30 รอบ

Iteration	Objective value	$E_{sub,cons}$ (MWh)	$E_{train,cons}$ (MWh)	$E_{brake,cons}$ (MWh)	$E_{reg,cons}$ (MWh)	$E_{loss,line}$ (MWh)	E_{reg} (%)	E_{save} (%)
1	83.422	4.502	5.349	1.260	0.895	0.048	71.015	16.578
2	83.201	4.482	5.340	1.255	0.905	0.047	72.118	16.799
3	81.972	4.433	5.360	1.267	0.975	0.048	76.963	18.028
4	81.943	4.420	5.345	1.270	0.974	0.049	76.687	18.057
5	82.756	4.459	5.340	1.264	0.929	0.048	73.500	17.244
6	84.122	4.603	5.422	1.320	0.869	0.049	65.786	15.878
7	82.715	4.388	5.260	1.215	0.917	0.045	75.466	17.285
8	84.025	4.570	5.393	1.280	0.869	0.047	67.919	15.975
9	83.582	4.534	5.376	1.281	0.890	0.048	69.489	16.418
10	81.931	4.375	5.292	1.234	0.965	0.048	78.208	18.069
11	82.569	4.464	5.358	1.269	0.942	0.048	74.230	17.431
12	83.169	4.520	5.387	1.287	0.915	0.048	71.041	16.831
13	84.422	4.592	5.392	1.278	0.847	0.047	66.280	15.578
14	82.720	4.437	5.318	1.242	0.927	0.047	74.622	17.280
15	83.450	4.469	5.309	1.233	0.886	0.046	71.880	16.550
16	83.301	4.507	5.364	1.276	0.904	0.047	70.829	16.699
17	83.874	4.512	5.333	1.249	0.867	0.046	69.417	16.126
18	83.378	4.459	5.303	1.228	0.889	0.045	72.376	16.622
19	82.577	4.447	5.337	1.261	0.938	0.048	74.389	17.423
20	83.226	4.476	5.332	1.245	0.902	0.046	72.387	16.774
21	83.206	4.475	5.331	1.239	0.903	0.047	72.931	16.794
22	82.698	4.396	5.270	1.225	0.920	0.045	75.109	17.302
23	84.005	4.538	5.355	1.271	0.864	0.047	67.960	15.995
24	82.734	4.503	5.394	1.287	0.940	0.049	73.032	17.266
25	84.129	4.574	5.389	1.291	0.863	0.048	66.845	15.871
26	83.554	4.586	5.441	1.309	0.903	0.047	68.967	16.446
27	84.118	4.543	5.354	1.264	0.857	0.046	67.809	15.882
28	82.824	4.504	5.388	1.288	0.933	0.049	72.474	17.176
29	83.240	4.484	5.339	1.260	0.903	0.047	71.651	16.760
30	83.763	4.505688	5.333	1.261	0.873	0.046	69.273	16.237
Mean	83.221	SD	0.678	CV	0.814			

ตารางที่ ก.13 ผลการจัดตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 30 รอบ

Iteration	Objective value	$E_{sub,cons}$ (MWh)	$E_{train,cons}$ (MWh)	$E_{brake,cons}$ (MWh)	$E_{reg,cons}$ (MWh)	$E_{loss,line}$ (MWh)	E_{reg} (%)	E_{save} (%)
1	85.423	4.561	5.294	1.221	0.778	0.045	63.687	14.577
2	83.676	4.490	5.320	1.250	0.876	0.046	70.049	16.324
3	83.373	4.451	5.291	1.220	0.888	0.048	72.745	16.627
4	84.757	4.489	5.252	1.204	0.807	0.044	67.016	15.243
5	85.715	4.573	5.291	1.231	0.762	0.044	61.889	14.285
6	84.843	4.498	5.258	1.210	0.804	0.043	66.428	15.157
7	83.708	4.511	5.342	1.255	0.878	0.046	69.967	16.292
8	85.442	4.504	5.228	1.192	0.767	0.044	64.394	14.558
9	83.824	4.576	5.410	1.291	0.883	0.049	68.398	16.176
10	85.286	4.637	5.393	1.286	0.800	0.045	62.220	14.714
11	83.626	4.469	5.297	1.228	0.875	0.046	71.269	16.374
12	84.347	4.500	5.290	1.224	0.835	0.045	68.193	15.653
13	85.131	4.481	5.221	1.186	0.783	0.043	66.016	14.869
14	83.585	4.455	5.284	1.221	0.875	0.046	71.638	16.415
15	83.811	4.434	5.246	1.202	0.856	0.044	71.257	16.189
16	84.332	4.556	5.356	1.265	0.846	0.046	66.919	15.668
17	84.349	4.559	5.357	1.261	0.846	0.047	67.057	15.651
18	84.249	4.548	5.352	1.261	0.850	0.045	67.425	15.751
19	84.403	4.524	5.315	1.245	0.836	0.045	67.134	15.597
20	84.943	4.530	5.288	1.227	0.803	0.044	65.423	15.057
21	84.216	4.538	5.342	1.253	0.850	0.046	67.845	15.784
22	83.717	4.535	5.370	1.269	0.882	0.047	69.494	16.283
23	84.852	4.497	5.256	1.208	0.803	0.044	66.482	15.148
24	84.507	4.486	5.264	1.208	0.822	0.045	68.030	15.493
25	84.175	4.488	5.287	1.224	0.844	0.045	68.928	15.825
26	84.073	4.469	5.272	1.220	0.846	0.044	69.398	15.927
27	83.628	4.410	5.227	1.193	0.863	0.046	72.337	16.372
28	85.451	4.537	5.266	1.209	0.772	0.044	63.895	14.549
29	84.798	4.519	5.284	1.221	0.810	0.045	66.306	15.202
30	84.300	4.488491	5.278	1.226	0.836	0.046	68.206	15.700
Mean	84.418	SD	0.658	CV	0.780			

ตารางที่ ก.14 ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี PSO นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 30 รอบ

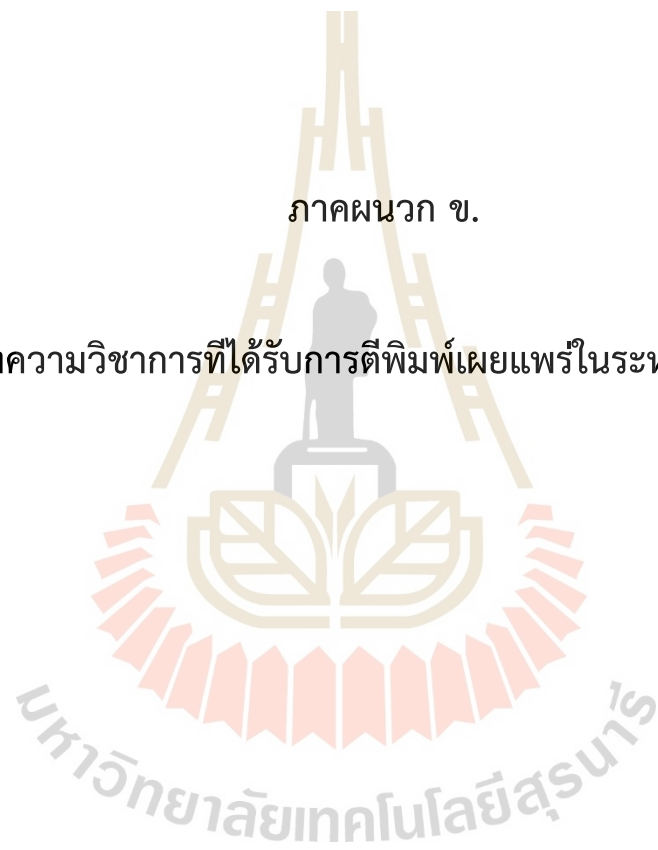
Iteration	Objective value	$E_{sub,cons}$ (MWh)	$E_{train,cons}$ (MWh)	$E_{brake,cons}$ (MWh)	$E_{reg,cons}$ (MWh)	$E_{loss,line}$ (MWh)	E_{reg} (%)	E_{save} (%)
1	85.635	3.203	3.716	0.769	0.537	0.025	69.881	14.365
2	86.478	3.235	3.716	0.774	0.506	0.025	65.358	13.522
3	86.854	3.224	3.687	0.765	0.488	0.025	63.759	13.146
4	86.691	3.241	3.714	0.760	0.498	0.024	65.474	13.309
5	86.161	3.215	3.707	0.775	0.516	0.025	66.667	13.839
6	86.164	3.226	3.718	0.766	0.518	0.025	67.618	13.836
7	86.575	3.241	3.718	0.769	0.503	0.025	65.396	13.425
8	86.115	3.239	3.736	0.778	0.522	0.025	67.109	13.885
9	87.464	3.264	3.707	0.749	0.468	0.025	62.428	12.536
10	86.648	3.234	3.708	0.755	0.498	0.025	66.042	13.352
11	85.890	3.238	3.744	0.795	0.532	0.025	66.871	14.110
12	87.278	3.250	3.699	0.760	0.474	0.025	62.373	12.722
13	86.466	3.253	3.737	0.769	0.509	0.025	66.200	13.534
14	86.897	3.240	3.704	0.765	0.489	0.025	63.905	13.103
15	86.240	3.215	3.702	0.773	0.513	0.025	66.380	13.760
16	86.287	3.215	3.701	0.751	0.511	0.024	68.048	13.713
17	86.296	3.211	3.697	0.758	0.510	0.024	67.291	13.704
18	85.630	3.224	3.740	0.770	0.541	0.025	70.280	14.370
19	86.364	3.197	3.676	0.774	0.505	0.025	65.215	13.636
20	86.907	3.210	3.669	0.749	0.484	0.024	64.554	13.093
21	85.999	3.228	3.729	0.783	0.526	0.025	67.130	14.001
22	86.604	3.225	3.699	0.770	0.499	0.025	64.769	13.396
23	87.468	3.249	3.690	0.759	0.466	0.025	61.319	12.532
24	85.896	3.178	3.676	0.758	0.522	0.025	68.899	14.104
25	86.763	3.242	3.712	0.762	0.495	0.025	64.894	13.237
26	86.329	3.188	3.668	0.753	0.505	0.025	67.041	13.671
27	86.781	3.259	3.731	0.771	0.497	0.025	64.399	13.219
28	87.031	3.238	3.696	0.768	0.483	0.025	62.792	12.969
29	85.892	3.206	3.708	0.759	0.527	0.024	69.357	14.108
30	86.980	3.241	3.700	0.769	0.485	0.026	63.085	13.020
Mean	86.493	SD	0.495	CV	0.572			

ตารางที่ ก.15 ผลการจัดตารางเวลาเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA นอกช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 30 รอบ

Iteration	Objective value	$E_{sub,cons}$ (MWh)	$E_{train,cons}$ (MWh)	$E_{brake,cons}$ (MWh)	$E_{reg,cons}$ (MWh)	$E_{loss,line}$ (MWh)	E_{reg} (%)	E_{save} (%)
1	87.041	3.210	3.665	0.748	0.478	0.024	63.907	12.959
2	87.160	3.214	3.664	0.749	0.474	0.024	63.228	12.840
3	87.110	3.238	3.692	0.771	0.479	0.024	62.141	12.890
4	89.384	3.311	3.680	0.742	0.393	0.025	52.988	10.616
5	86.859	3.261	3.729	0.779	0.493	0.025	63.320	13.141
6	87.686	3.237	3.667	0.745	0.455	0.024	61.027	12.314
7	88.194	3.308	3.725	0.765	0.443	0.026	57.884	11.806
8	88.081	3.282	3.702	0.765	0.444	0.024	58.100	11.919
9	87.834	3.279	3.707	0.761	0.454	0.026	59.728	12.166
10	88.495	3.257	3.656	0.742	0.423	0.024	57.032	11.505
11	87.669	3.189	3.614	0.734	0.449	0.023	61.104	12.331
12	88.364	3.338	3.752	0.785	0.440	0.025	55.981	11.636
13	87.815	3.257	3.684	0.763	0.452	0.024	59.261	12.185
14	87.406	3.250	3.694	0.764	0.468	0.025	61.308	12.594
15	87.010	3.230	3.687	0.763	0.482	0.025	63.204	12.990
16	87.332	3.229	3.672	0.761	0.468	0.025	61.533	12.668
17	87.625	3.299	3.739	0.780	0.466	0.026	59.696	12.375
18	87.401	3.247	3.690	0.764	0.468	0.025	61.232	12.599
19	87.381	3.293	3.743	0.784	0.476	0.025	60.634	12.619
20	86.991	3.225	3.682	0.757	0.482	0.025	63.701	13.009
21	87.058	3.252	3.711	0.763	0.484	0.025	63.358	12.942
22	88.064	3.276	3.695	0.766	0.444	0.025	57.992	11.936
23	88.113	3.284	3.703	0.759	0.443	0.025	58.352	11.887
24	87.810	3.217	3.641	0.726	0.447	0.023	61.495	12.190
25	87.677	3.256	3.690	0.751	0.458	0.024	60.984	12.323
26	87.364	3.248	3.693	0.752	0.470	0.025	62.481	12.636
27	87.922	3.296	3.724	0.775	0.453	0.025	58.434	12.078
28	87.208	3.220	3.667	0.749	0.472	0.024	63.048	12.792
29	88.988	3.362	3.751	0.790	0.416	0.028	52.701	11.012
30	87.258	3.242	3.691	0.749	0.474	0.025	63.183	12.742
Mean	87.677	SD	0.601	CV	0.686			

ภาคผนวก ข.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Y. Yooyong, T. Kulworawanichpong, and T. Ratniyomchai, Energy Saving by Train-to-Train Energy-sharing in a DC Rapid Transit Railway System, **Proceeding of International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)**, 2021, pp. 89-92



Energy Saving by Train-to-Train Energy-sharing in a DC Rapid Transit Railway System

Sumet Yooyong
School of Electrical Engineering,
Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology,
Thailand
email: mansumetyoo159@gmail.com

Thanatchai Kulworawanichpong
School of Electrical Engineering,
Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology,
Thailand
email: thanatchai@gmail.com

Tosaphol Ratniyomchai
School of Electrical Engineering,
Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology,
Thailand
e-mail: tosaphol@sut.ac.th

Abstract— In mass rapid transit systems, the braking energy of running trains can be transformed from mechanical energy to electrical energy by utilizing traction motors acted as onboard generators. Consequently, this gives an energy-saving approach for reducing energy supplied from substations by applying energy-sharing between trains. The regenerative braking energy from the braking trains is used to deliver energy to the accelerating trains. This paper employs the BTS Skytrain Silom Line, Bangkok, Thailand as a case study. The result illustrates that the proposed concept can reduce the total energy distribution drawn from substations 12.5%.

Keywords—multi-train, single-conductor, energy-saving, regenerative braking-energy

1. INTRODUCTION

Nowadays, an electric railway system is a great solution for solving a traffic congestion problem, and it is safer than other forms of transportation with also higher energy efficiency. A mass rapid transit as a DC electrified railway of 750 V via a third rail is usually serviced in the city with crowded passengers. Most of the energy is used for the tractive effort of the train running. A train movement is practically divided into three operational modes including accelerating, constant speed, and decelerating modes. The traditional energy-saving methods in the electric railway systems include lowering resistance, lowering mass, and efficiently managing energy. Recently, regenerative braking energy has gotten lots of attention for those of energy saving.

Regenerative braking energy is often used in modern electric trains for energy saving. The regenerative braking energy is obtained by the traction motors acted as temporary generators. The capability of generating energy certainly depends on the train speed during decelerating mode which is able to supply its back to the distribution system. Most of the regenerative braking energy can be conducted by adjacent trains.

Based on a novel study in applications of the regenerative braking energy of mass rapid transit system, the following methods can be effectively used to manage the regenerative braking energy by storing in the energy storage systems (ESS) [1]. Alternatively, that of energy can flow into the utility network through a reversible substation [2]. This paper

presents a method for sharing energy between trains. This energy is obtained from the regenerative braking energy of braking trains and sharing with nearby trains operated in accelerating mode. Whereas the surplus energy is dissipated by the rheostatic braking.

The remainder of this paper addresses the research methodology in section II. The simulation procedure and the system parameters are presented in section III. The simulation results and discussions are proposed in section IV. Finally, the conclusion is summarized in section V.

II. RESEARCH METHODOLOGY

A. Train Movement Calculation

The train speed, accelerating rate, and position are important parameters that are taken into the account in the dynamic train movement calculation. The train speed is usually controlled within speed-limited conditions. The tractive effort of a train is obtained by applying Newton's second law of motion as shown in (1). The forces acting on a train moving uphill consist of the tractive effort, resistance force, and gradient force as shown in Fig. 1.

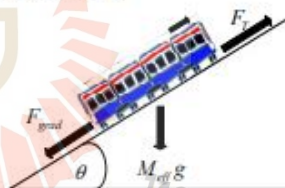


Fig. 1. Diagram of a train movement

$$F_T - F_R - F_g = M_{eff} a \quad (1)$$

$$F_{grad} = M_{eff} g \sin \theta \quad (2)$$

Where F_T is the tractive effort, F_R is the resistance force, F_{grad} is the gradient force, M_{eff} is the effective mass which is equal to $M_t(1 + \lambda_p) + M_l$ where M_t is the tare mass (ton), λ_p is the passenger factor, and M_l is the freight or passenger load, g is the acceleration due to gravity of 9.8 m/s^2 , θ is the slope's angle with respect to the horizontal line, and a is the acceleration rate.

A Davis's equation [3]. Or a resistance of a vehicle movement is caused by the friction between the wheels, rails, and air resistance as follows:

$$F_x = A + Bv + Cv^2 \quad (3)$$

Where, v is the train's speed (kph), A (kN), B (kNh), and C (kNh²/km²) are all constants, referred to as the Davis coefficients [3]. In this paper, only Davis's equation is regarded as the friction force in the motional simulation.

Basically, the distance and speed of the train at that time need to be found and updated every iteration of the simulation as follows:

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a\Delta t \quad (4)$$

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

Where, t and Δt are the simulation time and time steps (s), $v(t)$ and $v(t + \Delta t)$ are the speed before and after updated (kph), $s(t)$ and $s(t + \Delta t)$ are the position before and after updated (km).

The electric power drawn by a train corresponding to the tractive effort, TE and the immediate train speed, v , the train efficiency and the auxiliary power is express in (6). The auxiliary power is the power for the electrical devices on a train including various warning light systems and air conditioning and so on.

$$P_T(t + \Delta t) = \begin{cases} \frac{F_T \times v(t + \Delta t)}{\eta_T} + P_{aux} & , a > 0 \\ P_{aux} & , a = 0 \\ \frac{F_T \times v(t + \Delta t)}{\eta_T} + P_{aux} & , a < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Where, P_T is the train power consumption (W), P_{aux} is the auxiliary power (W), and η_T is the efficiency of conversion electrical power to the mechanical power at the wheels. Typically, there are four operating modes for a train operation: i) accelerating mode, ii) constant speed mode and iii) coasting mode, and iv) braking mode. The simulations of a train movement in this paper are only considered as a sequence of three operating modes: i) accelerating mode, ii) constant speed mode and iv) braking mode, can be shown in Fig. 2.

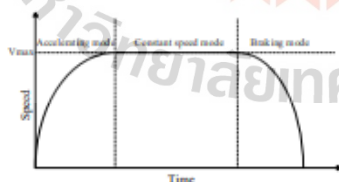


Fig. 2. Operating modes of a train movement

B. Power Flow Calculation

To obtain traction substation voltages, train voltages, consumed power for each substation, the potential of the rail, and power losses in the system are carried out by the dynamic power flow calculation. The power system network solver is based on the nodal analysis with the proposed single conductor model as shown in Fig. 3. The voltage solution at each node can be found from (7). The conductivity matrix $[G]$ is obtained by forming the conductivity sub-matrix for each bus as shown in (8)-(10), where $[G_i]$ represents the substation conductivity matrix, $[G_{pq}]$ refers to the transmitted conductivity matrix between bus p and q . The nodal equation in (7) can be written as formed in (11)

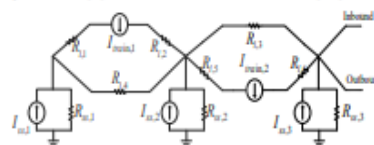


Fig. 3. DC single conductor traction system

From Fig. 3, R_r is the third rail resistance (Ω /km), I_{train} is the train current (A), I_{ss} is the substation current (A), R_{ss} is the substation resistance (Ω).

$$[I] = [G][V] \quad (7)$$

$$G_i = \frac{1}{R_{ss}} \quad (8)$$

$$G_{pq} = -\frac{1}{d \times R_r} \quad (9)$$

$$G_{pp} = G_{qq} = \frac{1}{d \times R_r} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1i} & \dots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2i} & \dots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{i1} & G_{i2} & \dots & G_{ii} & \dots & G_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \dots & G_{ni} & \dots & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

III. PROCEDURES AND SYSTEM PARAMETERS

This paper purposes to take the advantage of the regenerative braking energy by using it to supply the adjacent trains in the BTS Silom line where consists of 7 rectifier substations and 20 trains running in the simulation.

A. The procedures of the simulation.

The procedures of the simulation in this paper start by entering the parameters and calculating the train movement, power flow calculation, checking the conditions, and repeating or updating some parameters each step until obtained the results as shown in Fig. 4.

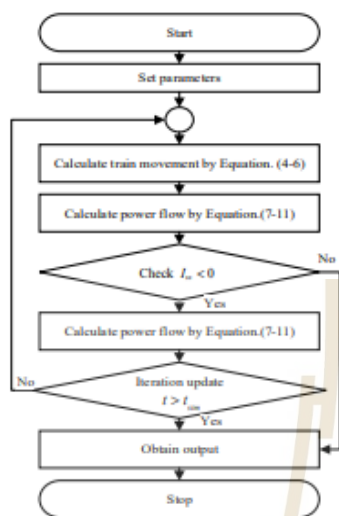


Fig. 4. Operating of the simulated system.

From Fig 4., I_a is the total current at the substation. The simulation results obtained from those procedures are simulated with MATLAB for calculate the train movement and performing the power flow calculation [4].

B. BTS Silom line Parameters.

BTS Silom line parameters [5] are shown in TABLE I. The station codes, the station names, and the station positions can be presented in Fig. 5., and the gradient profile is shown in Fig. 6.

TABLE I. Train parameters

Parameters	Specific data
Vehicle name	BTS CNR Changchun EMU
Tare weight	153 ton
Max. Payload	85 ton
Normal voltage	750 V
Max. Speed	80 km/h
Gear, motor, inverter	98%, 88%, 98%
Max. Auxiliaries	Constant load 270 kW
Third-rail resistance	8.23 mΩ/km
Max. Acceleration	0.87 m/s ²
Max. Deceleration	1 m/s ²
Regenerative brake efficiency	70%



Fig. 5. Stations and substations distance.

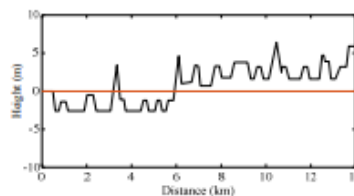


Fig. 6. Gradient profile.

C. Train-to-Train Energy Sharing Model

The model of the train-to-train energy sharing by applying the regenerative braking energy to propel the adjacent train operating in accelerating mode [6]. As shown in Fig. 7.

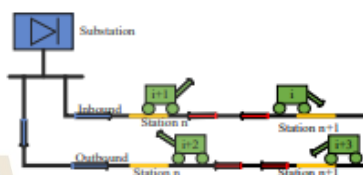


Fig. 7. Train-to-Train Energy Sharing Model.

From Fig. 7, the regenerative braking energy of the braking trains i and $i+3$ can share this energy to supply accelerating trains $i+1$ and $i+2$ in that neighborhood.

IV. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSIONS

The train speed profile under the speed limit related to the distance of a train running from station W1 to S12 with the time service of 60 min is shown in Fig. 8. The electrical power consumed by a train running an outbound service, which is taken into account by the gradient profile of the track, is shown in Fig. 9.

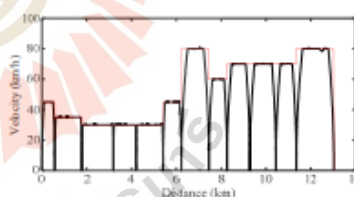


Fig. 8. Characteristics of a train speed relative to the distance.

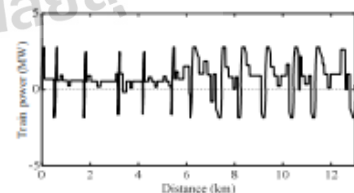


Fig. 9. The power utilized by a train.

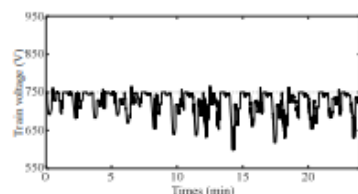


Fig. 10. The voltage utilized by a train without regenerative braking.

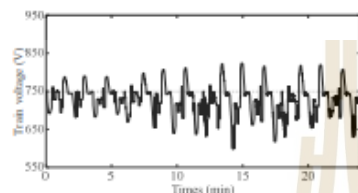


Fig. 11. The voltage utilized by a train with regenerative braking.

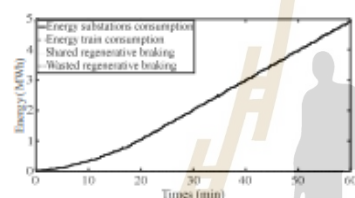


Fig. 12. Energy consumption without regenerative braking.

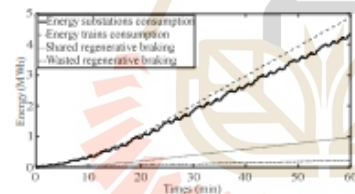


Fig. 13. Energy consumption with regenerative braking.

The train voltage without regenerative braking causes the maximum train voltage to be equal to the maximum substation voltage of 750 V as shown in Fig. 10. The train voltage with regenerative braking causes the train voltage to be over 750 V due to the energy from the braking train flows back to the power network via the third-rail as shown in Fig. 11. The energy consumed by the trains and the energy supply by substations without regenerative braking energy as shown in Fig. 12. The energy supplied by the substation is higher than the energy drawn by the trains due have ohmic losses. The energy consumed by the trains and the energy supply by substations with regenerative braking energy as shown in Fig. 13. The energy consumption of the substations decreases due to the energy sharing between train to train.

TABLE IV. Simulation results

Energy consumption	Without regenerative braking [MWh]	With regenerative braking [MWh]
Substations	4.946	4.326
Trains	4.898	4.898
Shared regenerative braking	-	0.980
Wasted regenerative braking	-	0.220
Ohmic losses	0.048	0.122

From TABLE IV, since the regenerative braking energy was shared between trains, it was discovered that the energy distribution supplied by the substations to the trains was reduced by 12.5%. However, the regenerative braking energy becomes the wasted regenerative braking energy of 0.220 MWh if there is no adjacent train drawn that energy. This leads to the ohmic losses in the system is higher.

V. CONCLUSION

This paper presents the energy saving of substations in the BTS SkyTrain system as a case study by a train-to-train energy sharing with the regenerative braking energy. As the results can be concluded that the energy consumption of the substation can be saved of 12.5%. However, the regenerative braking energy is unable to share between trains and became the wasted regenerative braking energy if there is no adjacent train running nearby. Therefore, the energy-saving can be increased by rescheduling the timetable of the train service which considered the positions of the train braking and the train accelerating are frequently closest to each other.

REFERENCES

- [1] Zongyu, G. A. O., et al. "Control strategy for wayside supercapacitor energy storage system in railway transit network." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 2.2 (2014): 181-190.
- [2] Z. Tain, G. Zhang, N. Zhao, S. Hillmanssen, P. Tricoli, C. Roberts. "Energy Evaluation for DC Railway Systems with Inverting Substations." 2018 IEEE International Conference ESARS-ITEC, November 7-9, 2018, Nottingham, UK.
- [3] N. Sutphorn. "Optimal positions and capacities of wayside supercapacitors for a DC electrified railway" Thesis, electrical engineering, suranaree university of technology, 2019.
- [4] T. Kuhworawanichapong. "Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method." *Journal of Modern Transportation*, pp.1-11., September 2015.
- [5] 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 AEDCEE, May 25-26, 2017, Bangkok, Thailand, pp. 796-800.
- [6] X. Yang, X. Li, Z. Gao, H. Wang, and T. Tang. "A Cooperative Scheduling Model for Timetable Optimization in Subway Systems", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, vol. 14, pp. 438-447, March 2013.
- [7] BTS Skytrain Silom Line [http://www.bts.co.th\[online\]](http://www.bts.co.th[online]).

ประวัติผู้เขียน

นายสุเมธ อยู่ยง เกิดเมื่อวันที่ 29 มกราคม พ.ศ. 2541 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2562 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2563 โดยในขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้เป็นผู้สอนในรายวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลงานตีพิมพ์ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ข



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี