

การประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดในรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดรงโดยการ
ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

OPTIMAL ENERGY SAVING IN DC MASS TRANSIT BY USING
ON-BOARD SUPERCAPACITOR



KITTAPON CHATWONGTONG

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2021

การประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดในรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรงโดยการใช้
ตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)




(รศ. ดร.ฉันทชัย กุลารวานิชพงษ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.กীরติ ชยะกุลศิริ)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กฤตพน ฉัตรวงศ์ทอง : การประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดในรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรง
โดยการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถ (OPTIMAL ENERGY SAVING IN DC
MASS TRANSIT BY USING ON-BOARD SUPERCAPACITOR) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตนนิมิตชัย, 151 หน้า.

คำสำคัญ : อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าบนขบวนรถ/การควบคุมเชิงเส้นแบบเป็นช่วง/การจัด
การพลังงานเกิดจากการเบรก/แบบจำลองรถไฟฟ้าหลายขบวน/ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
กระแสดตรงโดยการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ เพื่อเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกและ
จ่ายคืนพลังงานให้กับรถไฟฟ้าในขณะที่ทำการเร่งความเร็ว กรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีม่วงให้บริการใน
พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ประเทศไทย โดยพัฒนาแบบจำลองรถไฟฟ้าหลายขบวน และ
หลายตัวผ่านโปรแกรม MATLAB การติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถจำเป็นต้องมีการ
ควบคุมการทำงานซึ่งวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ คือ วิธีควบคุมแบบ Piece-wise linear SOC
ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมด้วยส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานกับขบวนรถไฟฟ้า
วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่นำมาประยุกต์ใช้ ได้แก่ วิธีการ Particle swarm optimization และ
Genetic algorithm optimization การหาค่าที่เหมาะสมในการประหยัดพลังงานด้วยการควบคุมตัว
เก็บประจุยิ่งยวดแบ่งเป็นกรณีศึกษา 5 กรณี ได้แก่ กรณีที่สถานะประจุเริ่มต้น 100%, 75%, 50%,
25% และ 0% ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละกรณีมีเงื่อนไขสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการบริการสถานะประจุต้อง
เป็น 100% ผลการศึกษาพบว่า การทำงานของระบบทดสอบที่กรณีสถานะประจุเริ่มต้น 100%
สามารถประหยัดพลังงานในการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้าหลายขบวนได้ประมาณ 6% ประหยัด
พลังงานไฟฟ้าสูญเสียได้ประมาณ 10% และยังสามารถเก็บสะสมพลังงานที่เกิดจากการเบรกของ
รถไฟฟ้าได้ถึง 46%

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา กฤตพน

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ทศพล

KITTAPON CHATWONGTONG : OPTIMAL ENERGY SAVING IN DC MASS TRANSIT
BY USING ON-BOARD SUPERCAPACITOR : ASST. PROF. TOSAPHOL
RATNIYOMCHAI, Ph.D. 151 PP.

Keyword : ON-BOARD ENERGY STORAGE/ PIECE-WISE LINEAR/ REGENERATIVE
ENERGY MANAGEMENT/ MULTI-TRAIN SIMULATION/ SUPERCAPACITOR

This thesis presents optimal energy saving in DC mass transit by using on-board supercapacitor to store energy from braking and return energy to the train while accelerating. Case study of the MRT Purple Line, Bangkok, Thailand by developing a model of multi-train and multi-conductor by MATLAB program. The installation of supercapacitors on the train required to control and the method presented in the thesis was piece-wise linear SOC, which is a different voltage control method between energy storage voltage and train voltage. The optimization methods applied are particle swarm optimization (PSO) and genetic algorithm optimization (GA) methods. Optimizing energy savings by controlling supercapacitors is divided into five case studies: the case where the initial state of charge is 100%, 75%, 50%, 25% and 0% respectively, in which each case has the final condition at the end of service, the state of charge must be 100%. The results of the test system in the case of a 100% initial state of charge can save about 6% of the energy distribution, save about 10% of the energy loss, and store the energy generated by the braking of the train up to 46%

School of Electrical Engineering

Academic Year 2021

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตนนิมิตต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และแนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ยิ่งแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมไปถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้ทำวิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิตชัย กุลวรวานิชพงษ์ กับริงศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และเป็นผู้ตรวจทานวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา และให้กำลังใจอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณกลุ่ม ๆ เพื่อน และรุ่นพี่ของผู้ทำวิจัยที่ให้กำลังใจ อีกทั้งช่วยเหลือให้คำปรึกษาทั้งในด้านวิชาการ และด้านการใช้ชีวิตของผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน ขอขอบคุณเพื่อนบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้กำลังใจในการทำวิจัย และกราบขอบพระคุณบิดา และมารดา ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษามาโดยตลอด

กฤตพน ฉัตรวงศ์ทอง

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 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชญากรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ระบบเบรกจ่ายคืนพลังงาน	6
2.3 ระบบเก็บสะสมพลังงาน	9
2.3.1 ระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งบนขบวนรถไฟ.....	12
2.3.2 เทคนิคการควบคุมระบบเก็บสะสมพลังงาน	14
2.4 สรุป.....	16
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	17
3.1 บทนำ.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 ระบบรถไฟฟ้า.....	17
3.2.1 ระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง.....	21
3.2.2 ระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ.....	23
3.3 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย.....	24
3.4 การควบคุมรถไฟฟ้า.....	26
3.5 การเบรกจ่ายคืนพลังงาน.....	27
3.6 อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน.....	28
3.6.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	29
3.6.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า.....	31
3.7 สรุป.....	32
4 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรง.....	33
4.1 บทนำ.....	33
4.2 การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า.....	33
4.3 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่.....	39
4.4 การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	41
4.5 แบบจำลองตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า.....	46
4.5.1 การควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าด้วย วิธีการ Piece-wise Linear State of Charge Control.....	47
4.6 การทดสอบแบบจำลองผลระบบไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนหนึ่งขบวน.....	51
4.6.1 ผลการทดสอบแบบจำลองรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน.....	55
4.6.2 ผลการทดสอบแบบจำลองรถไฟฟ้าหลายขบวน.....	66
4.7 สรุป.....	71
5 การหาค่าที่เหมาะสม.....	72
5.1 บทนำ.....	72
5.2 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี Particle swarm optimization.....	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3	การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี Genetic algorithm optimization 76
5.4	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์..... 79
5.4.1	ระบบทดสอบ 81
5.5	สรุป..... 87
6	ผลการจำลองและการประเมิน..... 88
6.1	บทนำ..... 88
6.2	ผลการจำลอง..... 88
6.2.1	ผลการจำลองกรณีที่ 1 สถานะประจําเริ่มต้น 100% 89
6.2.2	ผลการจำลองกรณีที่ 2 สถานะประจําเริ่มต้น 75%..... 94
6.2.3	ผลการจำลองกรณีที่ 3 สถานะประจําเริ่มต้น 50%..... 99
6.2.4	ผลการจำลองกรณีที่ 4 สถานะประจําเริ่มต้น 25%..... 104
6.2.5	ผลการจำลองกรณีที่ 5 สถานะประจําเริ่มต้น 0%..... 109
6.3	การประเมินเปรียบเทียบ..... 114
6.4	สรุป..... 116
7	สรุปและข้อเสนอแนะ..... 117
7.1	สรุปผลการดำเนินงาน..... 117
7.2	ข้อเสนอแนะ..... 117
รายการอ้างอิง.....	119
ภาคผนวก.....	124
ภาคผนวก ก. ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	126
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	135
ประวัติผู้เขียน.....	151

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การเปรียบเทียบวิธีการเบรกจ่ายคืนพลังงาน 8
2.2	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน 13
3.1	แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานการจ่ายไฟตามมาตรฐาน EN 50163 หรือ IEC 60850 22
4.1	พารามิเตอร์สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน 51
4.2	พารามิเตอร์รถไฟฟ้าสายสีม่วง 52
4.3	รายละเอียดเส้นทางการเดินรถไฟฟ้าสายสีม่วง 52
4.4	ตารางเวลาการเดินรถไฟฟ้าสายสีม่วง 54
4.5	ออกแบบความเร็วทำการของรถไฟฟ้าสายสีม่วง 55
5.1	พารามิเตอร์ตัวเก็บประจุยิ่งยวด Maxwell BMOD0165 ต่อ 1 โมดูล 82
5.2	พารามิเตอร์ตัวเก็บประจุยิ่งยวด Maxwell BMOD0165 ติดตั้งบนขบวนรถ 83
5.3	เงื่อนไขการจำลองผลแต่ละกรณี 84
5.4	พารามิเตอร์สำหรับการหาค่าที่เหมาะสม 85
6.1	ระดับสถานะเริ่มต้นของตัวเก็บประจุยิ่งยวดทุกกรณี 88
6.2	ผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด กรณีที่ 1 89
6.3	ผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด กรณีที่ 2 94
6.4	ผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด กรณีที่ 3 99
6.5	ผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด กรณีที่ 4 104
6.6	ผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด กรณีที่ 5 109
6.7	เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าระบบรถไฟฟ้าหลายขบวน 114
6.8	กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า 115
6.9	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า 115
6.10	ผลที่ดีที่สุดจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด 116
ก.1	ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 1 ด้วยเทคนิค PSO 125

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.2 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 2 ด้วยเทคนิค PSO	126
ก.3 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 3 ด้วยเทคนิค PSO	127
ก.4 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 4 ด้วยเทคนิค PSO	128
ก.5 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 5 ด้วยเทคนิค PSO	129
ก.6 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 1 ด้วยเทคนิค GA.....	130
ก.7 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 2 ด้วยเทคนิค GA.....	131
ก.8 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 3 ด้วยเทคนิค GA.....	132
ก.9 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 4 ด้วยเทคนิค GA.....	133
ก.10 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 5 ด้วยเทคนิค GA.....	134

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ประเภทของพลังงานในการเคลื่อนที่	7
2.2	ส่วนประกอบล้อยุนกำลัง	10
2.3	แผนภาพตัวเก็บประจุยิ่งยวด	10
2.4	แผนภาพแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด	12
2.5	หลักการทำงานการควบคุมแบบคาสเคด	15
3.1	แผนที่ให้บริการรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงลอนดอน	18
3.2	รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงลอนดอน	18
3.3	แผนที่ให้บริการรถไฟฟ้ากรุงปารีส	19
3.4	รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงปารีส	19
3.5	แผนที่ให้บริการรถไฟฟ้ากรุงโตเกียว	20
3.6	รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงโตเกียว	20
3.7	รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้ารางที่สาม	21
3.8	สายส่งเหนือศีรษะและเสาตี	23
3.9	ลักษณะขบวนรถไฟฟ้ากระแสตรงในไทย	25
3.10	ลักษณะขบวนรถไฟฟ้ากระแสสลับในไทย	25
3.11	ระบบควบคุมขบวนรถไฟฟ้า	27
3.12	ประเภทของระบบเบรก	27
3.13	ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับรถไฟฟ้า	29
3.14	วงจรสมมูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด	30
3.15	แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของรถไฟติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน	32
4.1	โหมตการทำงานของรถไฟฟ้า	34
4.2	แผนภาพวัฏจักรของการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า	35
4.3	ลักษณะสมบัติแรงฉุดของหัวรถจักร	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	แผนภาพระยะวิกฤตการเบรก 37
4.5	การออกแบบเส้นโค้งความเร็ว 38
4.6	การควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้า 38
4.7	สรุปขั้นตอนการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า 40
4.8	แผนภาพระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง 41
4.9	วงจรสมมุติระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง 41
4.10	ขั้นตอนการหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแส 46
4.11	แบบจำลองตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถ 47
4.12	การควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC 48
4.13	รถไฟฟ้าสายสีม่วง (สายฉลองรัชธรรม) 51
4.14	ระดับเกรดเดียนต์ของรถไฟฟ้าสายสีม่วง 53
4.15	คุณลักษณะแรงฉุดลากและแรงเบรกของหัวรถจักร 53
4.16	ความเร็วเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงสายสีม่วง 56
4.17	แรงที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ 57
4.18	กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ 58
4.19	กำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรก กรณีฐาน 59
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการจำลองผลกับตำแหน่งของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน 61
4.20	พลังงานสะสมที่รถไฟฟ้าหนึ่งขบวนใช้ในการเคลื่อนที่ตลอดเส้นทาง 61
4.22	แรงดันรถไฟฟ้าในขณะที่เคลื่อนที่ 62
4.23	ระดับแรงดันรางที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับเวลาระบบรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน 63
4.24	ระดับแรงดันสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับเวลาระบบรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน 64
4.25	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำรางที่สามระบบรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน 65
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการจำลองผลกับตำแหน่งของรถไฟฟ้าหลายขบวน 67
4.27	พลังงานสะสมที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่หลายขบวน 67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28	แรงดันรถไฟฟ้าในขณะเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวน 68
4.29	ระดับแรงดันรางที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน เทียบกับเวลาระบบรถไฟฟ้าหลายขบวน 69
4.30	ระดับแรงดันสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับเวลาระบบรถไฟฟ้าหลายขบวน 70
4.31	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำรางที่สามระบบรถไฟฟ้าหลายขบวน 71
5.1	แผนผังการทำงานของ PSO 75
5.2	การคำนวณการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค 76
5.3	การคัดเลือกโดยการหมุนวงล้อ 77
5.4	แผนผังการทำงานของ GA 79
5.5	ขนาดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด Maxwell BMOD0165 82
5.6	ระดับแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเทียบกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด 84
5.7	ผลการสุ่มปรับค่าคงที่ความเร็วของวิธีการ PSO 86
5.8	ผลการสุ่มปรับค่าคงที่ความเร็วของวิธีการ GA 86
6.1	คุณลักษณะความชัน กรณีที่ 1 89
6.2	กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุของการทดสอบกรณีที่ 1 90
6.3	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกรณีที่ 1 91
6.4	กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกรณีที่ 1 92
6.5	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำของกรณีที่ 1 93
6.6	คุณลักษณะความชัน กรณีที่ 2 94
6.7	กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุของการทดสอบกรณีที่ 2 95
6.8	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกรณีที่ 2 96
6.9	กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกรณีที่ 2 97
6.10	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำของกรณีที่ 2 98
6.11	คุณลักษณะความชัน กรณีที่ 3 99
6.12	กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุของการทดสอบกรณีที่ 3 100

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.13	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกรณี 3.....	101
6.14	กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกรกรณี 3.....	102
6.15	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำของกรณี 3.....	103
6.16	คุณลักษณะความชัน กรณีที่ 4.....	104
6.17	กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุของการทดสอบกรณี 4.....	105
6.18	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกรณี 4.....	106
6.19	กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกรกรณี 4.....	107
6.20	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำของกรณี 4.....	108
6.21	คุณลักษณะความชัน กรณีที่ 5.....	109
6.22	กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุของการทดสอบกรณี 5.....	110
6.23	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกรณี 5.....	111
6.24	กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกรกรณี 5.....	112
6.25	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำของกรณี 5.....	113

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีอัตราจำนวนประชากรที่ย้ายเข้ามาอาศัยในเมืองใหญ่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ระบบการขนส่งสาธารณะจึงเป็นสิ่งสำคัญ มีประชากรจำนวนมากใช้ระบบขนส่งสาธารณะทุกวันและมีความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างมาก (Dimitrova and Tomov, 2020) ระบบขนส่งมวลชนทางรางภายในเมืองที่มีประสิทธิภาพ มีปริมาณความจุผู้โดยสารสูง ตรงต่อเวลา ปลอดภัย (Fei Shang et al., 2018) สามารถช่วยลดปัญหาสภาพการจราจรได้อย่างสูง ซึ่งระบบขนส่งทางรางในยุคแรก เริ่มใช้เป็นรถจักรไอน้ำ ต่อมาพัฒนาโดยใช้พลังงานเชื้อเพลิงดีเซล ในปัจจุบันได้พัฒนาใช้พลังงานที่เป็นแพร่หลาย คือระบบไฟฟ้า ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในเมืองขนาดใหญ่ทั่วโลก ได้แก่ ประเทศอังกฤษ ประเทศฝรั่งเศส ประเทศญี่ปุ่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศจีน หรือแม้กระทั่งประเทศไทย เป็นต้น การขนส่งผู้โดยสารจำนวนมากในช่วงโมงเร่งด่วนใช้กำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนปริมาณมาก โหลดของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนส่วนใหญ่เกิดจากการดึงกำลังไฟฟ้าในขณะที่รถไฟฟ้าทำการเร่งความเร็ว และสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนได้ในขณะที่รถไฟฟ้าทำการเบรก เมื่อมีรถไฟฟ้าวิ่งอยู่ในระบบหลายขบวนซึ่งแต่ละขบวนอาจจะมีการทำงานในโหมดการเร่งความเร็ว โหมดความเร็วคงที่ โหมดวิ่งด้วยแรงเฉื่อย หรือโหมดเบรก ส่งผลให้โหลดทางไฟฟ้าของระบบขนส่งมวลชนมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า การประหยัดพลังงานมีบทบาทสำคัญในการช่วยลดพลังงานที่รถไฟฟ้าใช้ ระบบการเก็บพลังงานจึงถูกพัฒนาโดยมีเป้าหมายในการลดการใช้พลังงานจากสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าและการควบคุมการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม

การประหยัดพลังงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นแนวทางการวิจัยที่สำคัญและมีผู้ให้ความสนใจอย่างแพร่หลายในการพัฒนาการปรับความเร็วของรถไฟไฟฟ้า การหยุดรถ การประสานงานของรถไฟไฟฟ้าในพื้นที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเดียวกันเพื่อใช้พลังงานหมุนเวียนจากการเบรก (Yang, 2016) งานวิจัยเหล่านี้สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 5-9% การเบรกจ่ายคืนพลังงาน (regenerative braking) เป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า โดยทั่วไปการเบรกจ่ายคืนพลังงานมีการจัดการพลังงานที่ถูกสร้างขึ้นจากการเบรก ได้แก่ การเบรก

ด้วยตัวต้านทานเบรก (resistor braking) การเบรกแบบจ่ายคืนกริด (grid-feedback braking) การเบรกแบบไฮบริด (hybrid braking) และการเบรกจัดเก็บพลังงาน (energy storage braking) เป็นต้น (Yu et al., 2020) ระบบการจัดเก็บพลังงานเป็นการประยุกต์เทคโนโลยีการสะสมพลังงานในระบบรถไฟฟ้าถูกใช้อย่างแพร่หลาย โดยวัตถุประสงค์ส่วนใหญ่เพื่อลดการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ระบบการจัดเก็บพลังงานสำหรับระบบรถไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น ระบบเก็บสะสมพลังงานริมทาง (Wayside Energy Storage System: WESS) ระบบเก็บสะสมพลังงานที่สถานี (Stationary Energy Storage System: SESS) และระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งบนขบวนรถ (On-Board Energy Storage System: OBESS) อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่นิยมติดตั้งบนขบวนรถ ได้แก่ แบตเตอรี่ (battery) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) และล้อตุนกำลัง (flywheel) (Khodaparastan et al., 2019) เป็นต้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบขนส่งมวลชนเนื่องจากความหนาแน่นของกำลังงานที่ค่อนข้างสูง เวลาคายประจุ/ชาร์จประจุสั้น ค่าบำรุงรักษาต่ำ และอายุการใช้งานยาวนาน (González-Gil et al., 2014) อัตราการประหยัดพลังงานโดยการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถประมาณ 16-36% (Wu et al., 2020) งานวิจัยทดสอบจำลองการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถของระบบรถไฟฟ้า BTS สายสุขุมวิท สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 27% ที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 7 kWh และระบบรถไฟฟ้า Jinan Metro สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 16% ที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 10 kWh (Kampeerawar et al., 2018)

การประยุกต์ใช้งาน OBESS ในระบบรถไฟฟ้าตามวัตถุประสงค์การใช้งานนั้นต้องอาศัยกลยุทธ์ในการควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด กลยุทธ์การจัดการควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานมีหลากหลายวิธี ในงานวิจัยนี้ใช้กลยุทธ์การควบคุม Piece-wise linear state of charge control เป็นการควบคุมการทำงานของระบบเก็บพลังงานด้วยส่วนต่างแรงดันไฟฟ้า (deviation voltage) (Ratniyomchai, 2016) เพื่อให้ควบคุมการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดการใช้พลังงานจากสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 จำลองวิธีการลดการใช้พลังงานการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยการกักเก็บพลังงานที่เกิดจากการเบรกในตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ

1.2.2 ศึกษาการหาขนาดที่เหมาะสมของแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ระบบเก็บสะสมพลังงานเริ่มทำงาน โดยใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีม่วงหลายขบวน

1.2.3 เปรียบเทียบการทำงานของโปรแกรมจำลองการประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม Particle swarm optimization (PSO) และ Genetic algorithm optimization (GA)

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ขนาดของแรงดันไฟฟ้าคายประจุต่ำสุดที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีผลต่อการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงาน และการเก็บสะสมพลังงานคืนจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานของรถไฟฟ้า วิธีการหาค่าที่เหมาะสมเป็นแนวทางที่ดีในการหาขนาดของแรงดันไฟฟ้าคายประจุต่ำสุด

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ระบบทดสอบเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB

1.4.2 พารามิเตอร์และข้อมูลการจำลองของระบบทดสอบใช้ข้อมูลของขบวนรถไฟฟ้าสายสีม่วง รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ตั้งแต่สถานีคลองบางไผ่ถึงสถานีเตาปูน

1.4.3 การจำลองผลเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวนในระบบทดสอบ

1.4.4 ระบบเก็บสะสมพลังงานใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการจำลองและไม่คำนึงถึงค่าคงตัวเวลา (time constant)

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 จำลองผล และเปรียบเทียบการใช้พลังงานการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวนโดยใช้วิธีควบคุมความเร็ว ที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ

1.5.2 เปรียบเทียบการทำงานของโปรแกรมจำลองด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม PSO และ GA พร้อมเปรียบเทียบผลการประหยัดพลังงาน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้แบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งบนขบวนรถ

1.6.2 สามารถหาแรงดันเริ่มทำงานที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานภายใต้การควบคุมแบบ Piece-wise linear SOC

1.6.3 สามารถประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพ การประหยัดพลังงานที่สุดในรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงที่ติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท และ 2 ภาคผนวก โดยที่ บทที่ 1 นำเสนอถึงความ เป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่ คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 นำเสนอถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการสำรวจงานวิจัยที่ เกี่ยวข้องในอดีตที่มีการศึกษา เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยโดย แบ่งเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ ระบบเบรกจ่ายคืนพลังงาน และระบบเก็บสะสมพลังงาน

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบไปด้วยระบบรถไฟฟ้า เช่น ระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง และระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นต้น รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย การควบคุมรถไฟฟ้า การเบรกจ่ายคืนพลังงาน และอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานของระบบรถไฟฟ้า

บทที่ 4 นำเสนอการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรง ซึ่งกล่าวถึงการ สร้างแบบจำลองรถไฟฟ้า 1 ขบวน และมีการพัฒนาต่อเป็นระบบรถไฟฟ้าหลายขบวน โดยใช้ การคำนวณทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า การคำนวณ กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ การคำนวณผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แบบจำลองตัว

เก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า และการทดสอบแบบจำลองผลระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน กระแสตรงประกอบด้วย แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า 1 ขบวน และหลายขบวน ควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ติดตั้งบนขบวนรถด้วยวิธี Piece-wise linear SOC โดยการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ควบคุมการทำงาน

บทที่ 5 นำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการใช้พลังงานต่ำที่สุดในระบบรถไฟฟ้าโดย บทนี้ประกอบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม 2 วิธี ได้แก่ Particle swarm optimization (PSO) และวิธี Genetic algorithm optimization (GA)

บทที่ 6 นำเสนอผลการทดสอบในกรณีศึกษาแต่ละกรณี และเปรียบเทียบประเมินผลการจำลองการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด

บทที่ 7 นำเสนอบทสรุปและข้อเสนอของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบการหาค่าที่เหมาะสมของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษาและประวัติของผู้ทำวิจัย

บทที่ 2

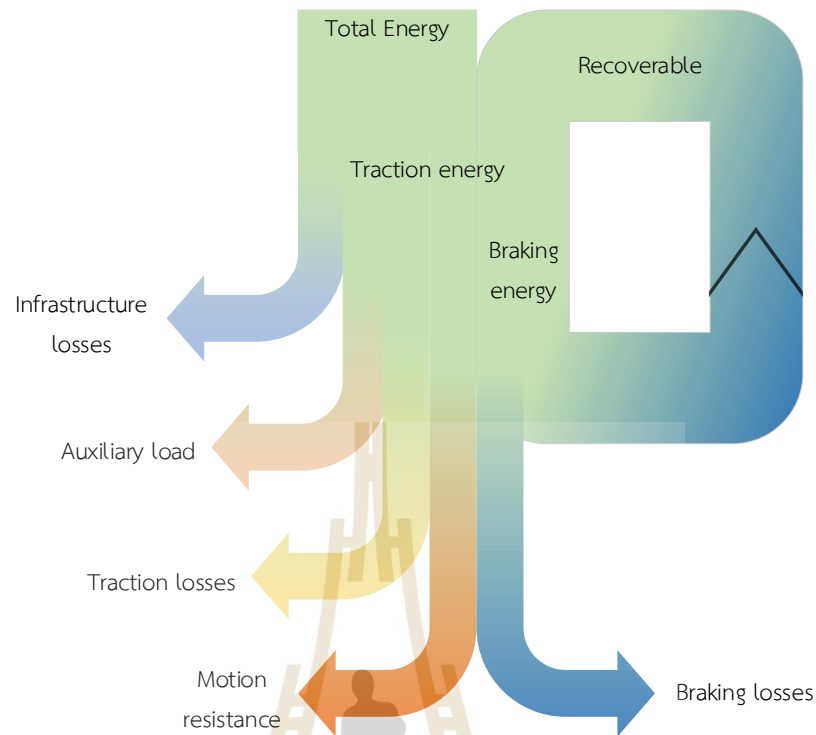
ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ระบบเบรกจ่ายคืนพลังงานมีการศึกษาและวิจัยหลากหลายวัตถุประสงค์ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา รวมถึงการวิธีการประยุกต์ระบบใช้เก็บสะสมพลังงาน บทนี้นำเสนอการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีการศึกษามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนางานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

2.2 ระบบเบรกจ่ายคืนพลังงาน

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสาธารณะเป็นทางออกที่ดีในการลดผลกระทบของการสัญจรในเขตเมือง เนื่องจากมีความจุสูง ความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือ และประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อมที่ดีเยี่ยม เป็นเหตุผลให้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสาธารณะในเขตเมืองได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะวิธีการขนส่งที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนในช่วงทศวรรษที่ 20 ในสหภาพยุโรป แต่ในทางกลับกันทางด้านต้นทุนพลังงานมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นเหตุผลที่จำเป็นอย่างยิ่งในการลดการใช้พลังงานในขณะที่รักษาหรือปรับปรุงคุณภาพการบริการและความจุ การใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบขนส่งมวลชนสาธารณะแสดงดังรูปที่ 2.1 แผนภูมิของพลังงานในการเคลื่อนที่ การสูญเสียโครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure loss) หมายถึง การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าและระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านตัวนำ ซึ่งความสูญเสียดังกล่าวขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบและปริมาณกำลังงานในระบบ โดยทั่วไปการสูญเสียพลังงานอาจสูงถึง 10% ระบบเสริม (auxiliary system) คิดเป็น 20% ของปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมดของรถไฟฟ้า ในส่วนของการเคลื่อนที่ซึ่งประกอบไปด้วยแรงต้านต่าง ๆ (motion resistance) โดยเฉลี่ยการต้านการเคลื่อนที่คิดเป็น 16% และความสูญเสียในการฉุดลาก (traction loss) ประกอบด้วยประสิทธิภาพอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้า (converter) มอเตอร์ไฟฟ้า (motor) และระบบส่งกำลังไฟฟ้า (transmission system) คิดเป็น 14% โดยพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรก (braking energy) ของรถไฟฟ้าคิดเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่รถไฟฟ้าใช้ และปริมาณหนึ่งในสามจะถูกคิดเป็นพลังงานสูญเสียในการเบรก (braking loss) (González-Gil, 2014)



รูปที่ 2.1 ประเภทของพลังงานในการเคลื่อนที่

ที่มารูป: (González-Gil, 2014)

การเบรกจ่ายคืนพลังงานส่วนใหญ่ประกอบด้วย การเบรกด้วยตัวต้านทาน (resistor braking) การเบรกแบบจ่ายคืนกริด (grid-feedback braking) การเบรกจัดเก็บพลังงาน (energy storage braking) และการเบรกแบบผสม (hybrid braking)

- 1) การเบรกด้วยตัวต้านทาน มีสองรูปแบบการใช้งาน ได้แก่ การติดตั้งชุดตัวต้านทานที่สถานีเป็นการส่งพลังงานที่เกิดจากการเบรกลงกราวด์ และการติดตั้งชุดตัวต้านทานที่แปลงพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกเป็นพลังงานความร้อนบนขบวนรถที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศจีน โดยการติดตั้งบนขบวนรถต้องคำนึงถึงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และความเร็วในการทำงานเพื่อกำจัดความร้อนที่ถูกสร้างขึ้น (Yang et al., 2014)
- 2) การเบรกแบบจ่ายคืนกริด เป็นการติดตั้งชุดแปลงแรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อรถไฟทำการเบรกส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบสายส่งเพิ่มขึ้น โดยระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าระดับแรงดันปกติจะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและถูกส่งกลับไปยังระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระดับกลาง (Lin et al., 2019)

- 3) การเบรกจัดเก็บพลังงาน มีสองรูปแบบการใช้งาน ได้แก่ การติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานริมทาง (wayside energy storage) เป็นการติดตั้งขนานเข้ากับระบบสายส่งตัวนำหรือบางระบบติดตั้งที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า (stationary energy storage) ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม และการติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ (on-board energy storage) ในรูปแบบนี้สามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำ แต่ต้องคำนึงถึงน้ำหนัก และพื้นที่การติดตั้ง เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการใช้งาน การติดตั้งแบบริมทางมีข้อได้เปรียบด้านขนาดความจุพลังงานและน้ำหนักในการติดตั้ง ในทางกลับกันข้อเสียทางด้านประสิทธิภาพเนื่องจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่งตัวนำและต้นทุนในการติดตั้งที่สูงกว่าการติดตั้งบนขบวนรถ (Kleftakis et al., 2018, Qin et al., 2019, Yang et al., 2016)
- 4) การเบรกแบบผสม เป็นการทำงานของการเบรกในหลายรูปแบบเข้าด้วยกันระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เป็นการทำงานด้วยการทำงานควบคู่กันระหว่างการเบรกด้วยตัวต้านทานกับการเบรกแบบจ่ายคืนกริด หรือการทำงานควบคู่กันระหว่างการเบรกด้วยตัวต้านทานกับการเบรกจัดเก็บพลังงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดให้กับระบบ (Ping et al., 2013)

โดยการเปรียบเทียบดังตารางที่ 2.1 การเบรกแบบจ่ายคืนกริดเป็นที่นิยมเนื่องจากประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง สามารถส่งคืนระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระดับกลางได้ อย่างไรก็ตามระบบรถไฟฟ้าขนส่งสาธารณะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่บ่อยครั้ง ส่งผลถึงความเสถียรในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนกริด (Yu et al., 2020) ดังนั้นวิธีการเบรกจัดเก็บพลังงานจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่ดี และมีความน่าสนใจ

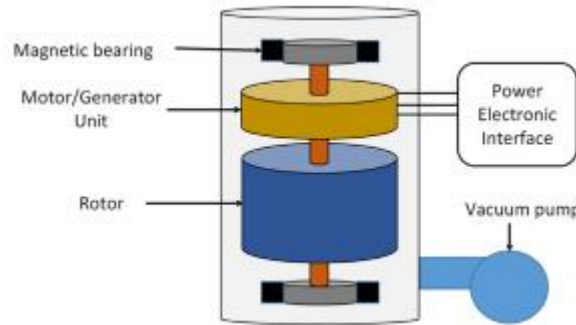
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบวิธีการเบรกจ่ายคืนพลังงาน

Performance Index	Resistor	Grid-feedback	Energy storage	Hybrid
Cost	Low	Relatively high	High	Medium
Energy efficiency	Low	Relatively high	High	Medium

2.3 ระบบเก็บสะสมพลังงาน

ในปัจจุบันการรณรงค์การอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมเป็นสิ่งสำคัญ ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสาธารณะเป็นส่วนหนึ่งในการรณรงค์และการพัฒนาการใช้พลังงานโดยที่ยังคงประสิทธิภาพการทำงาน การใช้อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจึงมีความเหมาะสมซึ่งการคายประจุและชาร์จประจุมีความสอดคล้องกับระบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ระบบการเก็บสะสมพลังงานของรถไฟฟ้ามีการศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอย่างยาวนาน การนำอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานติดตั้งแบบปริมาตรเป็นวิธีการหนึ่งที่มีการศึกษาแพร่หลาย เพื่อลดค่ายอดการใช้กำลังไฟฟ้า (peak power) และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเนื่องจากต้นทุนส่วนใหญ่ของระบบรถไฟฟ้ามาจากค่ายอดการใช้ไฟฟ้า ในอีกรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถสามารถแก้ปัญหากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำ แต่อย่างไรก็ตามการติดตั้งบนขบวนรถส่งผลให้น้ำหนักของขบวนรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และยังมีพื้นที่ในการติดตั้งอย่างจำกัด อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานในปัจจุบันมีหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ ล้อตุ้มกำลัง (flywheel) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) แบตเตอรี่ (battery) เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) และแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด (superconducting magnetic) (Liu and Li, 2020) มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

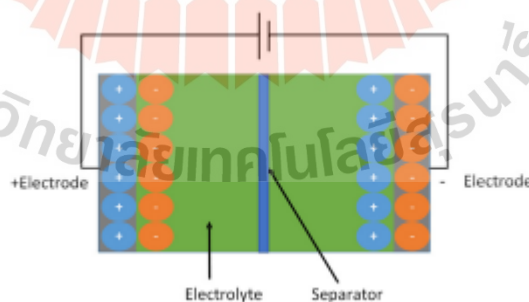
- 1) ล้อตุ้มกำลัง โดยทั่วไปประกอบด้วย โรเตอร์ (rotor) ตลับลูกปืนโรเตอร์ (rotor bearing) เครื่องจักรกลไฟฟ้า (electrical machine) และอินเทอร์เฟซอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronics interface) แสดงดังรูปที่ 2.2 แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานจลน์ (kinetic energy) และเก็บพลังงานกลไว้ในโรเตอร์ความเร็วสูง ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าผ่านตลับลูกปืน พลังงานจลน์จะถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าเมื่อจำเป็น โรเตอร์ติดตั้งอยู่ในสุญญากาศหรือภาชนะที่มีแรงดันต่ำมาก เพื่อขจัดหรือลดการสูญเสียจากแรงเสียดทาน ความต้านทานแรงดึงของวัสดุเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่กำหนดความเร็วในการหมุนสูงสุดของโรเตอร์ เนื่องจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเป็นสัดส่วนกับความเร็วในการหมุนกำลังสอง การใช้วัสดุคอมโพสิตที่มีความต้านทานแรงดึงสูงทำให้ทำงานด้วยความเร็วรอบที่สูงขึ้น เครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถทำหน้าที่เป็นมอเตอร์เมื่อกำลังชาร์จประจุหรือทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อกำลังคายประจุ (Mousavi et al., 2017)



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบล้อต้นกำลัง

ที่มาภาพ: (Liu and Li, 2020)

- 2) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ประกอบด้วยอิเล็กโทรด (electrodes) สองอิเล็กโทรดที่หุ้มฉนวนโดยตัวแยกไอออน (separator) ที่ซึมผ่านได้ อิเล็กโทรดต่างจากตัวเก็บประจุทั่วไปตรงที่อิเล็กโทรดจะถูกแช่ในอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) และความจุจะเกิดขึ้นจากประจุไฟฟ้าสถิตสะสมที่ส่วนต่อประสานระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อทำงาน สถานะการชาร์จอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วบวกไปยังขั้วลบผ่านวงจรโหลด สิ่งนี้ทำให้ไอออนบวก (cations) และไอออนลบ (anions) ในอิเล็กโทรไลต์รวมตัวกันในอิเล็กโทรดลบและขั้วบวกตามลำดับ ในสถานะการคายประจุ อิเล็กตรอนจะถ่ายโอนจากอิเล็กโทรดลบไปยังอิเล็กโทรดบวกผ่านวงจรโหลด ไอออนบวกและไอออนลบจะเริ่มผสมกันอีกครั้ง (González et al., 2016)



รูปที่ 2.3 แผนภาพตัวเก็บประจุยิ่งยวด

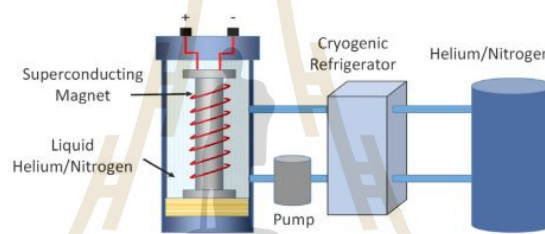
ที่มาภาพ: (Liu and Li, 2020)

- 3) แบตเตอรี่ เก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปของพลังงานเคมี โดยทั่วไป แบตเตอรี่ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ แอโนด (anode) แคโทด (cathode) และอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) แบตเตอรี่มีหลายประเภทขึ้นอยู่กับวัสดุเคมีที่ใช้ในอิเล็กโทรด เช่น

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (lead-acid batteries) แบตเตอรี่นิกเกิล (nickel-based batteries) แบตเตอรี่โซเดียม (sodium-based batteries) และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (lithium-ion batteries) เป็นต้น

- แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ประกอบด้วย ขั้วลบทำจากตะกั่วที่มีลักษณะพรุน และขั้วบวกที่ทำจากวัสดุตะกั่วไดออกไซด์ (lead dioxide) อิเล็กโทรดทั้งสองถูกคั่นด้วยตัวคั่น เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ประเภทอื่น แบตเตอรี่ตะกั่วกรดมีความหนาแน่นของพลังงานต่ำและรอบการทำงานจำกัด (Kreith and Goswami, 2017)
 - แบตเตอรี่นิกเกิล อิเล็กโทรดบวกและลบทำจากนิกเกิลไฮดรอกไซด์ (hydroxide) และแคดเมียม (cadmium) และอิเล็กโทรไลต์ทำจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide) ที่เป็นด่าง แบตเตอรี่นิกเกิลมีความต้านทานภายในต่ำ และสามารถทนต่ออัตราการชาร์จและคายประจุได้ดี และสามารถทำงานในโหมดการชาร์จอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่นิกเกิลมีความอันตรายสูงเนื่องจากมีส่วนประกอบของสารพิษอย่าง แคดเมียม
 - แบตเตอรี่โซเดียม อิเล็กโทรดขั้วบวกและอิเล็กโทรไลต์ทำจากกำมะถันหลอมเหลว และเซรามิกเบตาออลูมินาที่เป็นของแข็ง มีความหนาแน่นของพลังงานและพลังงานสูง แต่ไม่มีการคายประจุเอง ความสามารถในการหมุนเวียนที่ดัดเยี่ยม และต้นทุนต่ำ อย่างไรก็ตาม ข้อเสีย คือ ความต้องการอุณหภูมิในการทำงานที่สูง โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในช่วง 300–350°C (Hirai, 2019)
 - แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน การทำงานขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของไอออนลิเทียมจะย้ายจากอิเล็กโทรดบวกไปยังอิเล็กโทรดลบในกระบวนการชาร์จประจุและเดินทางกลับในกระบวนการคายประจุ เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดและนิกเกิล แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน มีแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่สูงกว่า ความหนาแน่นของพลังงานที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพการชาร์จที่สูงขึ้น และอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น (Liu et al., 2018)
- 4) เซลล์เชื้อเพลิง หรือเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน (hydrogen fuel cell) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าเคมีที่ผลิตไฟฟ้าโดยการรวมเชื้อเพลิงไฮโดรเจน (hydrogen) และออกซิเจน (oxygen) เข้าด้วยกัน ในทางเทคนิค สามารถผลิตไฟฟ้าได้แต่ไม่สามารถเก็บไฟฟ้าได้ ดังนั้นจะต้องติดตั้งระบบกักเก็บไฮโดรเจนเพื่อสร้างระบบการสร้างใหม่ (regenerative system) (Henok et al., 2020)

- 5) แม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด เก็บพลังงานไว้ในสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟตรงในขดลวดตัวนำยิ่งยวด เพื่อรักษาสถานะตัวนำยิ่งยวด ขดลวดจะถูกแช่ในฮีเลียมเหลว (liquid helium) และทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิที่เย็นจัด แสดงดังรูปที่ 2.4 เมื่อชาร์จพลังงานไฟฟ้าจะถูกแปลงเป็นพลังงานแม่เหล็กซึ่งสามารถเก็บไว้ในสนามแม่เหล็กได้อย่างไม่มีกำหนด พลังงานแม่เหล็กสามารถเก็บได้ไม่จำกัดเพราะไม่มีการเสื่อมสภาพของกระแสคอยล์ (coil) เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ประเภทอื่น แม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูง ความหนาแน่นของพลังงานสูง ประสิทธิภาพการชาร์จและการคายประจุที่รวดเร็ว และอายุการใช้งานยาวนานมาก (เกือบไม่สิ้นสุด) ข้อเสียเปรียบหลัก คือ ต้นทุนที่สูงและการสร้างแม่เหล็กไฟฟ้ามหาศาลเมื่อถูกใช้เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานขนาดใหญ่ (Henok et al., 2020)



รูปที่ 2.4 แผนภาพแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด

ที่มาภาพ: (Liu and Li, 2020)

2.3.1 ระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า

ระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าเป็นทางเลือกที่ดีในส่วนของความปลอดภัย การนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ และประสิทธิภาพโดยรวม เนื่องจากช่วยจัดการกระแสไฟฟ้าที่ไม่ต้องการในขณะลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียลง และการติดตั้งบนขบวนรถยังสามารถช่วยในรถไฟฟ้าทำงานในขณะที่ไม่เชื่อมต่อกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (centenary free) ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของการจัดการพลังงาน โดยพื้นฐานแล้วระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าทำการชาร์จประจุจากการเบรก และเมื่อรถไฟฟ้ามีความต้องการใช้พลังงานระบบจะทำการคายประจุเพื่อการเคลื่อนที่ โดยขนาด ชนิด และรูปแบบของอุปกรณ์เก็บพลังงานถูกปรับแต่งและออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานของระบบนั้น ๆ เช่น สำหรับการกักเก็บพลังงานนิยมใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการเก็บพลังงานที่เกิดจากการเบรก สำหรับใช้งานในระบบที่ไม่มีสายส่งกำลังไฟฟ้าใน

ระยะสั้น ๆ นิยมใช้รูปแบบผสมโดยใช้แบตเตอรี่ร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด เป็นต้น (Arboleya et al., 2016)

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

Feature	Cost	Life cycle	Availability	Safety	Recovery	Catenary free	Transmission efficiency	Provider dependency
Reversible	High	Medium	High	High	High	No	High	Low
Off-board	Medium	Medium	High	High	High	No	High	Low
On-board	Low	Medium	High	High	High	Yes	High	Low

โดยทั่วไปอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานเป็นที่นิยมในการติดตั้งบนหลังคาของขบวนรถไฟไฟฟ้าเนื่องจาก พื้นที่ภายในหรือด้านล่างของรถไฟฟ้ามียังจำกัดจึงไม่เหมาะสมและอาจจะเพิ่มภาระค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถถูกใช้งานในบางประเทศสำหรับขนส่งสาธารณะและมีอีกหลายหน่วยงานที่กำลังพิจารณา หรือทดสอบการใช้งาน โดยผลการประเมินเบื้องต้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาประยุกต์ใช้งานเนื่องจากข้อจำกัดด้านความปลอดภัย ประสิทธิภาพ และค่าใช้จ่าย ด้วยข้อจำกัดนี้ทำให้ล้อยูนกำลังไม่เป็นที่นิยม และแบตเตอรี่ไม่สามารถเทียบประสิทธิภาพกับตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้เนื่องจากอายุการใช้งานต่ำ (Khodaparastan et al., 2019) ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการพิจารณาอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้หลายรูปแบบ ดังนี้

Iannuzzi and Tricoli, 2010 นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าและลดค่าของกระแสไฟฟ้าในสายส่งโดยติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวด ข้อสรุปของบทความพบว่าตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้แล้วยังลดค่าของกระแสไฟฟ้าในอยู่ระดับที่ยอมรับได้

Allègre et al., 2010 นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดควบคู่กับตัวต้านทานเบรกในการจัดการพลังงานที่เกิดจากการเบรก เพื่อลดการใช้พลังงานของรถไฟฟ้ จากผลการวิจัยด้วยการทดลองแบบ real time ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถจ่ายพลังงานให้รถไฟฟ้เคลื่อนที่จากสถานีที่หนึ่งไปถึงสถานีถัดไปและยังสามารถเก็บพลังงานจากการเบรกได้

Ciccarelli et al., 2011 นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการลดการใช้พลังงานของรถไฟฟ้โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวด เมื่อติดตั้งบนขบวนรถทำให้มวลรวมของรถไฟฟ้เพิ่มขึ้นถึง 3.9% เมื่อพิจารณาพลังงานสามารถประหยัดไปได้ถึง 34%

Liu et al., 2018 นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถเพื่อเก็บสะสมพลังงานในการเบรก โดยคำนึงถึงน้ำหนักของขบวนรถติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่เพิ่มขึ้น ค่าการประหยัดพลังงานที่มีผลกระทบกับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 18.23%

2.3.2 เทคนิคการควบคุมระบบเก็บสะสมพลังงาน

มีงานวิจัยมากมายเป็นที่ยืนยันการติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานสามารถช่วยลดการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าได้จริง และยังสามารถเก็บสะสมพลังงานที่เกิดจากการเบรกได้ซึ่งในการทำงานของอุปกรณ์ยังมีส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่ง คือ เทคนิคการควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งการใช้เทคนิคในการควบคุมจะยิ่งส่งผลให้ระบบเก็บสะสมพลังงานมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการพิจารณาเทคนิคการควบคุมระบบเก็บสะสมพลังงาน ดังนี้

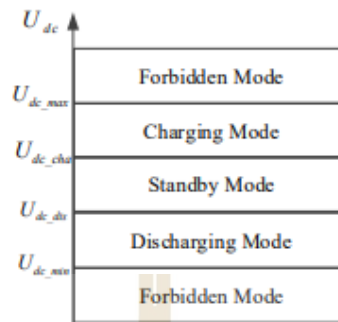
Iannuzzi and Tricoli, 2010 นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมในการสั่งการทำงานของอุปกรณ์ PWM เปิดปิดการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าอ้างอิงกับกระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเพื่อลดค่ายอดของกระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้ากำลังจ่ายให้กับระบบ

Palmieri et al., 2014 นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์การควบคุมตัวเก็บประจุยิ่งยวดสองวิธี ได้แก่ การควบคุมแรงดันป้อนกลับ (output feedback regulation) เป็นการวิเคราะห์โดยพิจารณาแรงดันไฟฟ้าแปรผันที่ 10% ของแอมพลิจูดแรงดันไฟฟ้าสายส่งเพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าตก และการควบคุมป้อนกลับแบบลูปปิด (state feedback close loop) เป็นการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าในสายส่งด้วยการเปิดใช้งานตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกโดยเทียบจากระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่กำหนด

Ratniyomchai, 2016 นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานด้วยวิธี Piece-wise linear SOC ซึ่งเป็นการควบคุมด้วยส่วนเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าเมื่อส่วนเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานมีมากกว่าส่วนเบี่ยงเบนต่ำสุดที่กำหนดอุปกรณ์จะเริ่มทำงาน โดยโหมดการทำงานชาร์จประจุหรือคายประจุจะถูกกำหนดด้วยทิศทางของส่วนเบี่ยงเบนที่เป็นบวกและลบ

Lin et al., 2016 นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ติดตั้งริมทาง ด้วยวิธีการควบคุมคาสเคด (cascade strategy control) เป็นการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสและควบคุมกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยแบ่งระดับของแรงดันไฟฟ้าเป็นโหมดการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.5 เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงต่าง ๆ ตัวเก็บ

ประจักษ์ยวดยจะทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบมีผลจากการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานการควบคุมแบบคาสเคด

ที่มาภาพ: (Lin et al., 2016)

Pellitteri et al., 2018 นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของตัวแปลงสองทิศทาง (bi-directional) สำหรับการควบคุมการคายประจุและชาร์จประจุของตัวเก็บประจักษ์ยวดยที่มีการเชื่อมต่อแบบขนาน 8 ชุด และเชื่อมต่อแบบอนุกรม 24 ชุด จุดประสงค์การควบคุมเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับบัสเชื่อมต่อตามความต้องการของโหลดทางไฟฟ้า ผลการจำลองแสดงประสิทธิภาพในการทำงานของชุดควบคุมสูงถึง 96%

จากการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเบรกจ่ายคืนพลังงานระบบเก็บสะสมพลังงาน การประยุกต์ระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งบนขบวนรถ และการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน มีงานวิจัยมากมายที่อธิบายและวิธีการทำงานที่เหมาะสมกับระบบรถไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าวิธีการเบรกแบบจ่ายคืนกริดจะมีประสิทธิภาพสูงแต่การส่งพลังงานคืนกลับมีผลเสียต่อสายส่ง ดังนั้นการเบรกจัดเก็บพลังงานจึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพรองลงมาและน่าสนใจ อีกทั้งการติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานบนขบวนรถสามารถแก้ปัญหากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้อีกด้วย ส่งผลให้ผู้วิจัยมีความสนใจในแนวทางการควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจักษ์ยวดยที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าให้ลดการใช้พลังงานของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าและมีการเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกของรถไฟฟ้า โดยวิธีการควบคุมแบบ Piece-wise linear SOC ซึ่งเป็นวิธีควบคุมด้วยส่วนเบี่ยงเบนของแรงดันไฟฟ้า

2.4 สรุป

บทที่ 2 นี้ได้นำเสนอการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ดำเนินการ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีการที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำผลการวิจัย ข้อเสนอต่าง ๆ มาประยุกต์และพัฒนาปรับใช้กับงานวิจัย โดยในบทถัดไปนำเสนอถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้



บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย 5 หัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง การควบคุมความเร็วรถ การเบรกจ่ายคืนพลังงาน และระบบสะสมพลังงานติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2 ระบบรถไฟฟ้า

รถไฟฟ้ามีลักษณะโครงสร้างไม่ต่างจากรถไฟธรรมดาแตกต่างกันที่รถไฟฟ้าไม่มีเครื่องยนต์ต้นกำลัง (prime mover) เหมือนเครื่องจักรไอน้าหรือเครื่องยนต์ดีเซลที่ติดตั้งอยู่บนตัวรถเหมือนรถไฟธรรมดา รถไฟฟ้าใช้พลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าซึ่งอาจมีการใช้พลังงานรูปแบบอื่น ๆ ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น ใช้พลังงานน้ำ แก๊สธรรมชาติ ถ่านหินชีวภาพ และพลังงานจากมวลชีวภาพ เป็นต้น เป็นข้อดีที่สามารถใช้แหล่งพลังงานต้นกำเนิดอย่างอื่นที่ไม่ใช่พลังงานจากฟอสซิล การขนส่งมวลชนทั่วโลกมีรายละเอียดปลีกย่อยอีกมากมาย เช่น รถไฟฟ้าใต้ดิน รถไฟฟ้าเหนือดิน หรือรถไฟฟ้ารางเดี่ยว เป็นต้น โดยยกตัวอย่างระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของมหานครใหญ่ที่สำคัญ เช่น

- 1) รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงลอนดอน มีจำนวนทั้งหมด 11 เส้นทาง รวม 270 สถานีรับส่งผู้โดยสารแสดงดังรูปที่ 3.1 รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงลอนดอนก่อตั้งในปี ค.ศ. 1843 โดยให้บริการในระบบแรงดันไฟฟ้าตัวนำบวก 420 Vdc และตัวนำลบ 210 Vdc ทำให้มีพิกัดแรงดัน 630 Vdc จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านระบบรางที่สี่ (four-rail) รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงลอนดอนแสดงดังรูปที่ 3.2
- 2) รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงปารีส ก่อตั้งในปี ค.ศ. 1845 ประกอบด้วยระบบรถไฟฟ้า 16 เส้นทาง มีจำนวนสถานีรับส่งผู้โดยสารทั้งหมด 303 สถานี แสดงดังรูปที่ 3.3 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงปารีสเป็นระบบที่มีผู้ใช้บริการมากเป็นอันดับสองของทวีปยุโรป มีระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบรางที่สาม (third-rail) ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 750 Vdc แสดงดังรูปที่ 3.4

3) รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงโตเกียว มีจำนวนทั้งหมด 121 เส้นทาง รวม 882 สถานีรับส่ง ผู้โดยสารแสดงดังรูปที่ 3.5 รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงโตเกียวให้บริการในปี ค.ศ. 1915 ระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านแป้นโทรกราฟ (pantograph) ระดับแรงดันไฟฟ้า 1500 Vdc แสดงดังรูปที่ 3.6 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงโตเกียวประกอบไปด้วยผู้ให้บริการหลากหลายบริษัท โดยบางบริษัทที่ให้บริการในเส้นทาง Ginza และ Marunouchi ใช้ระดับแรงดันไฟฟ้า 600 Vdc ผ่านรางที่สาม



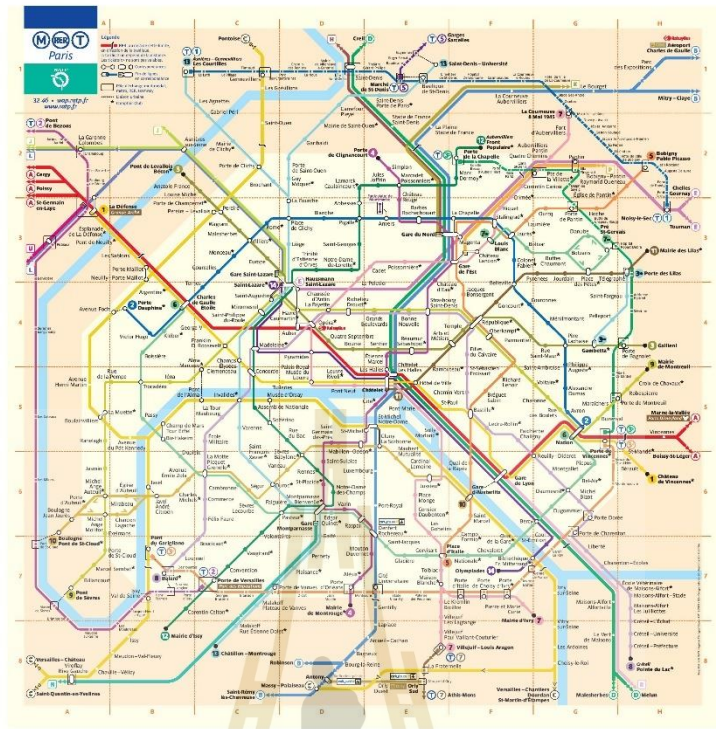
รูปที่ 3.1 แผนที่ให้บริการรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงลอนดอน

ที่มาภาพ: <https://www.tieweng.com/wp-content/uploads/2017/01> [เข้าถึงเมื่อ 10 มิ.ย. 2565]



รูปที่ 3.2 รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงลอนดอน

ที่มาภาพ: <https://www.nswrtm.org/-london/> [เข้าถึงเมื่อ 10 มิ.ย. 2565]



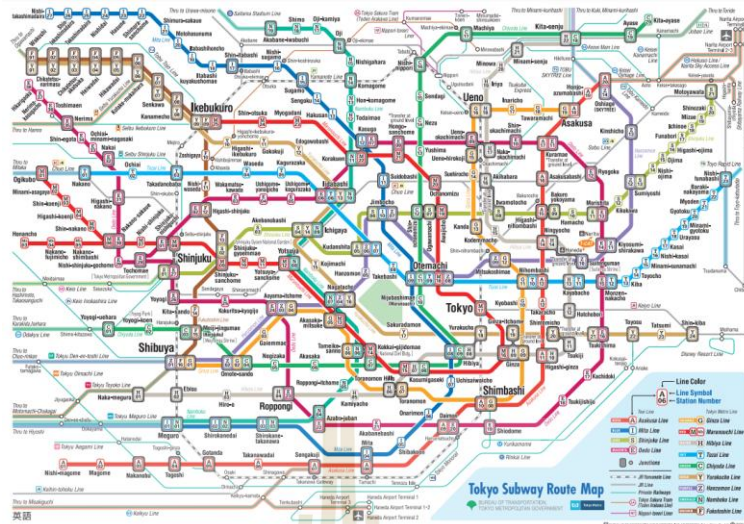
รูปที่ 3.3 แผนที่ให้บริการรถไฟฟ้ากรุงปารีส

ที่มาภาพ: <https://www.talontiew.com/free-paris-train-map> [เข้าถึงเมื่อ 10 มิ.ย. 2565]



รูปที่ 3.4 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงปารีส

ที่มาภาพ: <https://becommon.co/life/metro-in-berlin-paris-stockholm/> [เข้าถึงเมื่อ 10 มิ.ย. 2565]



รูปที่ 3.5 แผนที่ให้บริการรถไฟฟ้ากรุงโตเกียว

ที่มาภาพ: <https://www.tokyo-metro.jp/th/subwaymap/index.html> [เข้าถึงเมื่อ 10 มิ.ย. 2565]



รูปที่ 3.6 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงโตเกียว

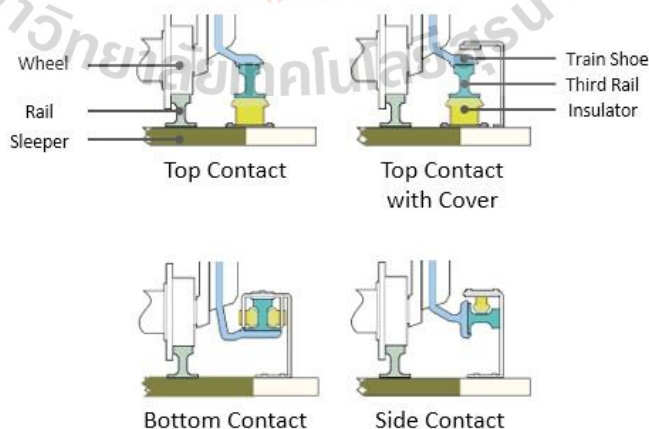
ที่มาภาพ: <https://www.brandbuffet.in.th/2022/02/jr-east-tested-driverless-train-in-tokyo/> [เข้าถึงเมื่อ 10 มิ.ย. 2565]

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟไฟฟ้ามีอยู่สองระบบ คือ ระบบไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) และระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current: AC) ส่วนการป้อนกระแสไฟฟ้าไปยังขบวนรถไฟเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมีสองระบบ คือ ระบบการใช้รางที่สาม (third rail system) และระบบใช้สายส่งเหนือศีรษะ (overhead wire system) ในส่วนของระบบรางที่สามมีข้อดีเรื่องความสวยงามในการติดตั้งเนื่องจากระดับการติดตั้งระดับต่ำ ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อมลพิษทาง

สายตา (visual impact) แต่มีข้อจำกัดด้านความปลอดภัย ระบบนี้มักถูกใช้กับรถไฟไฟฟ้าใต้ดินหรือระบบขนส่งมวลชนในเมืองที่ไม่มีสิ่งมีชีวิตเดินผ่านรางวิ่ง สำหรับสายส่งเหนือศีรษะจะตรงข้ามกัน มีการติดตั้งที่ระดับสูง ส่งผลกระทบต่อมลพิษทางสายตาแต่สามารถใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากกว่ารางที่สาม เหมาะสมกับการเดินรถไฟไฟฟ้าในระยะทางไกล (นคร, 2559)

3.2.1 ระบบรถไฟฟ้ายกแรง

ระบบรถไฟฟ้ายกแรงจะมีการรับไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำการปรับลดแรงดันไฟฟ้า และทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยหม้อแปลงเรียงกระแสที่สถานีเรียงกระแสไฟฟ้า (rectifier substation) หรือเรียกว่าสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction Substation: TSS) เพื่อส่งผ่านตัวนำไปยังรถไฟไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ กรณีที่ใช้แรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 750 V กระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านตัวนำรางที่สาม (third rail) กรณีที่ใช้แรงดันไฟฟ้ามากกว่า 750 V แต่ไม่เกิน 3000 V กระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านตัวนำสายส่งเหนือศีรษะ (overhead line) ระบบรถไฟฟ้ายกแรงทำงานภายใต้แรงดันต่ำจึงจำเป็นต้องติดตั้งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนทุก ๆ ระยะ 3-5 km ขึ้นอยู่กับขบวนรถที่เดินอยู่ในระบบ โดยระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยรางที่สามตัวรถจะมีอุปกรณ์ยื่นออกมาจากตัวรถเพื่อสัมผัสกับรางที่สามเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปบนขบวนรถและครบวงจรที่รางวิ่ง ซึ่งการรับกระแสไฟฟ้าผ่านรางที่สามมีทั้งแบบรับจากด้านบน (top contact) แบบรับจากด้านข้าง (side contact) และแบบรับจากด้านล่าง (bottom contact) แสดงดังรูปที่ 3.7 ลักษณะการใช้งานขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ติดตั้งใช้งาน ซึ่งการรับกระแสไฟฟ้าทั้งสามรูปแบบเป็นที่นิยมใช้งานเพราะมีโอกาสที่จะเกิดเหตุระบบขัดข้องได้น้อยกว่าวิธีอื่น ๆ (นคร, 2559)



รูปที่ 3.7 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้ารางที่สาม

ที่มาภาพ : <http://railsystem.net/third-rail> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตามมาตรฐาน EN 50163 หรือ IEC 60850 มีข้อกำหนดดังตารางที่ 3.1 ระดับแรงดันทำงานปกติของระบบจ่ายไฟฟ้าตามมาตรฐานจะมีแรงดันอยู่ในช่วง U_{min1} ถึง U_{max2} โดยการทำงานที่มีระดับแรงดันในช่วง U_{max1} ถึง U_{max2} ต้องมีค่าไม่เกิน 5 นาที และแรงดันทำงานในช่วง U_{min1} ถึง U_{min2} ต้องมีค่าไม่เกิน 2 นาที ที่สถานีจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถไฟฟ้าต้องมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าไร้โหลดของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนไม่เกิน U_{max2} มีข้อยกเว้นสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (regenerative braking) โดยสามารถมีค่าแรงดันได้ถึง 1000 V ในกรณีของระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้า 750 V และไม่เกิน 800 V ของระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้า 600 V จะใช้ในระบรถรางไฟฟ้าหรือรถโดยสารไฟฟ้าโทรลลี (กุลรวรานิชพงษ์, 2561)

ตารางที่ 3.1 แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานการจ่ายไฟตามมาตรฐาน EN 50163 หรือ IEC 60850

Electrification system	Lowest non-permanent voltage U_{min2} (V)	Lowest permanent voltage U_{min1} (V)	Nominal voltage U_n (V)	Highest permanent voltage U_{max1} (V)	Lowest non-permanent voltage U_{max2} (V)
d.c. (mean values)	400 500 ^c 1000 2000	400 500 1000 2000	600 ^a 750 1500 3000	720 900 ^c 1800 ^c 3600	800 1000 1950 3900 ^b
a.c. (r.m.s. values)	11000 17500 ^c	1200 19000 ^c	15000 25000	17250 27500	18000 29000
Special national conditions for France, see Annex B.					
a Future D.C. traction system for tramways and local railways should conform with nominal voltage of 750 V, 1500 V, 3000 V.					
b Special national conditions for Belgium, see Annex B.					
c Special national conditions for United Kingdom, see Annex B.					

3.2.2 ระบบรถไฟฟ้ายกแรงสลับ

ระบบรถไฟฟ้ายกแรงสลับที่นิยมใช้กันมาก คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้า 25 kV หรือเรียกว่าระบบ 25 kV single phase ซึ่งความถี่ (frequency) ตามระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าจะมีส่วนที่แตกต่างกันตามระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าของแต่ละประเทศ บางประเทศใช้ความถี่ 16 2/3 Hz เป็นระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าในอดีตที่ยังมีบางประเทศในทวีปยุโรปใช้งานถึงปัจจุบัน บางประเทศใช้ขนาดความถี่ 50 Hz และบางประเทศใช้ 60 Hz เป็นต้น ซึ่งในประเทศขนาดใหญ่อย่างสหรัฐอเมริกาใช้ขนาดความถี่ที่ 25 Hz นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งระบบรถไฟฟ้ายกแรงสลับที่ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 50 kV แต่ไม่แพร่หลาย แม้ว่ามีทฤษฎีและการกล่าวถึงว่าอาจจะช่วยประหยัดพลังงานค่าติดตั้งอุปกรณ์ภาคพื้นดินได้มากกว่า (นคร, 2559)

ระบบรถไฟฟ้ายกแรงสลับมีการรับกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเช่นเดียวกับระบบรถไฟฟ้ายกแรงตรงส่วนที่แตกต่าง คือ ไม่มีสถานีไฟฟ้าเรียงกระแส รับไฟฟ้าแรงสูงจากระบบส่งจ่ายจะถูกปรับลดแรงดันลงก่อนป้อนเข้าระบบจ่ายไฟของรถไฟฟ้ายกแรงที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้า 25 kV ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz ตามระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าแต่ละประเทศ กระแสไฟฟ้าที่ถูกปรับลดแรงดันไฟฟ้าลงจะถูกส่งจ่ายผ่านสายส่งเหนือศีรษะ (overhead contact wire) อุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟเรียกว่าสายลึง (pantograph) แสดงดังรูปที่ 3.8 ติดตั้งอยู่บนหลังคารถเพื่อสัมผัสกับสายส่งเพื่อรับกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะไหลกลับครบวงจรโดยรางวิ่ง



รูปที่ 3.8 สายส่งเหนือศีรษะและสายลึง

ที่มาภาพ : <http://www.trainweb.org/phillynrhs/RPOTD070315.html> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

สถานีเป็นจุดที่มีสำคัญมาก เพราะเป็นจุดที่รถไฟฟ้ายกกับระบบการจ่ายไฟฟ้ามาสัมผัสกัน ปกติสถานีจะยกขึ้นลงด้วยลมอัดที่มีแรงดันสูง การเคลื่อนที่เข้าสัมผัสและการแยกออกจากสายส่งต้องรวดเร็วมากเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟที่จะทำให้เกิดความเสียหาย เนื่องจากระบบรถไฟฟ้ายกกระแสสลับทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนมีพิสัยการจ่ายไฟ (feeding range) ได้ไกล จึงสามารถติดตั้งสถานีไว้ห่างกันได้ โดยปกติสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนอยู่ห่างกันประมาณ 50-100 km ขึ้นอยู่กับระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เลือกใช้และความหนาแน่นของขบวนรถในเส้นทาง

3.3 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย

ในประเทศไทยมีการให้บริการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนครั้งแรกในปี พ.ศ. 2542 โดยบริษัทขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ที่ได้รับการดูแลภายใต้หน่วยงานของกรุงเทพมหานคร (กทม.) ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบรถไฟฟ้ายกขนส่งมวลชนมีการเพิ่มเส้นทางเดินรถที่ได้รับการดูแลภายใต้การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) ในปัจจุบันประเทศไทยมีระบบรถไฟฟ้ายกขนส่งมวลชนอยู่ทั้งหมด 6 เส้นทาง โดยแบ่งเป็น

ระบบรถไฟฟ้ายกขนส่งมวลชนกระแสตรง

- 1) รถไฟฟ้าสายสีเขียวอ่อน หรือสายสุขุมวิท (สายเฉลิมพระเกียรติ 6 รอบพระชนมพรรษา สาย 1) ให้บริการในรูปแบบขนส่งมวลชนเร็ว ที่สถานีคูคต-เคหะฯ มีสถานีรับส่งผู้โดยสารทั้งหมด 47 สถานี มีระยะทางเดินรถ 53.58 km
- 2) รถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม หรือสายสีลม (สายเฉลิมพระเกียรติ 6 รอบพระชนมพรรษา สาย 2) ให้บริการในรูปแบบขนส่งมวลชนเร็ว ที่สถานีสนามกีฬาแห่งชาติ-บางหว้า มีสถานีรับส่งผู้โดยสารทั้งหมด 14 สถานี มีระยะทางเดินรถ 14.67 km
- 3) รถไฟฟ้าสายสีทอง ให้บริการในรูปแบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ที่สถานีกรุงธนบุรี-คลองสาน มีสถานีรับส่งผู้โดยสารทั้งหมด 3 สถานี มีระยะทางเดินรถ 1.80 km
- 4) รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน (สายเฉลิมรัชมงคล) ให้บริการในรูปแบบขนส่งมวลชนเร็ว ที่สถานีท่าพระ-หลักสอง มีสถานีให้บริการทั้งหมด 38 สถานี มีระยะทางเดินรถ 47.00 km
- 5) รถไฟฟ้าสายสีม่วง (สายฉลองรัชธรรม) ให้บริการในรูปแบบขนส่งมวลชนเร็ว ที่สถานีคลองบางไผ่-สถานีเตาปูน มีสถานีทั้งหมด 16 สถานี มีระยะทางเดินรถ 20.94 km

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสรูป

- 1) รถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงก์ ให้บริการในรูปแบบชานเมืองเชื่อมท่าอากาศยาน ที่สถานีสุวรรณภูมิ-พญาไท มีสถานีให้บริการทั้งหมด 8 สถานี มีระยะทางเดินรถ 28.60 km



รูปที่ 3.9 ลักษณะขบวนรถไฟฟ้ากระแสรูปในประเทศไทย

ที่มาภาพ : <https://metro.bemplc.co.th/MRT-System-Line> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]



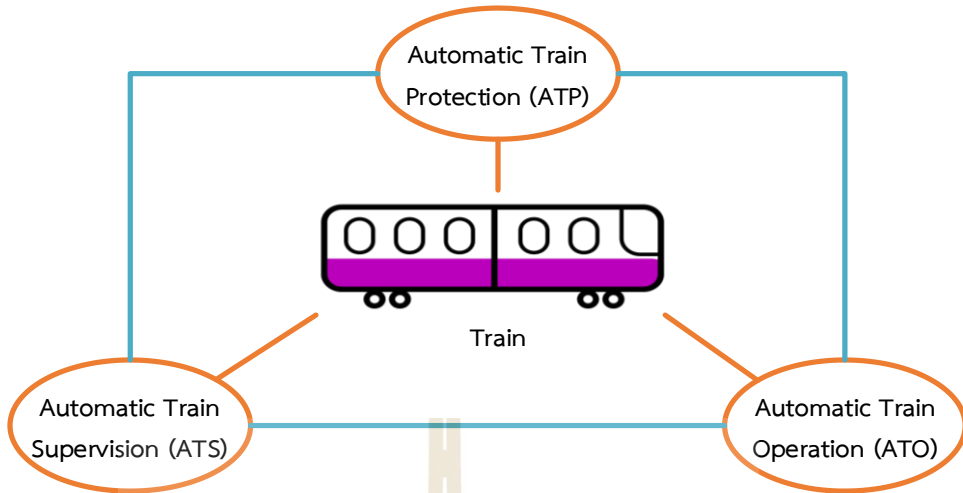
รูปที่ 3.10 ลักษณะขบวนรถไฟฟ้ากระแสรูปในประเทศไทย

ที่มาภาพ : <https://www.prachachat.net/property/news-345635> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

ระบบรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชนกระแสดตรงในไทยรับกระแสไฟฟ้าผ่านรางที่สามที่ขนาดแรงดัน 750 V แสดงดังรูปที่ 3.9 และระบบรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชนกระแสลับในไทยรับกระแสไฟฟ้าผ่านสายตัวนำเหนือศีรษะที่ขนาดแรงดัน 25 kV 50 Hz แสดงดังรูปที่ 3.10 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีพิกัดกำลังไฟฟ้าประมาณ 1-2 MW ต่อขบวนรถ รับไฟฟ้ากระแสตรงผ่านรางที่สามที่ระดับแรงดัน 750 V รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ระยะห่างระหว่างขบวนประมาณ 120 วินาที เมื่อมีการให้บริการรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชนหลายขบวนถึงกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัดเพื่อเร่งความเร็ว บางขบวนเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย บางขบวนกำลังทำการเบรก ส่งผลให้โหลดของรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชนมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา แตกต่างจากโหลดของสถานีจ่ายไฟฟ้าทั่วไป

3.4 การควบคุมรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชน

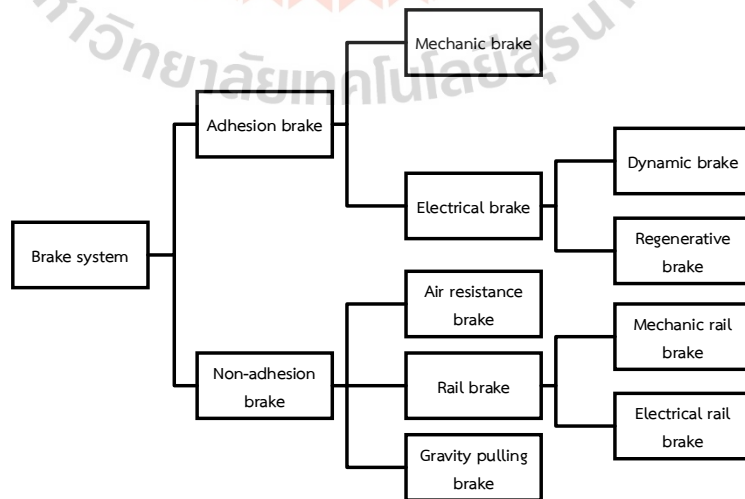
เทคโนโลยีการควบคุมการเดินรถในปัจจุบันเป็นเทคโนโลยีสำหรับควบคุมการเดินรถของรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชนและรถไฟความเร็วสูงเรียกว่า ระบบควบคุมขบวนรถไฟอัตโนมัติ (Automatic Train Control: ATC) การใช้งานระบบ ATC มีการใช้งานมาช่วงระยะเวลาหนึ่งแต่ในความหมายที่ต่างกัน ในประเทศอังกฤษ หมายถึง ระบบควบคุมการเดินขบวนรถอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นเพื่อเตือนคนขับรถไฟก่อนจะพัฒนาเป็นระบบเตือนอัตโนมัติ (Automatic Warning System: AWS) แต่ในอเมริกา หมายถึงแนวคิดในการควบคุมการเดินขบวนรถไฟสมัยใหม่ ส่วนมากใช้ในระบบขนส่งมวลชน ซึ่งหมายถึง การรวมกลุ่มอุปกรณ์สามกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มระบบป้องกันขบวนรถอัตโนมัติ (Automatic Train Protection: ATP) กลุ่มระบบเดินขบวนรถอัตโนมัติ (Automatic Train Operation: ATO) และกลุ่มบริหารการเดินรถอัตโนมัติ (Automatic Train Supervision: ATS) แสดงดังรูปที่ 3.11 ระบบ ATC ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมการเดินรถ 3 กลุ่ม ได้แก่ ATP ทำหน้าที่ควบคุมการเดินรถในเบื้องต้น ทำหน้าที่จัดระยะห่างที่ปลอดภัยระหว่างรถที่เดินอยู่บนทางรถไฟเดียวกัน โดยมีศูนย์การควบคุมการเดินรถจะได้รับข้อมูลจากตอนสัญญาณข้างหน้ามาคำนวณพิกัดความเร็วของขบวนรถที่เดินอยู่บนตอนสัญญาณที่ควบคุม แล้วส่งพิกัดความเร็วให้กับขบวนรถที่วิ่งผ่าน ศูนย์ควบคุมในระบบ ATP ในระบบ ATC จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์ในระบบ ATS เพื่อเปรียบเทียบขบวนรถวิ่งช้าหรือเร็วกว่ากำหนดเวลา ในกรณีนี้ ATS จะส่งคำสั่งไปยัง ATO ตามรายการเพื่อปรับแต่งการเดินรถให้ตรงตามเวลา จุดรับส่งสัญญาณ ATO รับคำสั่งจากระบบ ATS เพื่อกำหนดว่าขบวนรถควรจะหยุดใช้เวลารับส่งผู้โดยสารนานเท่าใด และควรใช้ความเร็วเท่าใดเดินทางไปยังสถานีต่อไปจึงสามารถรักษากำหนดเวลาเดินรถ เพิ่มความเร็วในกรณีรถช้า ลดความเร็วในกรณีรถเร็ว (นคร, 2559)



รูปที่ 3.11 ระบบควบคุมขบวนรถไฟไฟฟ้า

3.5 การเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน

ระบบเบรกสำหรับรถไฟไฟฟ้าแบ่งแยกได้ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ เบรกโดยใช้แรงเสียดทานระหว่างล้อกับราง (adhesion brake) และเบรกโดยไม่ใช้แรงเสียดทานระหว่างล้อกับราง (non-adhesion brake) ซึ่งทั้งสองรูปแบบสามารถจำแนกออกได้ดังรูปที่ 3.12 สำหรับกลุ่มของการเบรกแบบไม่ใช้แรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางส่วนใหญ่จะใช้เป็นระบบเสริมเพื่อเพิ่มความปลอดภัย เช่น ระบบเบรกราง (rail brake) และระบบเบรกอากาศ (air resistance brake) ระบบเบรกเหล่านี้ไม่สิ้นเปลืองเพราะไม่มีการเสียดสีระหว่างจานเบรกกับผ้าเบรก และสามารถเบรกได้อย่างรุนแรงโดยไม่ต้องกลัวล้อจับตาย ทำให้ระยะเบรกสั้น



รูปที่ 3.12 ประเภทของระบบเบรก

ที่มาภาพ: (นคร, 2559)

การเบรกโดยใช้แรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางสามารถแยกเป็น เบรกทางกล (mechanic brake) และเบรกไฟฟ้า (electrical brake) รายละเอียดดังนี้

- 1) เบรกทางกล คือ ระบบเบรกแบบดั้งเดิมซึ่งมีวิวัฒนาการมาพร้อมการสร้างรถไฟ ใช้วิธีสร้างให้เกิดแรงเสียดทานโดยการบังคับเบรกไปกดแผ่นเบรกหรือผ้าเบรกลงบนพื้นล้อหรือจานเบรก
- 2) เบรกไฟฟ้า คือ ระบบที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ช่วยสนับสนุนการทำงานของเบรกทางกล เพราะเบรกไฟฟ้าไม่มีการสึกหรอ เบรกไฟฟ้ายังสามารถแยกตามระบบการทำงานได้ 2 ชนิด คือ 1) ไดนามิกเบรก (dynamic brake) ใช้กลับขบวนรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์โดยเปลี่ยนจากมอเตอร์หมุนล้อเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งถูกลัดหมุนแล้วนำกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปผ่านชุดความต้านทาน (resistor) ซึ่งทำให้เกิดความร้อนและถูกชุดพัดลมระบายความร้อนกำจัดทิ้งไปในอากาศ เบรกไฟฟ้าแบบไดนามิกจะมีประสิทธิภาพสูงเฉพาะอยู่ในช่วงความเร็วสูง เมื่อความเร็วลดลงต่ำระดับหนึ่งแล้วอุปกรณ์จะตัดไดนามิกเบรกออก เหลือเพียงเบรกทางกล และ 2) เบรกจ่ายคืนพลังงาน (regenerative brake) ใช้หลักการเดียวกับไดนามิกเบรก เพียงแต่ไม่ระบายความร้อนแต่นำพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปขับเคลื่อนขบวนรถคันอื่นที่อยู่ใกล้เคียง หรืออาจนำไปเก็บสะสมในอุปกรณ์ก็เก็บพลังงานแล้วนำกลับมาใช้ในขณะทำการเคลื่อนที่

3.6 อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานของระบบรถไฟฟ้

ปัจจุบันระบบเก็บสะสมพลังงาน (Energy Storage System: ESS) ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงเป็นที่ยอมรับอย่างมาก และถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อแก้ไขปัญหาตามวัตถุประสงค์ที่หลากหลายในระบบไฟฟ้ากำลัง การนำอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานมาประยุกต์ใช้ในระบบรถไฟฟ้เพื่อวัตถุประสงค์ รักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ ลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดระหว่างการเร่งความเร็ว เพื่อใช้กำลังไฟฟ้าจากรถไฟเป็นแหล่งจ่าย โดยในทั่วไปประโยชน์หลักของ ESS ในระบบรถไฟฟ้ คือ การจัดเก็บพลังงานที่เกิดจากการเบรกและถูกนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟ (Ratniyomchai et al., 2014) ระบบกักเก็บพลังงานสามารถติดตั้งได้ทั้งบนขบวนรถไฟ (on-board) ติดตั้งกับสถานีกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน (stationary) หรือติดตั้งเฉพาะจุดริมทาง (wayside) การใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความต้องการของแต่ละกรณีที่แตกต่างกัน ในปัจจุบันตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นที่ยอมรับและมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในระบบรถไฟฟ้ขนส่งมวลชน

3.6.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

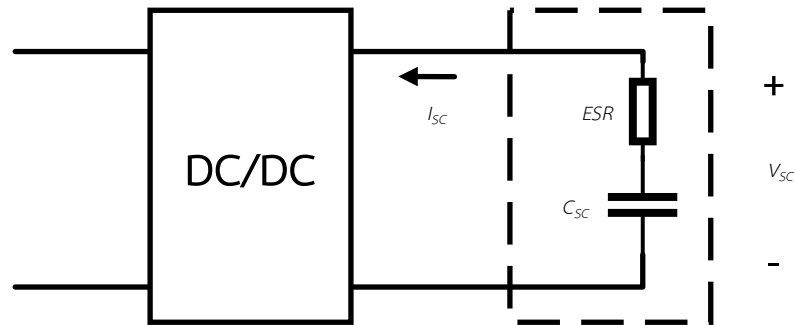
ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่เป็นเทคโนโลยีใหม่และเป็นที่ได้รับความนิยมสูงอย่างมาก ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีคุณสมบัติพิเศษที่มีค่าความจุไฟฟ้าสูงกว่าอุปกรณ์อื่น ๆ มากถึง 100-10000 เท่า ทั้งยังสามารถอัดประจุให้เต็มได้ภายในระยะเวลาสั้น ๆ เพียง 1-10 วินาที เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ต้องใช้เวลาถึง 10-60 นาที และการคายประจุสามารถทำได้ภายในเวลาเพียง 1 วินาที จุดเด่นของตัวเก็บประจุยิ่งยวด คือ อายุการใช้งานที่สามารถมีวงจรรอบการใช้งาน (life cycle) ได้มากกว่า 500000 รอบ ซึ่งมากกว่าวงรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถึง 100 เท่า แล้วมากกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด 10000 เท่า ยังมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แรงกระแทกสั่นสะเทือนได้ดี ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นจึงทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นที่สนใจอย่างมากในปัจจุบัน มีการพัฒนาคุณสมบัติและงานวิจัยมากมายเกี่ยวกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด ในด้านการขนส่งมวลชนที่มีการเบรกเพื่อจอดที่สถานีรับส่งผู้โดยสารและมีการเร่งความเร็วบ่อยครั้ง การนำตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาติดตั้งในระบบรถไฟฟ้าเพื่อเก็บสะสมพลังงานที่เกิดจากการเบรกและคายประจุในช่วงที่รถไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่จากสถานีเป็นสิ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ตัวอย่างของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับรถไฟฟ้า

ที่มาภาพ: <https://www.spacap.com/mass-transportation> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำงานร่วมกับวงจรแปลงผันสองทาง (DC-DC bidirectional converter) ดังรูปที่ 3.14 โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีค่าความต้านทานภายใน (Equivalent Series Resistance: ESR) ต่ำทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียภายในขณะชาร์จประจุหรือคายประจุไม่มากนัก (Sutphrom, 2019)



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ที่มาภาพ: (Sutphrom, 2019)

พลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดคำนวณได้ดังสมการที่ (3.1) และกำลังไฟฟ้าสูงสุดคำนวณได้ดังสมการที่ (3.2)

$$E_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc}^2 \quad (3.1)$$

$$P_{sc,max} = \frac{1}{4} \frac{V_{sc}^2}{ESR} \quad (3.2)$$

โดยที่ E_{sc} คือ พลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Wh)
 C_{sc} คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)
 V_{sc} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุยิ่งยวด (V)
 $P_{sc,max}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (W)

สถานะประจุ (State of Charge: SOC) ของระบบเก็บสะสมพลังงาน คือ สถานะของพลังงานที่สะสมภายในระบบเก็บสะสมพลังงานเทียบกับพลังงานสูงสุดของระบบเก็บสะสมพลังงาน สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.3) ความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge: DOD) คือ ร้อยละของพลังงานสะสมที่ถูกใช้งาน หรือคายประจุ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.4)

$$SOC = \frac{E_{sc}}{E_{sc,max}} 100 = \frac{\frac{1}{2} C_{sc} V_{sc}^2}{\frac{1}{2} C_{sc} V_{sc,max}^2} 100 \quad (3.3)$$

$$DOD = \left(1 - \frac{E_{SC}}{E_{SC,max}}\right) 100 \quad (3.4)$$

ปัจจุบันเทคโนโลยีของตัวเก็บประจุยิ่งยวดถูกพัฒนาขึ้นอย่างแพร่หลาย ซึ่งสามารถนำตัวเก็บประจุยิ่งยวดประยุกต์ให้เข้ากับความเหมาะสมในการทำงานตามวัตถุประสงค์ โดยในการประยุกต์ใช้งานจำเป็นต้องคำนึงถึง พลังงานรวมของโมดูล (module) แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของโมดูล และกระแสไฟฟ้าสูงสุดของโมดูล โดยสามารถออกแบบและพิจารณาได้ดังสมการที่ (3.5)-(3.7)

$$N_{total} = \frac{E_{module}}{E_{SC,max}} \quad (3.5)$$

$$N_{series} = \frac{V_{module}}{V_{SC,max}} \quad (3.6)$$

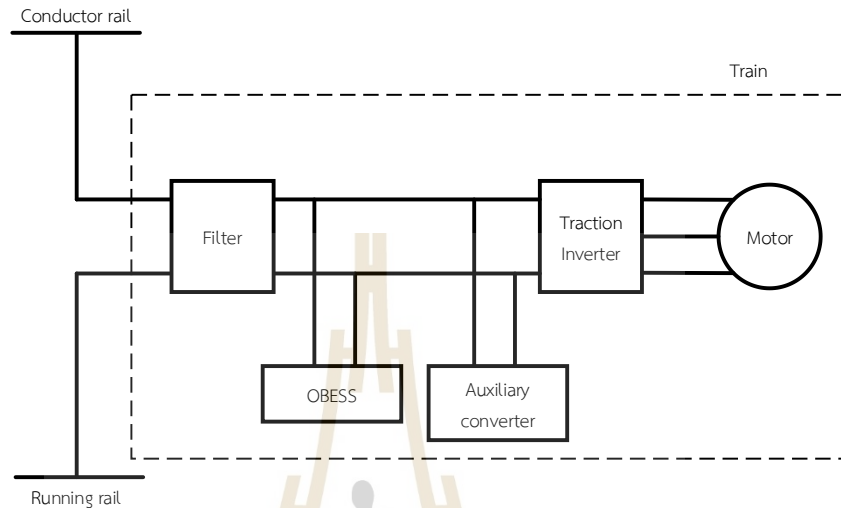
$$N_{parallel} = \frac{I_{module}}{I_{SC,max}} \quad (3.7)$$

โดยที่	N_{total}	คือ จำนวนตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้งหมด
	$N_{parallel}$	คือ จำนวนตัวเก็บประจุยิ่งยวดอนุกรม
	N_{series}	คือ จำนวนตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาน
	$E_{sc,module}$	คือ พลังงานของโมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Wh)
	$V_{sc,module}$	คือ แรงดันไฟฟ้าของโมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด (V)
	$I_{sc,module}$	คือ กระแสไฟฟ้าของโมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด (A)

3.6.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า

ระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถไฟ (On-board Energy Storage System: OBESS) เป็นระบบที่เหมาะสมในการติดตั้งให้กับระบบขนส่งมวลชนในเมือง เนื่องจากสถานที่ในการติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าหรือการติดตั้งเฉพาะจุดริมทางมีจำกัด อีกทั้งการติดตั้งบนขบวนยังมีประสิทธิภาพในการลดกำลังสูญเสียที่เกิดในสายส่งตัวนำได้ ยิ่งไปกว่านั้นการจัดการพลังงานคืนกลับง่ายกว่าด้วยการติดตั้งที่อิสระไม่เกี่ยวข้องกับระบบส่งจ่าย จากการศึกษาการใช้พลังงานขับเคลื่อนสามารถลดประมาณ 15%-30% (Ciccarelli et al., 2012; González-Gil, 2014) แต่ข้อเสีย คือ การติดตั้งบน

ขบวนรถไฟอาจทำให้พื้นที่ในการโดยสารลดลงและน้ำหนักของรถไฟเพิ่มขึ้น (Iannuzzi and Tricoli, 2010) แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของรถไฟติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของรถไฟติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ

3.7 สรุป

ในบทนี้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ รายละเอียดของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรง กระแสสลับ การควบคุมรถไฟฟ้า ระบบเบรกจ่ายคืนกำลังงาน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีสะสมพลังงาน ซึ่งเป็นรายละเอียดสำคัญสำหรับทำความเข้าใจ และเป็นความรู้พื้นฐานที่ถูกนำมาพัฒนาและประยุกต์ในบทถัดไป โดยในบทถัดไปกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรง และวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 4

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรง

4.1 บทนำ

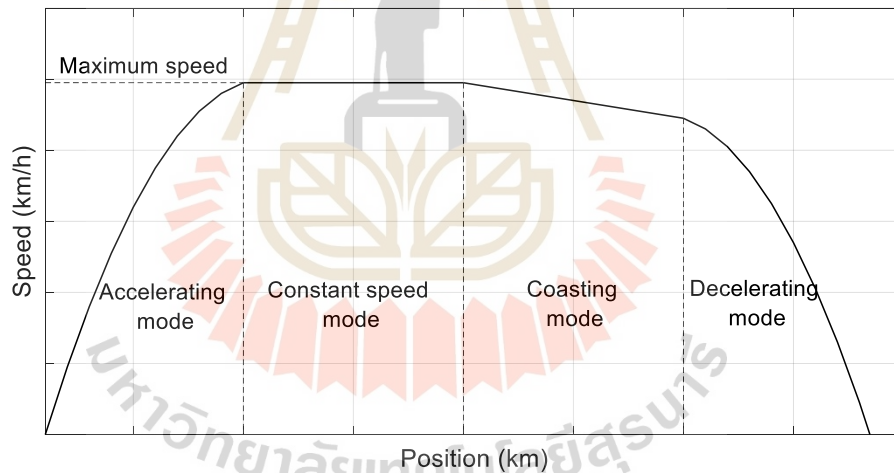
การศึกษาเกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรงมีความซับซ้อนและข้อจำกัดในการทดสอบจริง การนำคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงเข้ามาเป็นเครื่องมือในการพัฒนาโปรแกรมช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์แบบจำลองการทำงานของรถไฟฟ้าในสถานการณ์ต่าง ๆ ช่วยให้ทราบถึงพฤติกรรมของระบบรถไฟฟ้า โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายและสะดวกต่อการปรับปรุงการทำงาน ความถูกต้องของผลการจำลองขึ้นกับการสร้างแบบจำลองให้ใกล้เคียงความเป็นจริงในทางปฏิบัติ ในวิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรง 1 ขบวน โดยแบ่งเป็นการคำนวณสมรรถนะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า การคำนวณกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน การคำนวณผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้ากระแสดตรง วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าภายใต้การวิเคราะห์แบบโนด และนำเสนอผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรงที่ใช้ข้อมูลของรถไฟฟ้าสายสีม่วง (สายฉลองรัชธรรม) เป็นกรณีศึกษา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2 การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

รูปแบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเป็นไปตามลักษณะของเส้นโค้งความเร็วต่อเวลา สามารถแบ่งโหมดการเคลื่อนที่ออกเป็น 4 โหมด ได้แก่ โหมดเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง (accelerating mode) โหมดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (constant speed mode) โหมดเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย (coasting mode) และโหมดการเบรก (decelerating mode or braking mode) แสดงดังรูปที่ 4.1 การคำนวณและการจำลองผลการเคลื่อนที่เริ่มจากการสร้างแบบจำลองให้รถไฟฟ้าหยุดนิ่งที่สถานีต้นทางรถไฟฟ้าเริ่มเคลื่อนที่โดยมีการจ่ายพลังงานให้กับขบวนรถเพื่อทำการเร่งความเร็วเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 4.2 ความเร่งที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ที่ต้องไม่เกินความเร่งสูงสุดของรถไฟฟ้า แรงจุดที่ใช้ตลอดการเคลื่อนที่ที่ต้องไม่เกินแรงยึดเกาะที่เกิดระหว่างล้อรถกับรางวิ่งจนทำให้รถไฟฟ้าเกิดการลื่นไถล (กุลวรรวานิชพงษ์, 2561)

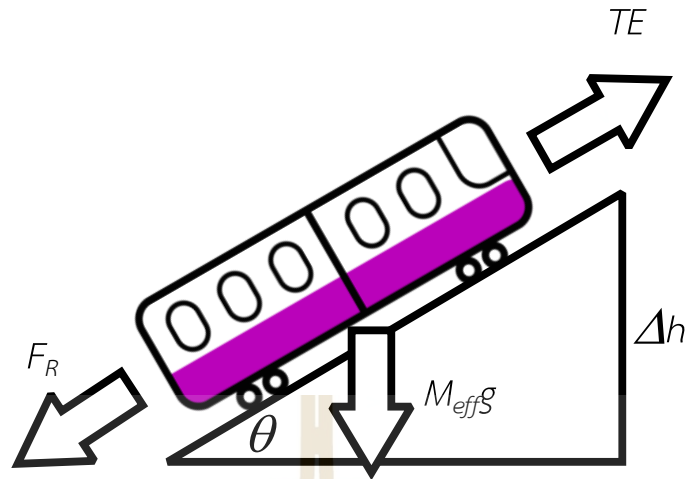
โหมดการทำงานของรถไฟฟ้า

- 1) โหมดเร่งความเร็ว คือ การที่รถไฟฟ้ารับพลังงานผ่านสายส่งตัวนำเพื่อเพิ่มแรงบิดให้กับมอเตอร์ในสถานะหยุดนิ่ง ความเร็วของรถไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกในช่วงมากกว่าศูนย์ถึงความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้า เมื่อความเร็วของรถไฟฟ้าถึงความเร็วที่ทำงานของรถไฟฟ้าจะเข้าสู่โหมดความเร็วคงที่
- 2) โหมดความเร็วคงที่ คือ การที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่โดยการรักษาความเร็วทำงานที่ความเร็วเป็นศูนย์ จนกระทั่งถึงตำแหน่งโหมดการเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉื่อย
- 3) โหมดความเฉื่อย คือ การที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็วที่ลดลงเนื่องจากแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าและค่าแรงเฉื่อยเป็นศูนย์
- 4) โหมดเบรก คือ การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจะลดความเร็วด้วยความหน่วงหรือความเร่งที่มีค่าเป็นลบในช่วงมากกว่าศูนย์ถึงค่าความหน่วงสูงสุด เพื่อเข้าจอดที่สถานีรับส่งผู้โดยสารหรือลดความเร็วเพื่อไม่ให้รถไฟฟ้ามีความเร็วเกินความเร็วทำงานที่กำหนด



รูปที่ 4.1 โหมดการทำงานของรถไฟฟ้า

รูปที่ 4.2 รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ตามรางที่ทำมุม θ กับแนวระดับ ด้วยความเร่ง แรงกระทำที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ประกอบด้วย แรงฉุดของหัวรถจักร (Tractive Effort: TE) และแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า (Resistance Force: F_{fric}) ซึ่งแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าประกอบด้วยแรงต้านการวิ่ง (Running Resistance Force: F_R) และแรงต้านเกรเดียนต์ (Gradient Force: F_{grad}) สมการในการคำนวณพิจารณาจากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันดังสมการที่ (4.1) และ (4.2)



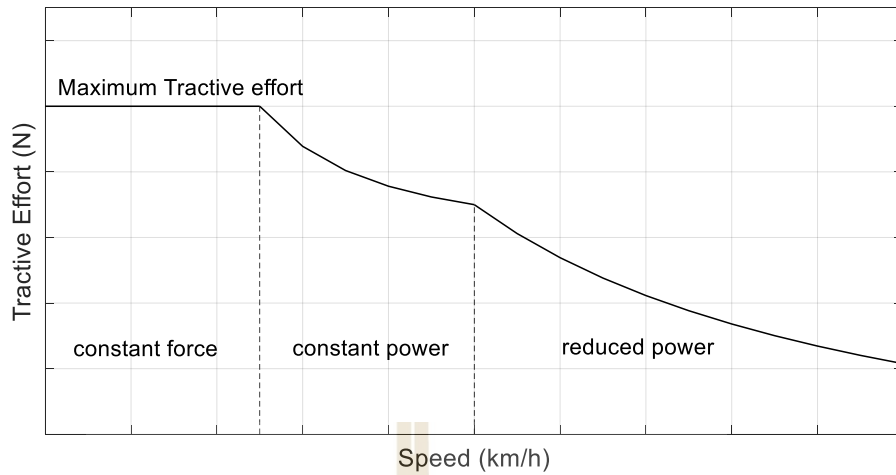
รูปที่ 4.2 แผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

ที่มาภาพ: (สัมภาระคู่ป, 2560)

$$F = TE - F_{fric} \quad (4.1)$$

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

แรงฉุดของหัวรถจักรที่แสดงในรูปที่ 4.2 แรงเกิดจากแรงบิดของมอเตอร์ที่ถูกออกแบบการทำงานให้เหมาะสมกับรถไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าควรมีแรงฉุดไม่เกินแรงยึดเกาะของรถไฟฟ้ายกกับรางวิ่งเพื่อไม่ให้เกิดการลื่นไถล ดังนั้นแรงฉุดของรถไฟฟ้าแปรผันตามความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยที่แรงฉุดของรถไฟฟ้าจะลดลงเมื่อรถไฟฟ้ามี่ความเร็วเพิ่มขึ้น ความเร็วฐานเป็นความเร็วช่วงเริ่มเกิดการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ามี่การใช้แรงฉุดสูงสุดในการเคลื่อนที่และลดลงเมื่อความเร็วมากกว่าความเร็วฐาน สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรงฉุดคงที่ (constant force) ช่วงกำลังงานคงที่ (constant power) และช่วงกำลังงานลดทอน (reduced power) (กุลวรวานิชพงษ์, 2561)



รูปที่ 4.3 ลักษณะสมบัติแรงฉุดของหัวรถจักร

แรงต้านการวิ่งของรถไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการเสียดสีระหว่างล้อรถไฟกับรางวิ่ง และแรงต้านอากาศที่กระทำต่อขบวนรถ ผู้ผลิตนิยมระบุค่าแรงต้านอากาศรวมกับแรงต้านการวิ่งเพราะถือว่าเป็นลักษณะเฉพาะของขบวนรถที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางเดินรถ แรงต้านการเคลื่อนที่สามารถคำนวณด้วยสมการที่ (4.3) สมการกำลังสองหรือที่เรียกว่าสมการเดวี (Devis equation)

$$F_R = A + Bv + Cv^2 \quad (4.3)$$

โดยที่ A, B และ C คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์เดวี (kN), (kN/km) และ (kNh²/km²)
 v คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (km/h)

สมการ (4.3) ได้จากการทำ curve fitting จากข้อมูลทดสอบของระบบรถไฟฟ้า ของแต่ละขบวนต่าง ๆ ทั่วโลกได้พัฒนาสมการเดวีเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณให้เหมาะสมกับลักษณะของขบวนรถไฟนั้น ๆ

แรงต้านแรงเสียดทานของรถไฟฟ้าเกิดจากการลากขบวนรถไฟฟ้าที่มีน้ำหนักมากไปบนเส้นทางวิ่ง โดยทั่วไปรถไฟฟ้ามหานครระดับเกรดหรือความชันของเส้นทางค่อนข้างน้อย แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงระดับความชันบ่อยครั้ง การคำนวณแรงต้านแรงเสียดทานต้องคำนึงถึงลักษณะการจัดรูปแบบของขบวนรถ โดยทั่วไปการคำนวณแรงต้านแรงเสียดทานในแบบจำลองอย่างง่ายจะจำลองให้รถไฟเป็นจุดมวล (mass point) แต่เพื่อให้มีความใกล้เคียงความเป็นจริงจึงมีการพิจารณาแบบ

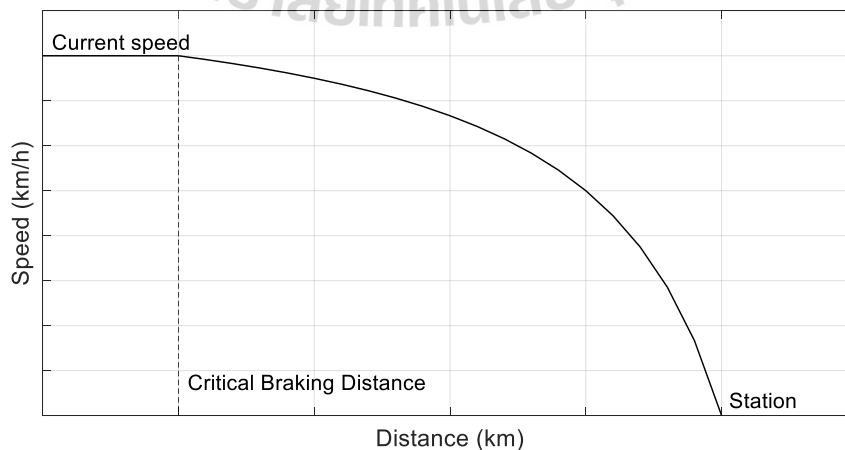
กระจายมวลตัวรถไฟฟ้าตลอดทั้งขบวน ดังสมการที่ (4.4) เนื่องจากระดับความชันของเส้นทางน้อยมากจึงประมาณให้องศาความชันเป็นผลหารของส่วนต่างระดับความสูงกับช่วงของระยะความชัน (สัมภาวะคุปต์, 2560)

$$F_{grad} = M_{eff} g \sin \theta \approx \frac{M_{eff} g \Delta h}{L} \quad (4.4)$$

$$M_{eff} = M_t (1 + \lambda_w) + M_l \quad (4.5)$$

โดยที่	M_{eff}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของน้ำหนักรถไฟฟ้า (kg)
	g	คือ แรงโน้มถ่วงโลก (m^2/kg^2)
	Δh	คือ ส่วนต่างระดับความสูง (m)
	L	คือ ระยะความชัน (m)
	M_t	คือ น้ำหนักรถเปล่า (kg)
	M_l	คือ น้ำหนักรวมผู้โดยสาร (kg)
	λ_w	คือ ตัวประกอบการหมุน

เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้าใกล้สถานีรับส่งผู้โดยสาร ก่อนที่รถไฟฟ้าจะทำงานในโหมดเบรก รถไฟฟ้าทำการคำนวณหาตำแหน่งเบรกหรือที่เรียกว่าระยะวิกฤตเบรก (Critical Braking Distance: CBD) เพื่อการจอดที่สถานีรับส่งผู้โดยสารอย่างแม่นยำ (สัมภาวะคุปต์, 2560) แสดงดังรูปที่ 4.4 และสามารถคำนวณระยะเริ่มเบรกได้จากสมการที่ (4.6)

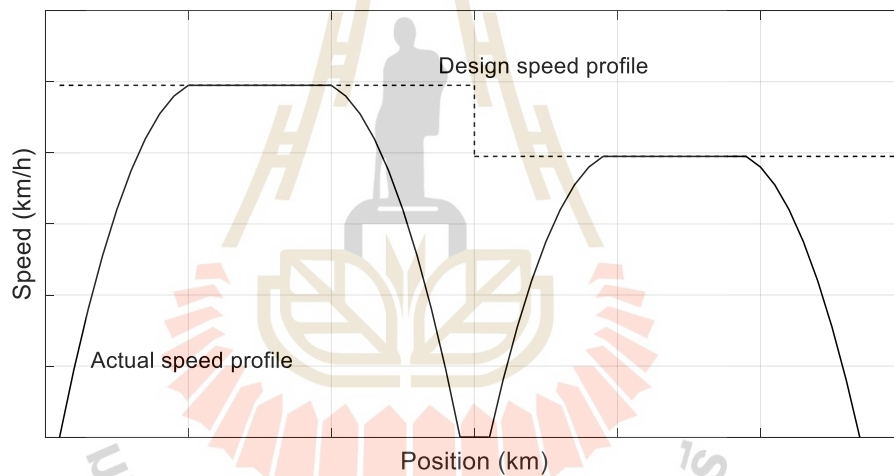


รูปที่ 4.4 แผนภาพระยะวิกฤตการเบรก

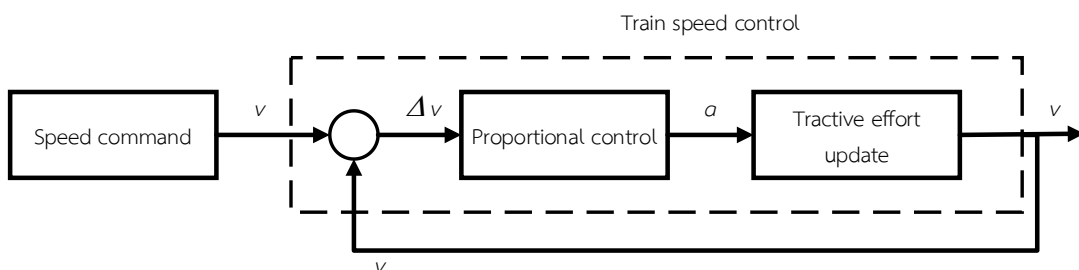
$$CBD = -\frac{v^2}{2a_{dec}} \quad (4.6)$$

โดย v คือ ความเร็วของรถไฟในขณะนั้น (m/s)
 a_{dec} คือ อัตราเบรก (m/s²)

ในงานวิจัยนี้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟาส่งมวลชนเป็นการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ให้วิ่งตามเส้นความเร็วที่ได้ทำการออกแบบ (design speed profile) แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยใช้หลักการออกแบบเส้นความเร็วจากระยะเวลาเดินทางในแต่ละช่วงสถานีรับส่งผู้โดยสารโดยคำนึงถึงความเร็วที่รถไฟสามารถเดินทางไปถึงสถานีถัดไปได้ตรงเวลาตามตารางเวลา ซึ่งการควบคุมค่าความเร่งจากค่าความเร็วที่กำหนดในแต่ละช่วงสถานีแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 การออกแบบเส้นโค้งความเร็ว



รูปที่ 4.6 การควบคุมความเร็วของรถไฟ

4.3 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่

กำลังไฟฟ้าที่รถไฟพลังงานส่งมวลชน (Train Power Consumption: P_{Trcon}) ใช้ในการเคลื่อนที่ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ กำลังไฟฟ้าลากจูง (Tractive Power: P_{tr}) กำลังไฟฟ้าเสริม (Auxiliary Power: P_{aux}) ที่เกิดจากระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ ระบบส่งสัญญาณ และอื่น ๆ และกำลังไฟฟ้าจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานบนขบวนรถ (On-board Energy Storage Power: P_{OBESS}) ดังสมการที่ (4.7) โดยกำลังไฟฟ้าลากจูงขึ้นอยู่กับค่าแรงฉุดที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่ (TE) ความเร็วของรถไฟ (v) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า (η) ดังสมการที่ (4.8) กำลังไฟฟ้าจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานบนขบวนรถสามารถคำนวณจากผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (V_{SC}) กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (I_{SC}) และประสิทธิภาพของอุปกรณ์ (η_{SC}) ดังสมการที่ (4.9) โดยเมื่อรถไฟทำการเร่งความเร็วอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจะทำการคายประจุไฟฟ้าส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลออกจากตัวอุปกรณ์ ในทางกลับกันเมื่อรถไฟทำการเบรกส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าอุปกรณ์เพื่อเป็นการชาร์จประจุไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่ออุปกรณ์ไม่อยู่ในเงื่อนไขของโหมดการทำงาน

$$P_{Trcon} = P_{tr} + P_{aux} + P_{OBESS} \quad (4.7)$$

$$P_{tr} = \begin{cases} \frac{TE \cdot v}{\eta} & ; a > 0 \\ 0 & ; a = 0 \\ TE \cdot v \cdot \eta & ; a < 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

$$P_{OBESS} = \begin{cases} \frac{V_{SC} \cdot I_{SC}}{\eta_{SC}} & ; a < 0 \\ 0 & ; a = 0 \\ V_{SC} \cdot I_{SC} \cdot \eta_{SC} & ; a > 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

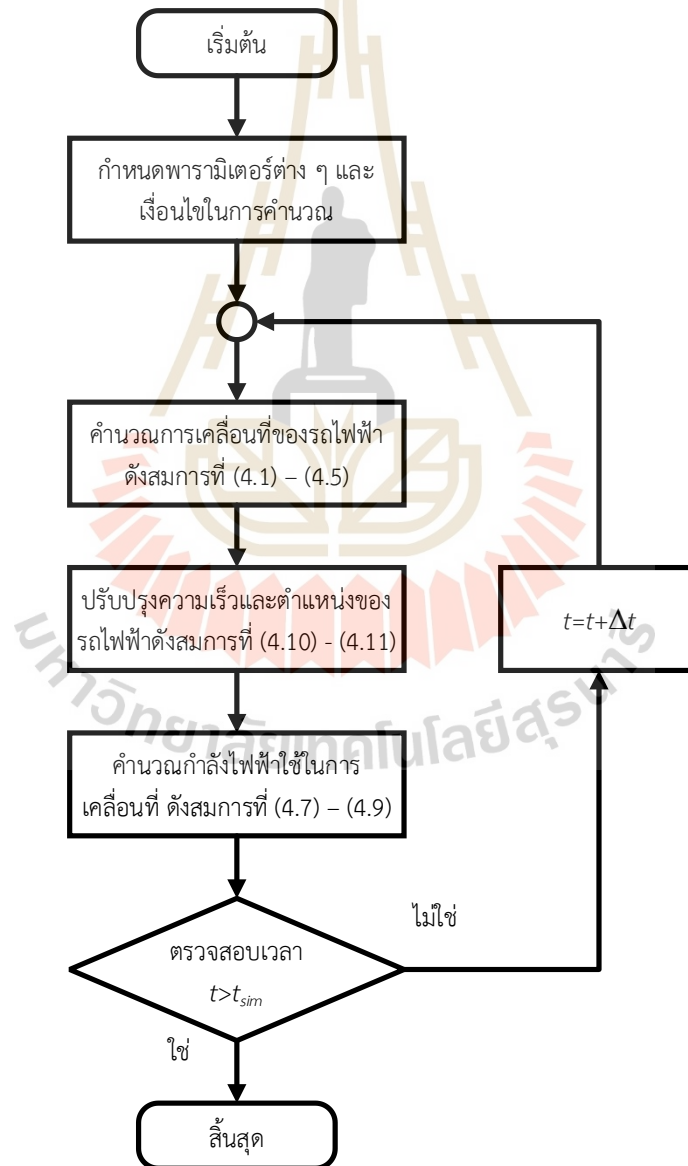
การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของรถไฟสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.10) และ (4.11)

$$v_{t+\Delta t} = v_t + a\Delta t \quad (4.10)$$

$$s_{t+\Delta t} = s_t + v_t \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2 \quad (4.11)$$

โดยที่	v_t $v_{t+\Delta t}$	คือ ความเร็วของรถไฟฟ้าก่อนและหลังปรับปรุง (m/s)
	s_t $s_{t+\Delta t}$	คือ ตำแหน่งของรถไฟฟ้าก่อนและหลังปรับปรุง (m)
	t	คือ เวลาของจำลองผล (s)
	Δt	คือ time step (s)

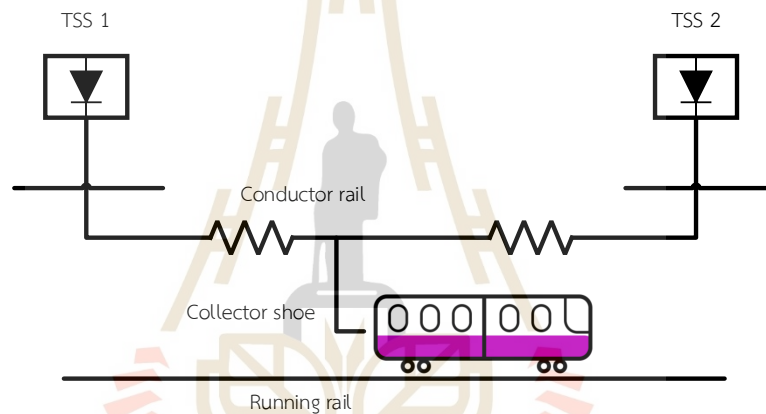
สรุปลำดับขั้นตอนการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสามารถอธิบายดังรูปที่ 4.7



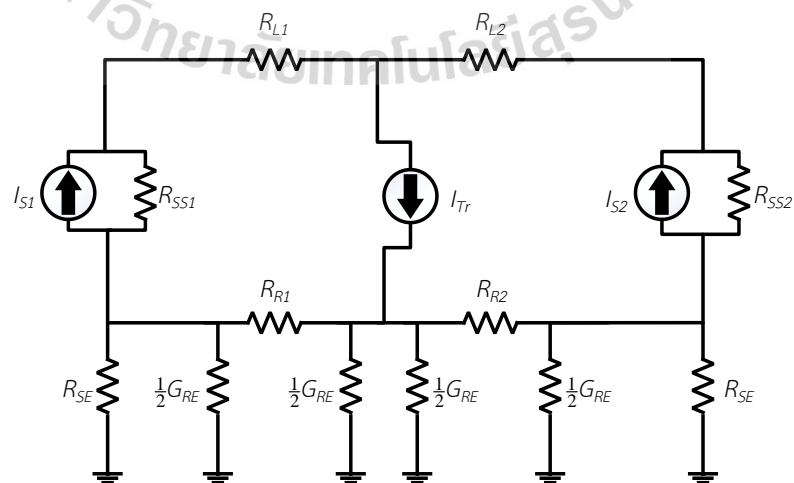
รูปที่ 4.7 สรุปขั้นตอนการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

4.4 การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนใช้แบบจำลองระบบแบบหลายตัวนำ (multi-conductor system) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ประกอบด้วยสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction substation: TSS) สายป้อน (feeder) และรถไฟไฟฟ้า (Train: Tr) โดยทั้งสามส่วนนี้จะพิจารณาการคำนวณแรงดันรางด้วย เพื่อง่ายต่อการคำนวณของแบบจำลองจึงใช้วิธีการวิเคราะห์แบบโนด (node analysis) และใช้วิธีการวนรอบซ้ำเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่ทำการคำนวณ งานวิจัยนี้ใช้วิธีการฉีดกระแส (current injection method) เพื่อหาผลเฉลยของการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่บัส (กุลวรรวณิชพงษ์, 2561) แบบจำลองระบบรถไฟไฟฟ้าในรูปแบบของกระแส สามารถคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าได้จากสมการโนดต่าง ๆ ดังสมการที่ (4.12)



รูปที่ 4.8 แผนภาพระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง



รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง

ค่าความต้านทานลัดวงจร และกระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนคำนวณได้จากสมการที่ (4.12) – (4.14)

$$R_{SS} = \frac{(V_{nl})^2}{P_{SS}} \quad (4.12)$$

$$I_{SS} = I_S - \frac{V_{SS}}{R_{SS}} \quad (4.13)$$

$$I_S = \frac{P_{SS}}{V_{nl}} \quad (4.14)$$

โดยที่	V_{nl}	คือ แรงดันไฟฟ้าไรโพลดของสถานีจ่ายไฟ (V)
	V_{SS}	คือ แรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟ (V)
	I_{SS}	คือ กระแสไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟ (A)
	I_S	คือ กระแสลัดวงจรที่สถานีจ่ายไฟ (A)
	P_{SS}	คือ กำลังไฟฟ้ลัดวงจรที่สถานีจ่ายไฟ (W)

ส่วนค่ากระแสของรถไฟฟ้าคำนวณจากสมการที่ (4.15)

$$I_{Tr} = \frac{P_{Trcon}}{V_{Tr}} \quad (4.15)$$

โดยที่	V_{Tr}	คือ แรงดันของรถไฟฟ้า (V)
	I_{Tr}	คือ กระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้า (A)
	P_{Trcon}	คือ กำลังไฟฟ้าของรถไฟ (W)

การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟไฟฟ้าใช้กระบวนการแก้ปัญหาด้วยสมการแบบไม่เชิงเส้น เช่น วิธีคำนวณของเกาส์ (Gauss iterative method) วิธีคำนวณวนรอบของนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson iterative method) หรือวิธีการฉีดกระแส (Current injection method) (Kulworawanichpong, 2015) เป็นต้น การดำเนินการใช้ช่วงเวลาคำนวณทุก ๆ 0.5 วินาที ตำแหน่งและกำลังงานของรถไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามโหมดการทำงานของรถไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการ

ฉีดกระแสหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า ซึ่งวิธีนี้ขึ้นอยู่กับสมการกระแสไฟฟ้าสมดุล (current-balance equation) ที่แต่ละบัส ดังสมการที่ (4.16) – (4.18)

$$I_{SS,N} - \frac{P_{Tr,M}}{V_{Tr,M}} = \sum_{i=1}^N G_{k,i} V_i \quad (4.16)$$

$$\begin{bmatrix} I_{SS,1} \\ \vdots \\ I_{SS,N} \\ I_{Tr,1} \\ \vdots \\ I_{Tr,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} & \cdots & G_{1,q} \\ G_{2,1} & G_{2,2} & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{p,1} & \cdots & & G_{p,q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{SS,1} \\ \vdots \\ V_{SS,N} \\ V_{Tr,1} \\ \vdots \\ V_{Tr,M} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$[I] = [G][V] \quad (4.18)$$

ซึ่ง $[G]$ คือ การรวมเมตริกซ์คอนดักซ์แทนซ์ย่อยของแต่ละบัสซึ่ง ประกอบไปด้วยเมตริกซ์คอนดักซ์แทนซ์ย่อยที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้า $[G_{SS}]$ เมตริกซ์คอนดักซ์แทนซ์ย่อยของสายส่งระหว่างบัส p ถึง q $[G_{pq}]$ เมตริกซ์คอนดักซ์แทนซ์ย่อยของสายส่งระหว่างรางวิ่งถึงกราวด์ที่บัส p และ q $[G_{pp}]$ และ $[G_{qq}]$ และ เมตริกซ์คอนดักซ์แทนซ์ของบัสรถไฟ $[G_{Tr}]$ แสดงดังสมการที่ (4.19) – (4.23) ตามลำดับ ผลรวมของเมตริกซ์คอนดักซ์แทนซ์ย่อยดังสมการที่ (4.24)

$$[G_{SS,N}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{SS,N}} & -\frac{1}{R_{SS,N}} \\ -\frac{1}{R_{SS,N}} & \frac{1}{R_{SS,N}} + \frac{1}{R_{SE}} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$[G_{pq}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{(L_p - L_q)R_L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{(L_p - L_q)R_R} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$[G_{pp}] = [G_{qq}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{SE}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$[G_{SS,N}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{SS,N}} & -\frac{1}{R_{SS,N}} \\ -\frac{1}{R_{SS,N}} & \frac{1}{R_{SS,N}} + \frac{1}{R_{SE}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{(L_p - L_q)R_L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{(L_p - L_q)R_R} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{SE}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$[G_{Tr,M}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{(L_p - d)R_{L,p}} + \frac{1}{(L_q - d)R_{L,q}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{(L_p - d)R_{R,p}} + \frac{1}{(L_q - d)R_{R,q}} + G_{RE} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} [G_{1,1}] & [G_{1,2}] & \cdots & [G_{1,q}] \\ [G_{2,1}] & [G_{2,2}] & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ [G_{p,1}] & \cdots & & [G_{p,q}] \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

- โดยที่ L คือ ตำแหน่งบัส (m)
 R_L คือ ค่าความต้านทานรางตัวนำ (Ω/m)
 R_R คือ ค่าความต้านทานรางวิ่ง (Ω/m)
 R_{SS} คือ ค่าความต้านทานลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Ω/m)
 R_{SE} คือ ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Ω/m)
 G_{RE} คือ ค่าความนำไฟฟ้าของรางเทียบกับดิน (S/m)
 p, q คือ หมายเลขบัส
 N คือ หมายเลขสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า
 M คือ หมายเลขรถไฟ

ในส่วนของเมตริกซ์ของกระแสไฟฟ้า $[I]$ ประกอบด้วยเมตริกซ์ย่อยระหว่างเมตริกซ์บัสสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า $[I_{SS,N}]$ กับเมตริกซ์บัสรถไฟ $[I_{Tr,M}]$ ซึ่งในการพิจารณาแบบหลายตัวนำทำให้เมตริกซ์ย่อยกระแสไฟฟ้าที่บัสสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าประกอบด้วย กระแสไฟฟ้าไหลออกจากสถานีผ่านสายส่ง

($I_{SS,N}$) กระแสไฟฟ้าไหลเข้าสถานีผ่านรางวิ่ง ($I_{SSR,N}$) แสดงดังสมการที่ (4.25) เมตริกซ์ย่อย กระแสไฟฟ้าที่บัสรถไฟฟ้าประกอบด้วย กระแสไฟฟ้าไหลเข้ารถไฟฟ้าผ่านสายส่ง ($I_{Tr,M}$) กระแสไฟฟ้าไหลออกจากรถไฟฟ้าผ่านรางวิ่ง ($I_{TrR,M}$) แสดงดังสมการที่ (4.26)

$$[I_{SS,N}] = \begin{bmatrix} I_{SSC,N} \\ I_{SSR,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{SS,N} \\ -I_{SS,N} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

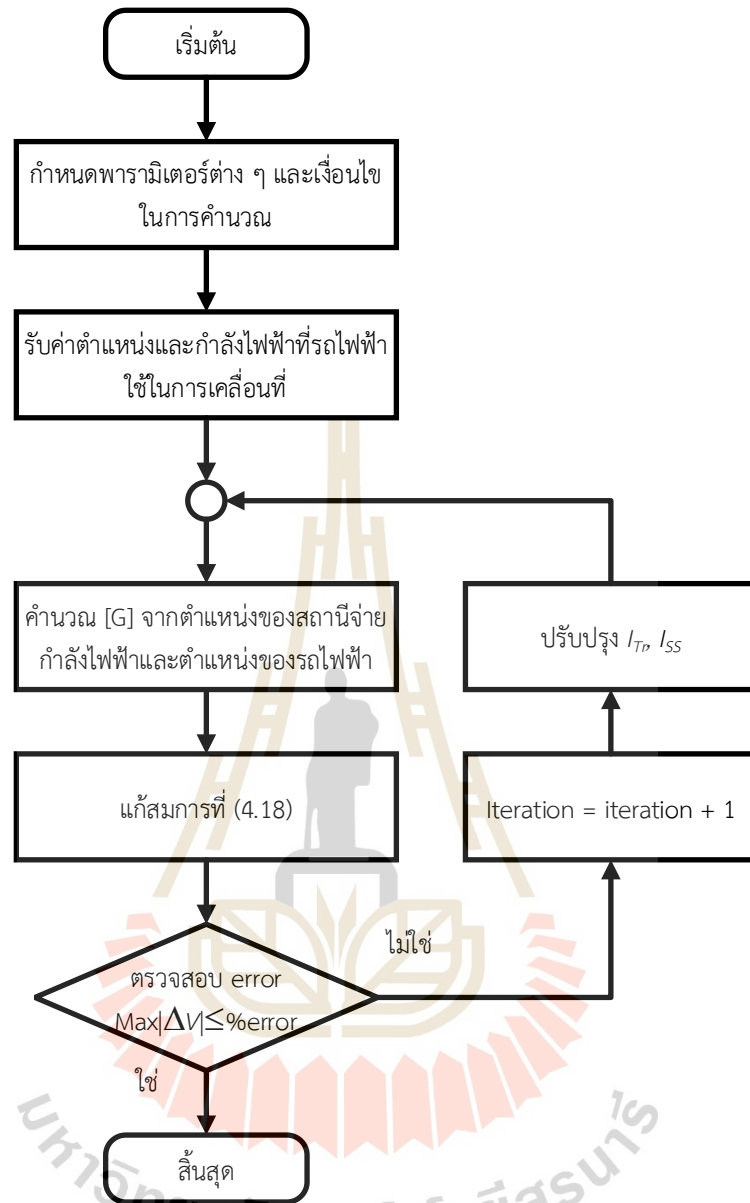
$$[I_{Tr,M}] = \begin{bmatrix} I_{TrC,M} \\ I_{TrR,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{Tr,M} \\ I_{Tr,M} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

เมตริกซ์ของแรงดันไฟฟ้า $[V]$ ประกอบด้วยเมตริกซ์ย่อยระหว่างเมตริกซ์ย่อยบัสสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า $[V_{SS,N}]$ กับเมตริกซ์ย่อยบัสรถไฟฟ้า $[V_{Tr,M}]$ ในลักษณะเช่นเดียวกับกระแสไฟฟ้า เมตริกซ์ย่อยแรงดันไฟฟ้าที่บัสสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้าที่สายส่งของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า ($V_{SSC,N}$) แรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า ($V_{SSR,N}$) ดังสมการที่ (4.27) เมตริกซ์ย่อยแรงดันไฟฟ้าที่บัสรถไฟฟ้าประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้าที่สายส่งของรถไฟฟ้า ($V_{TrC,M}$) แรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งของรถไฟฟ้า ($V_{TrR,M}$) ดังสมการที่ (4.28)

$$[V_{SS,N}] = \begin{bmatrix} V_{SSC,N} \\ V_{SSR,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{SS,N} \\ -V_{SS,N} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$[V_{Tr,M}] = \begin{bmatrix} V_{TrC,M} \\ V_{TrR,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{Tr,M} \\ V_{Tr,M} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

ในการจำลองผล จำนวนโหนดของระบบจะเท่ากับจำนวนของสถานีไฟฟ้ายรวมกับจำนวนของรถไฟฟ้าที่กำลังเคลื่อนที่ โดยตำแหน่งของรถไฟฟ้าจะไม่ถูกพิจารณาเมื่อมีตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า ขั้นตอนการหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแสสามารถอธิบายดังรูปที่ 4.10

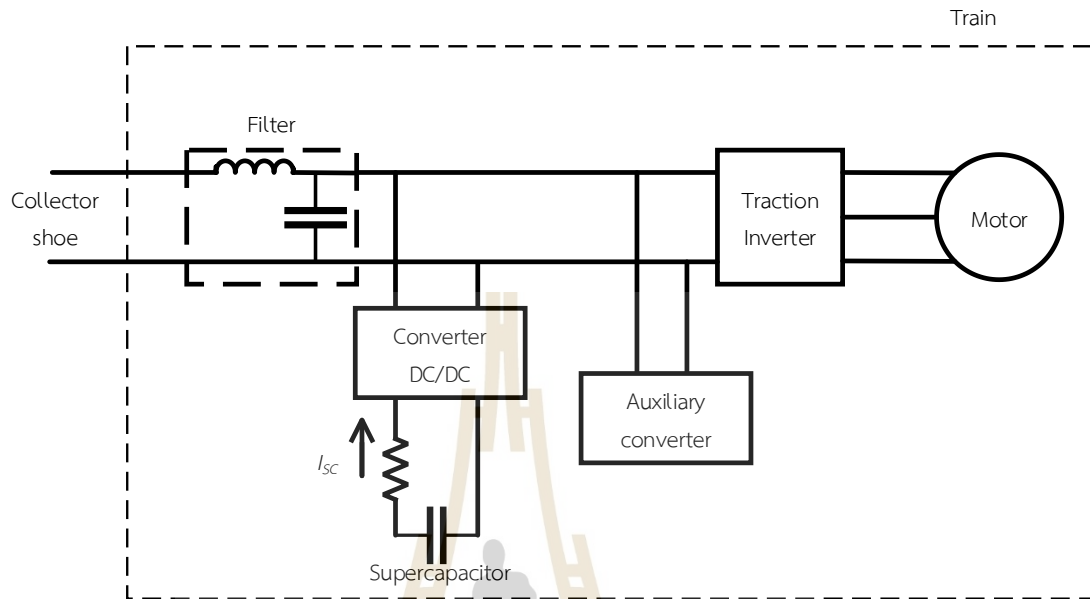


รูปที่ 4.10 ขั้นตอนการหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแส

4.5 แบบจำลองตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า

ระบบเก็บสะสมพลังงานติดตั้งบนขบวนรถในงานวิจัยนี้ พิจารณาการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีคุณสมบัติที่สามารถคายประจุและอัดประจุได้รวดเร็ว ตอบสนองในช่วง 10 วินาทีถึง 1 นาที มีความหนาแน่นกำลังงานสูง มีอายุการใช้งานมากกว่า 100000 รอบ และมีประสิทธิภาพที่สูง การติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นการติดตั้งเพื่อเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกของรถไฟฟ้าที่จ่ายกำลังงานคืน และนำพลังงานที่เก็บสะสมไว้กลับมาจ่าย

กำลังไฟฟ้าเมื่อระดับแรงดันของรถไฟฟ้าทกกว่าระดับแรงดันที่กำหนด แบบจำลองของตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.11

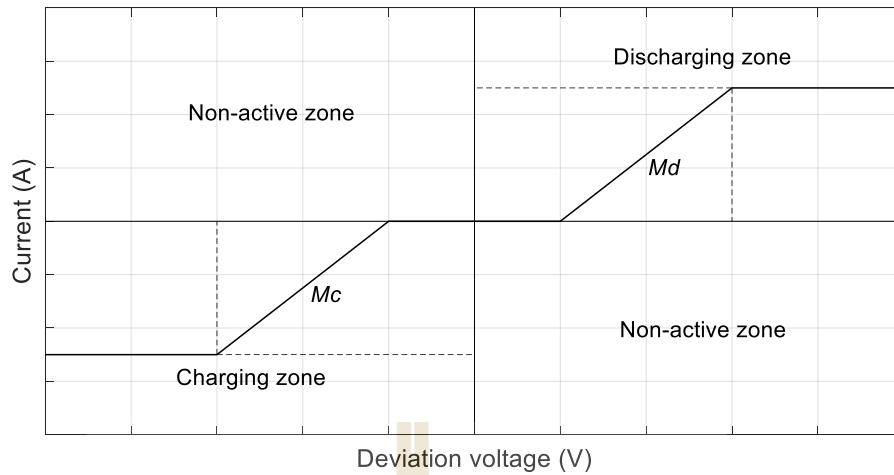


รูปที่ 4.11 แบบจำลองตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า

แบบจำลองแสดงการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่สามารถมีสถานะเป็นแหล่งจ่ายกระแสหรือ โหลดรับกระแส การคายประจุหรืออัดประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดขึ้นอยู่กับ การควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน

4.5.1 การควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าด้วยวิธีการ Piece-wise Linear State of Charge Control

แบบจำลองของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเมื่อรถไฟฟ้าเร่งความเร็วหรือโหลดรับกระแสไฟฟ้าเมื่อรถไฟฟ้าเบรก งานวิจัยนี้ใช้วิธีการควบคุมแบบ Piece-wise Linear State of Charge Control หรือ Piece-wise Linear SOC เป็นการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่คายประจุออกและอัดประจุเข้าด้วยระดับความต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Ratniyomchai, 2016) โดยระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถอธิบายดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC

ที่มาภาพ: (Ratniyomchai, 2016)

วิธีการควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC สามารถแบ่งการทำงานเป็น 2 โหมด คือ โหมดสะสมพลังงาน (Charging mode) เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก และโหมดจ่ายพลังงาน (Discharging mode) เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่งความเร็ว ระบบเก็บสะสมพลังงานจะเริ่มทำงานเมื่อส่วนต่างแรงดันไฟฟ้า (Deviation Voltage: ΔV) มากกว่าส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด ΔV_{min} และระบบเก็บสะสมพลังงานจะจ่ายหรือรับกระแสสูงสุดเมื่อส่วนต่างแรงดันไฟฟ้ามากกว่าหรือเท่ากับส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ΔV_{max} (Ratniyomchai, 2016) ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าคำนวณจากสมการที่ (4.29) รายละเอียดโหมดการควบคุมการทำงานดังนี้

- 1) โหมดการจ่ายกระแสไฟฟ้า ระบบจะทำงานในโหมดนี้เมื่อส่วนต่างแรงดันไฟฟ้า ΔV มากกว่าหรือเท่ากับส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด $\Delta V_{d,min}$ เมื่อ Md คือ คุณลักษณะความชันของการจ่ายกระแสไฟฟ้า และระบบเก็บสะสมพลังงานจะจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดหรือจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ค่าพิกัดของอุปกรณ์เมื่อ ΔV มากกว่าหรือเท่ากับส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าสูงสุด $\Delta V_{d,max}$ คุณลักษณะความชันของการจ่ายกระแสไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าจ่ายออกสามารถคำนวณดังสมการ (4.30) – (4.32)
- 2) โหมดการรับกระแสไฟฟ้าระบบจะทำงานในโหมดนี้เมื่อส่วนต่างแรงดันไฟฟ้า ΔV มากกว่าหรือเท่ากับส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด $\Delta V_{c,min}$ เมื่อ Mc คือ คุณลักษณะความชันของการรับกระแสไฟฟ้า และระบบเก็บสะสมพลังงานจะ

รับกระแสไฟฟ้าสูงสุดหรือรับกระแสไฟฟ้าที่ค่าพิกัดของอุปกรณ์เมื่อ ΔV มากกว่าหรือเท่ากับส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าสูงสุด $\Delta V_{c,max}$ คุณลักษณะความชันของการรับกระแสไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ารับออกสามารถคำนวณดังสมการ (4.33) – (4.35)

- 3) กรณีที่ผลต่างแรงดันไฟฟ้าไม่ตรงตามเงื่อนไขการทำงาน ระบบเก็บสะสมพลังงานจะไม่มีการทำงาน และกระแสไฟฟ้าของระบบจะเป็นศูนย์ดังสมการที่ (4.36)

$$\Delta V = |V_{Tr} - V_{Sc}| \quad (4.29)$$

เงื่อนไขโหมดจ่ายกระแสไฟฟ้า $\Delta V_{d,min} \leq \Delta V \leq \Delta V_{d,max}$ (Discharging mode)

$$I_{Sc} = Md(\Delta V - \Delta V_{d,min}) \quad (4.30)$$

$$Md = \frac{I_{Sc,max} - I_{Sc,min}}{\Delta V_{d,max} - \Delta V_{d,min}} \quad (4.31)$$

ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้ามากกว่าหรือเท่ากับส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าจ่ายกระแสสูงสุด

$$I_{Sc} = I_{Sc,max} ; \Delta V \geq \Delta V_{d,max} \quad (4.32)$$

เงื่อนไขโหมดรับกระแสไฟฟ้า $\Delta V_{c,min} \leq \Delta V \leq \Delta V_{c,max}$ (Charging mode)

$$I_{Sc} = Mc(\Delta V - \Delta V_{c,min}) \quad (4.33)$$

$$Mc = \frac{I_{Sc,max} - I_{Sc,min}}{\Delta V_{c,max} - \Delta V_{c,min}} \quad (4.34)$$

ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้ามากกว่าหรือเท่ากับส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าชาร์จกระแสสูงสุด

$$I_{SC} = I_{SC,max} \quad ; \quad \Delta V \geq \Delta V_{C,max} \quad (4.35)$$

ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขใด ๆ (Non-active mode)

$$I_{SC} = 0 \quad (4.36)$$

โดยที่	ΔV	คือ ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้า (V)
	V_{SC}	คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุยิ่งยวด (V)
	V_{Tr}	คือ แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า (V)
	Md	คือ คุณลักษณะความชันของการจ่ายกระแสไฟฟ้า (A/V)
	Mc	คือ คุณลักษณะความชันของการชาร์จกระแสไฟฟ้า (A/V)
	I_{SC}	คือ กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (A)
	$I_{SC,max}$	คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (A)
	$\Delta V_{d,min}$ และ $\Delta V_{d,max}$	คือ ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดที่คายประจุ (V)
	$\Delta V_{c,min}$ และ $\Delta V_{c,max}$	คือ ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดที่ชาร์จประจุ (V)

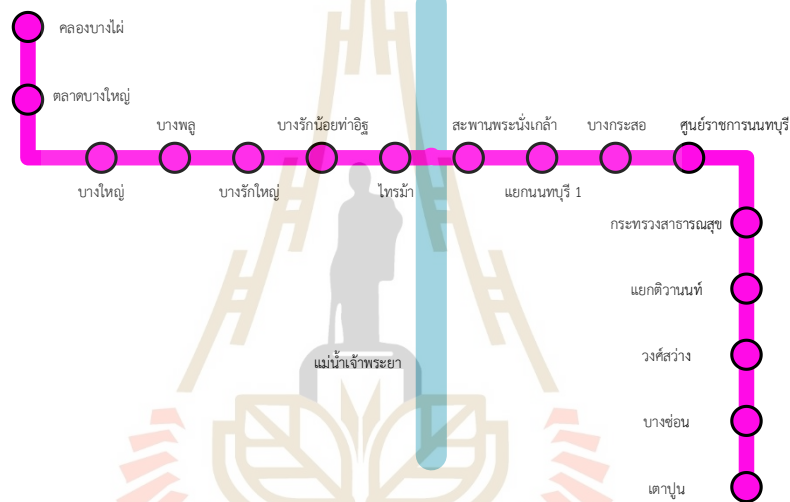
แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้ามักมีการปรับปรุงในทุกรอบการคำนวณ แสดงดังสมการที่ (4.37)

$$V_{SC,t+\Delta t} = V_{SC,t} + I_{SC}R_{ESR} \quad (4.37)$$

โดยที่	$V_{SC,t}$	คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุยิ่งยวดก่อนปรับปรุง (V)
	$V_{SC,t+\Delta t}$	คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุยิ่งยวดหลังปรับปรุง (V)
	R_{ESR}	คือ ความต้านทานอนุกรมของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Ω)

4.6 การทดสอบแบบจำลองผลระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดรหนึ่งขบวน

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดรหนึ่งขบวน กรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีม่วง เป็นการจำลองการเคลื่อนที่จากสถานีต้นทางคลองบางไผ่ ไปยังสถานีปลายทางเตาปูน และเคลื่อนที่กลับสถานีต้นทางอีกครั้ง เส้นทางการเดินรถแสดงดังรูปที่ 4.13 รายละเอียดสายส่งตัวนำ และพารามิเตอร์ของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนแสดงดังตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 4.2 รายละเอียดตำแหน่งสถานีรับส่งผู้โดยสารและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแสดงดังตารางที่ 4.3 ลักษณะความชันของเส้นทางเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 4.14 คุณลักษณะแรงฉุดลากและแรงเบรกของหัวรถจักรไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 รถไฟฟ้าสายสีม่วง (สายฉลองรัชธรรม)

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน

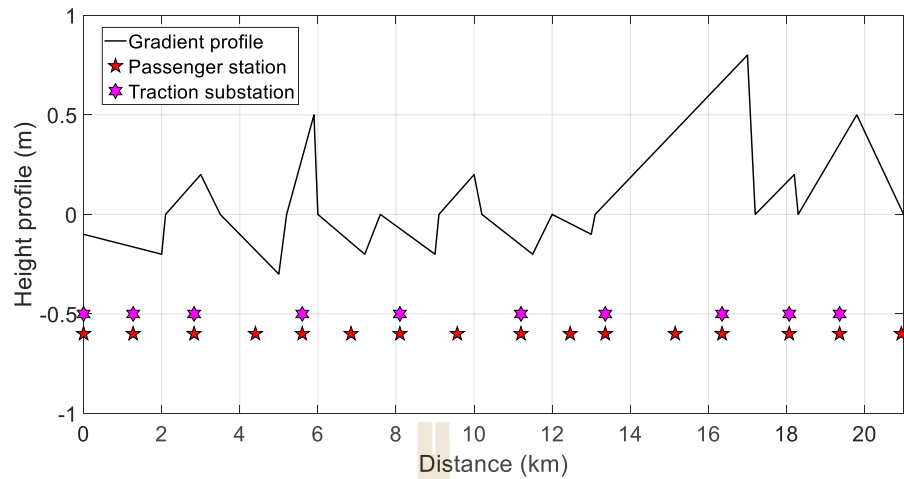
Parameter	Value	Unit
Short-circuit capacity	50	MW
Voltage no-load	750	V
Third rail resistance	7.00	m Ω /km
Running rail resistance	17.5	m Ω /km
Rail to earth conductance	0.6	S·km

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์รถไฟฟ้าสายสีม่วง

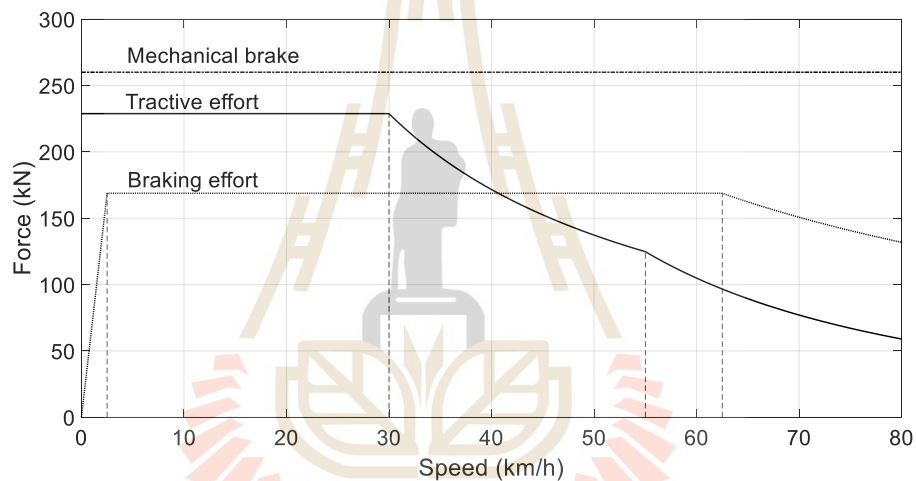
Parameter	Value	Unit
Train mass	153	Ton
Payload mass	75	Ton
Maximum speed	80	km/h
Maximum acceleration	1.2	m/s ²
Maximum deceleration	0.9	m/s ²
Maximum tractive effort	228.8	kN
Maximum braking effort	168.8	kN
Auxiliary power	270	kW
Efficiency	0.86	-

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดเส้นทางรถไฟฟ้าสายสีม่วง

Station name	Station code	Passenger station Position (km)	Traction substation position (km)
คลองบางไผ่	PP01	0.00	0.00
ตลาดบางใหญ่	PP02	1.27	1.27
สามแยกบางใหญ่	PP03	2.83	2.83
บางพลู	PP04	4.40	-
บางรักใหญ่	PP05	5.60	5.60
บางรักน้อยท่าอิฐ	PP06	6.85	-
ไทรม้า	PP07	8.10	8.10
สะพานพระนั่งเกล้า	PP08	9.57	-
แยกนนทบุรี 1	PP09	11.20	11.20
บางกระสอบ	PP10	12.46	-
ศูนย์ราชการนนทบุรี	PP11	13.36	13.36
กระทรวงสาธารณสุข	PP12	15.15	-
แยกติวานนท์	PP13	16.35	16.35
วงศ์สว่าง	PP14	18.07	18.07
บางซื่อ	PP15	19.36	19.36
เตาปูน	PP16	20.94	-



รูปที่ 4.14 ระดับเกรดเดียนต์ของรถไฟฟ้าสายสีม่วง



รูปที่ 4.15 คุณลักษณะแรงฉุดลากและแรงเบรกของระบบขับเคลื่อน

การให้บริการของรถไฟฟ้าสายสีม่วงมีการให้บริการในวันปกติช่วงเวลา 05.30 - 24.00 น. และวันหยุดช่วงเวลา 06.00 - 24.00 น. โดยการให้บริการช่วงเวลาเร่งด่วนในวันจันทร์ถึงวันศุกร์เวลา 06.30 - 08.30 น. และ 17.00 - 19.30 น. จะมีระยะห่างของขบวน (headway) อยู่ที่ 6.00 นาทีต่อขบวน นอกจากนี้ให้บริการในช่วงเวลาปกติมีระยะห่างของขบวนอยู่ที่ 9.00 นาทีต่อขบวน ระยะเวลาเดินทางของรถไฟฟ้า (timetable) ในแต่ละช่วงสถานีรับส่งผู้โดยสาร แสดงดังตารางที่ 4.4

จากตารางเวลาการให้บริการในแต่ละช่วงสถานีรับส่งผู้โดยสารมีระยะเวลาเดินทางเฉลี่ยประมาณ 2.00 นาที ผู้วิจัยทำการออกแบบเส้นความเร็วของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยตารางเวลาให้บริการเพื่อให้รถไฟฟ้าเดินทางตรงตามตารางเวลา แสดงดังตารางที่ 4.5 โดยออกแบบจากการสุ่มความเร็วในแบบจำลองในทุก ๆ ช่วงสถานีรับส่งผู้โดยสารเทียบกับเวลาในการให้บริการของแต่ละช่วง

สถานี โดยมีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 80 km/h ในการสุมจะเริ่มขยับความเร็วลดลงครั้งละ 5 km/h จนได้เวลาที่ใกล้เคียงกับตารางเวลาการให้บริการ

ตารางที่ 4.4 ตารางเวลาการเดินรถไฟฟ้าสายสีม่วง

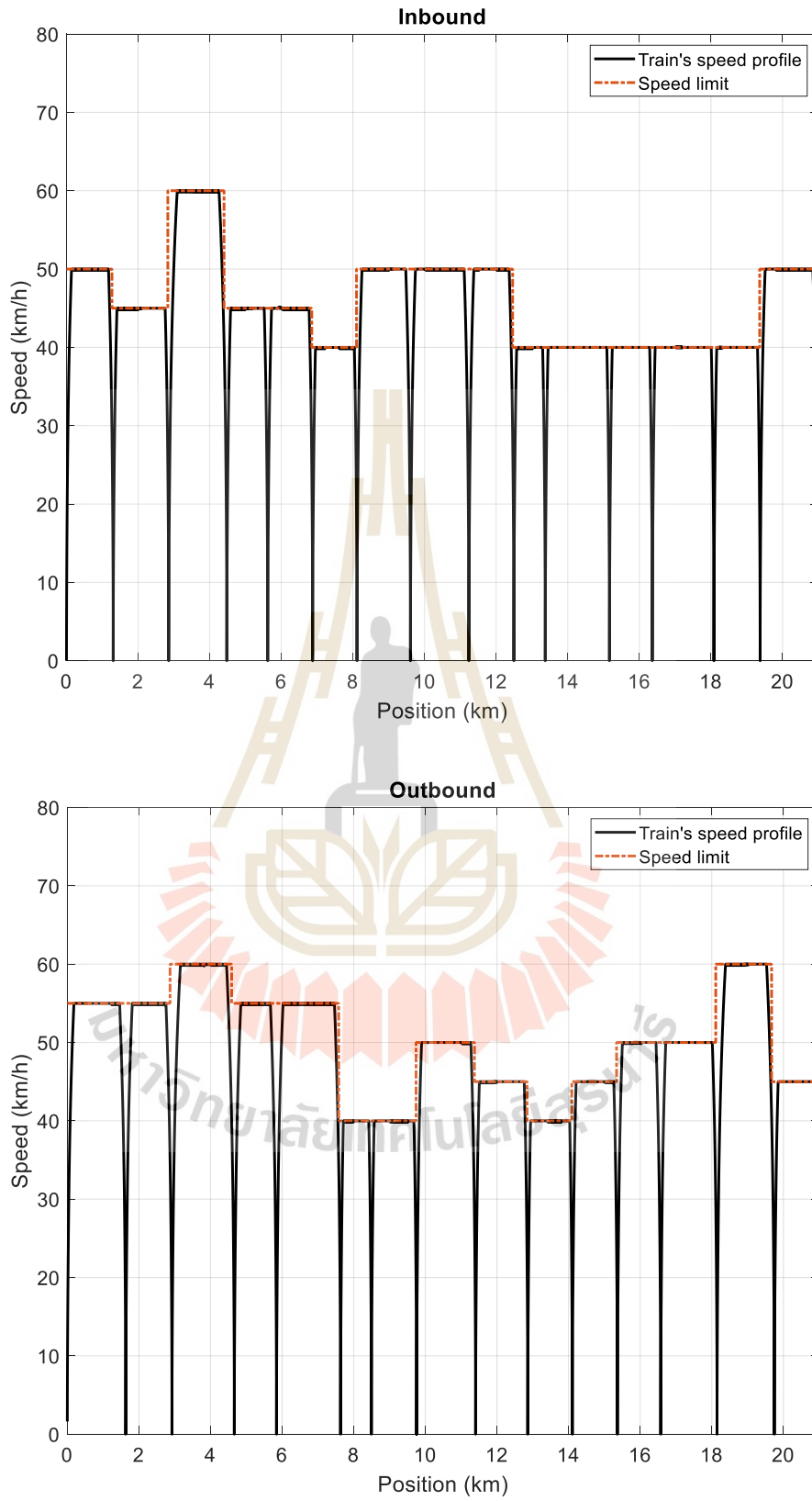
Passenger station	Inbound (min)		Outbound (min)	
	Weekday	weekend	Weekday	weekend
คลองบางไผ่	-	-	2	2
ตลาดบางใหญ่	2	2	2	3
สามแยกบางใหญ่	3	2	3	3
บางพลู	2	3	2	2
บางรักใหญ่	2	2	2	2
บางรักน้อยท่าอิฐ	3	2	2	2
ไทรม้า	2	2	3	2
สะพานพระนั่งเกล้า	2	2	2	3
แยกนนทบุรี 1	3	3	2	2
บางกระสอ	2	2	2	2
ศูนย์ราชการนนทบุรี	2	2	3	3
กระทรวงสาธารณสุข	4	3	2	2
แยกติวานนท์	2	3	2	3
วงศ์สว่าง	3	2	2	2
บางซ่อน	3	3	2	2
เตาปูน	2	2	-	-
รวม	37	35	33	35

ตารางที่ 4.5 ออกแบบความเร็วทำการของรถไฟฟ้าสายสีม่วง

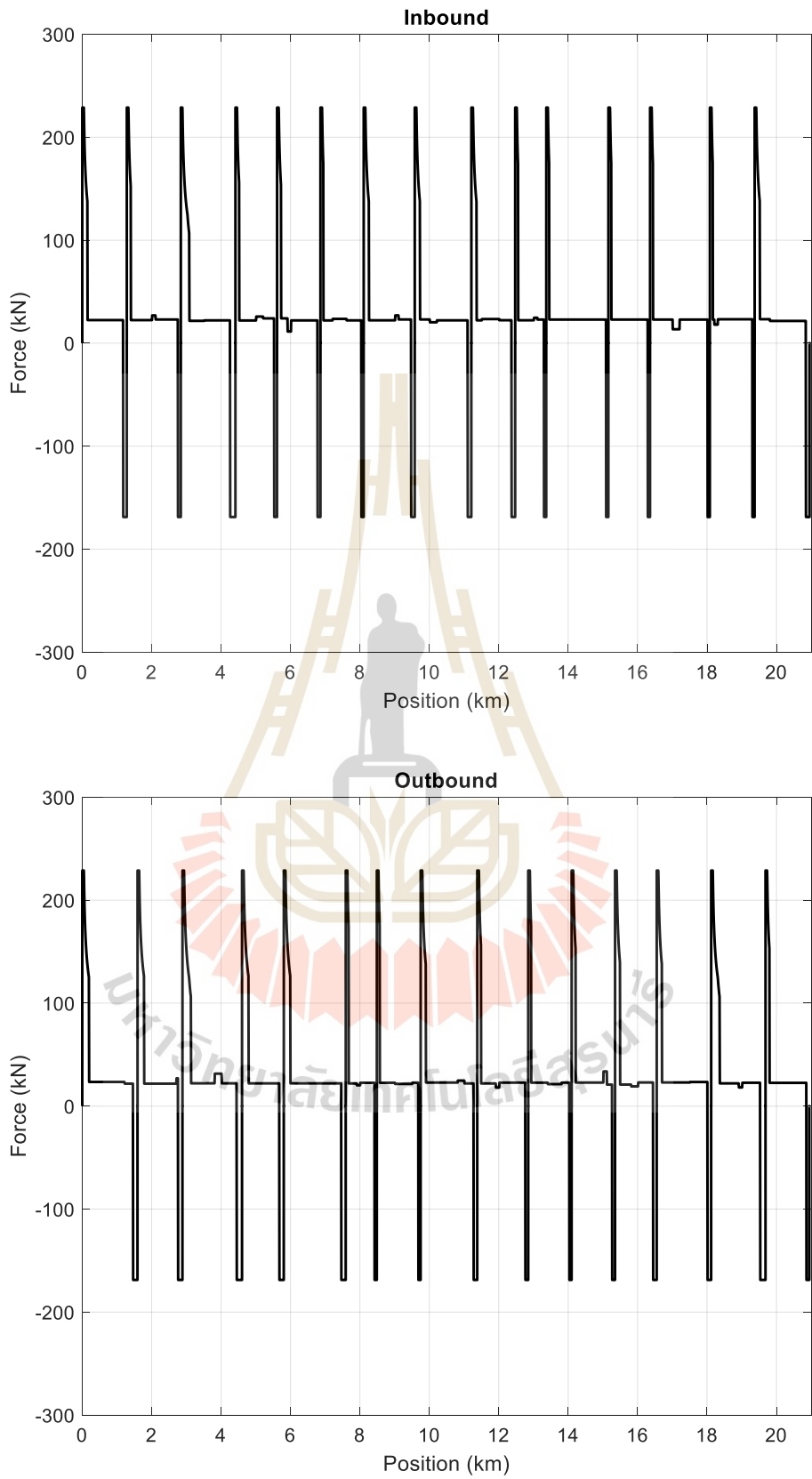
Passenger station	Speed Inbound (km/h)	Speed Outbound (km/h)
คลองบางไผ่	-	45
ตลาดบางใหญ่	50	60
สามแยกบางใหญ่	45	50
บางพลู	60	50
บางรักใหญ่	45	45
บางรักน้อยท่าอิฐ	45	40
ไทรม้า	40	45
สะพานพระนั่งเกล้า	50	50
แยกถนนพสุธรี่ 1	50	40
บางกระสอ	50	40
ศูนย์ราชการนนทบุรี	40	55
กระทรวงสาธารณสุข	40	55
แยกติวานนท์	40	60
วงศ์สว่าง	40	55
บางซื่อ	40	55
เตาปูน	50	-

4.6.1 ผลการทดสอบแบบจำลองรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน

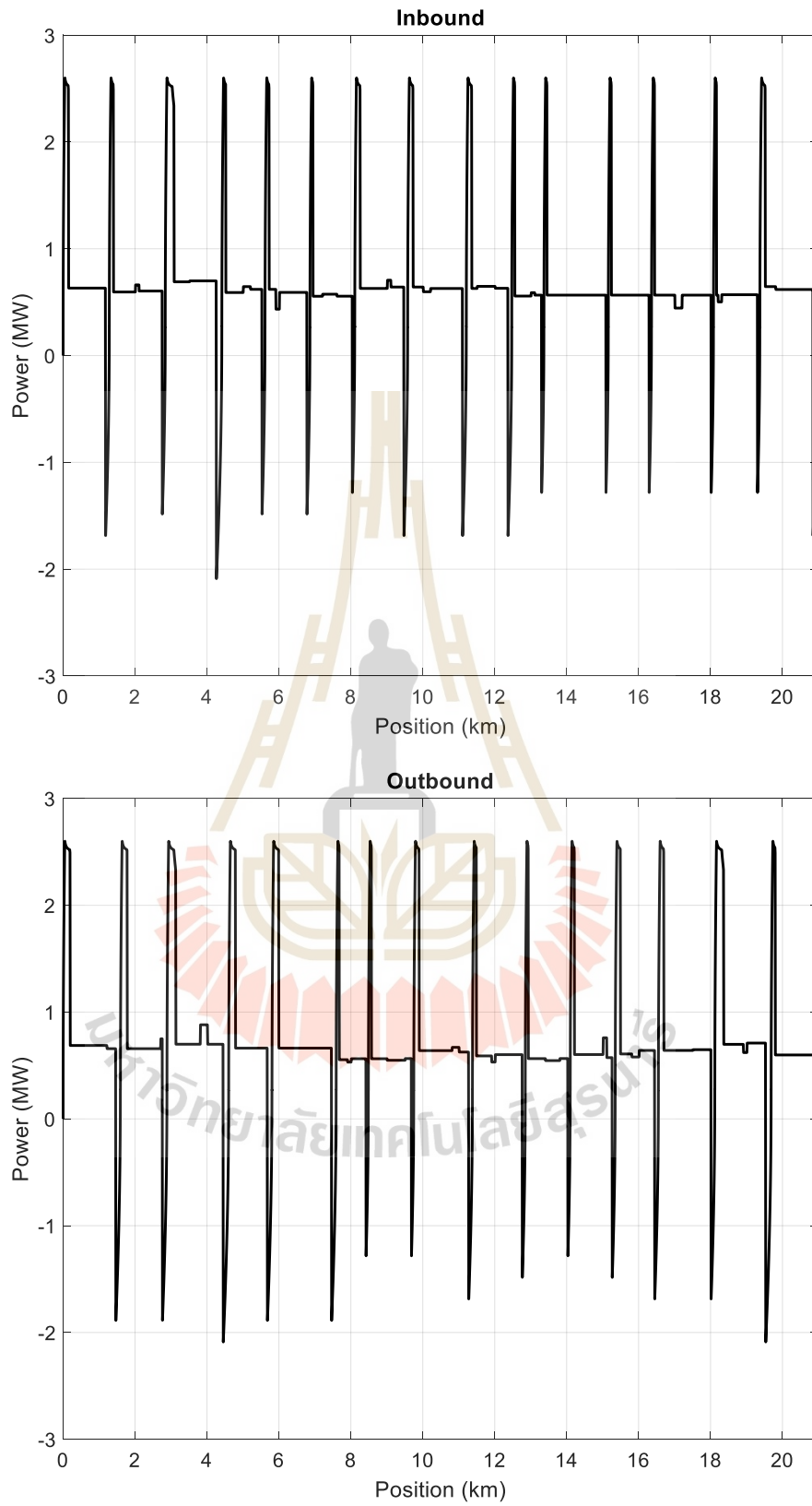
การทดสอบแบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีม่วง การจำลองผลโดยโปรแกรม MATLAB ทำงานบนคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Intel core i5-10300H, NVIDIA GeForce GTX 1650, Ram 8 GB DDR4 Bus 2933 MHz การจำลองผลเคลื่อนที่รถไฟฟ้าด้วยการกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่จากการออกแบบแสดงดังรูปที่ 4.16 แรงที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 4.17 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 4.18



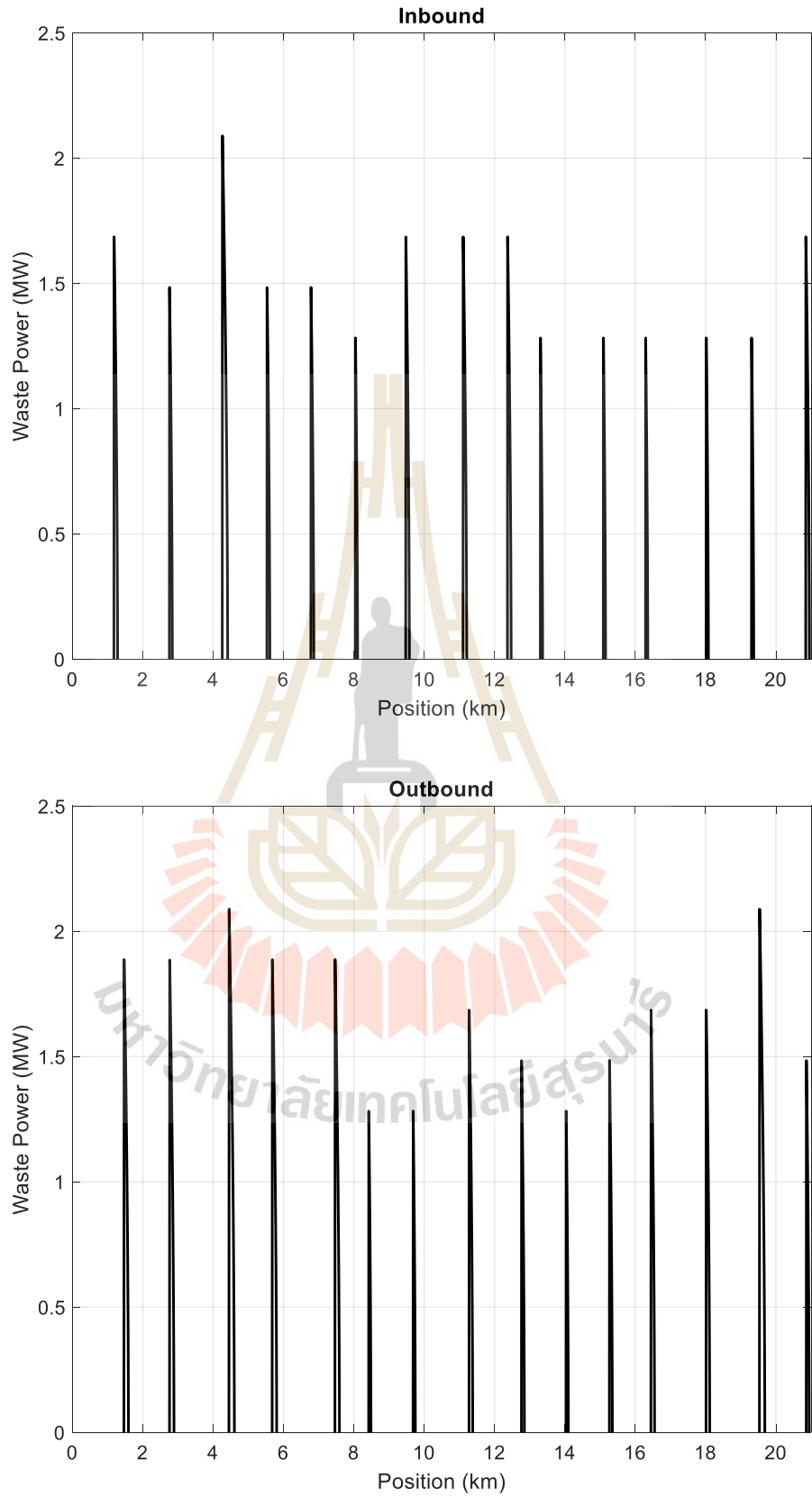
รูปที่ 4.16 ความเร็วเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรงสายสีม่วง



รูปที่ 4.17 แรงที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่



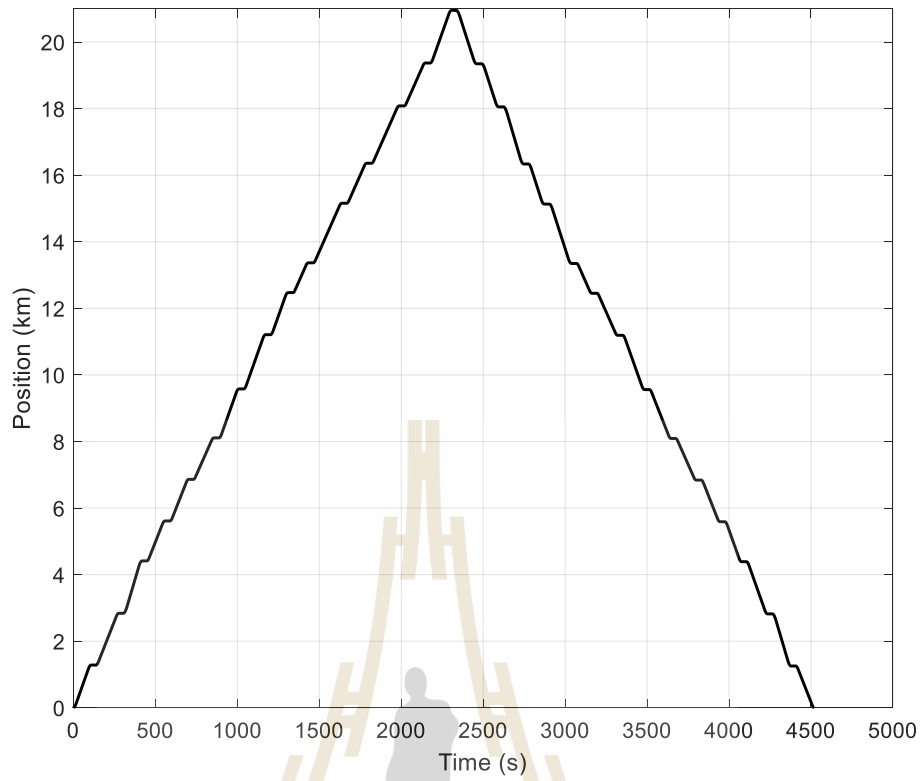
รูปที่ 4.18 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่



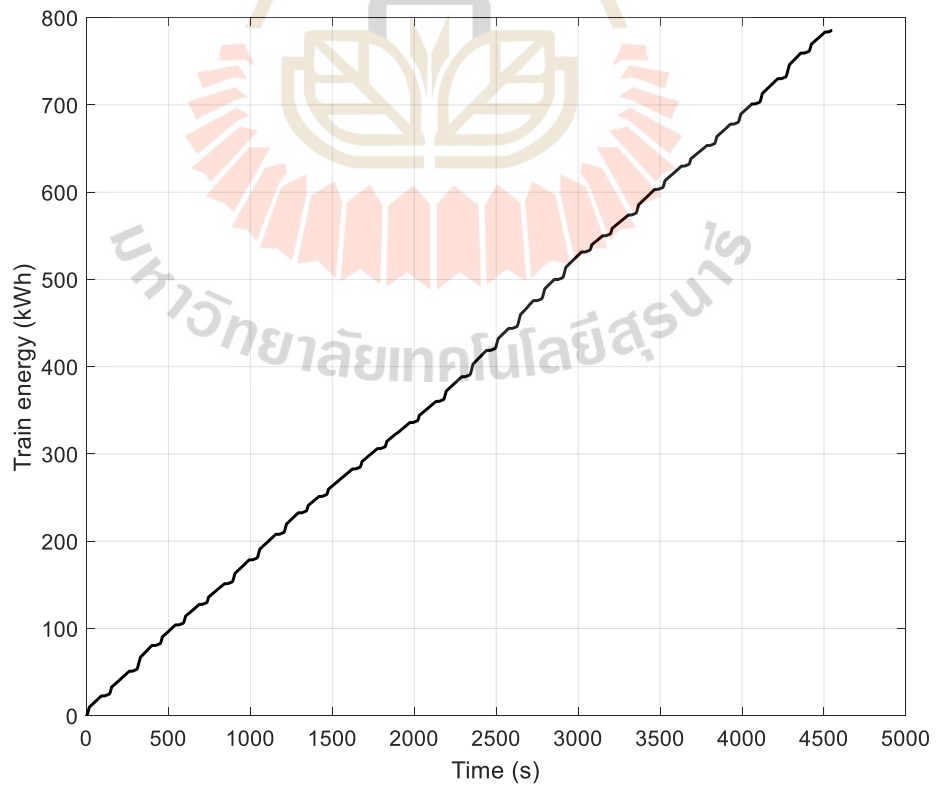
รูปที่ 4.19 กำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรก กรณีฐาน

กำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกของรถไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะถูกคิดเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Waste Power: P_{waste}) แสดงดังรูปที่ 4.19 รถไฟฟ้าในกรณีฐานที่ไม่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดกำลังไฟฟ้าจะถูกกำจัดทิ้งด้วยตัวต้านทานเบรกแปลงเป็นพลังงานความร้อนเพื่อไม่ให้เกิดการส่งกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกกลับเข้าสู่ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ความสัมพันธ์เวลาในการเคลื่อนที่กับระยะทางเดินรถแสดงดังรูปที่ 4.20 และพลังงานสะสมในการให้บริการหนึ่งเส้นทางเดินรถแสดงดังรูปที่ 4.21

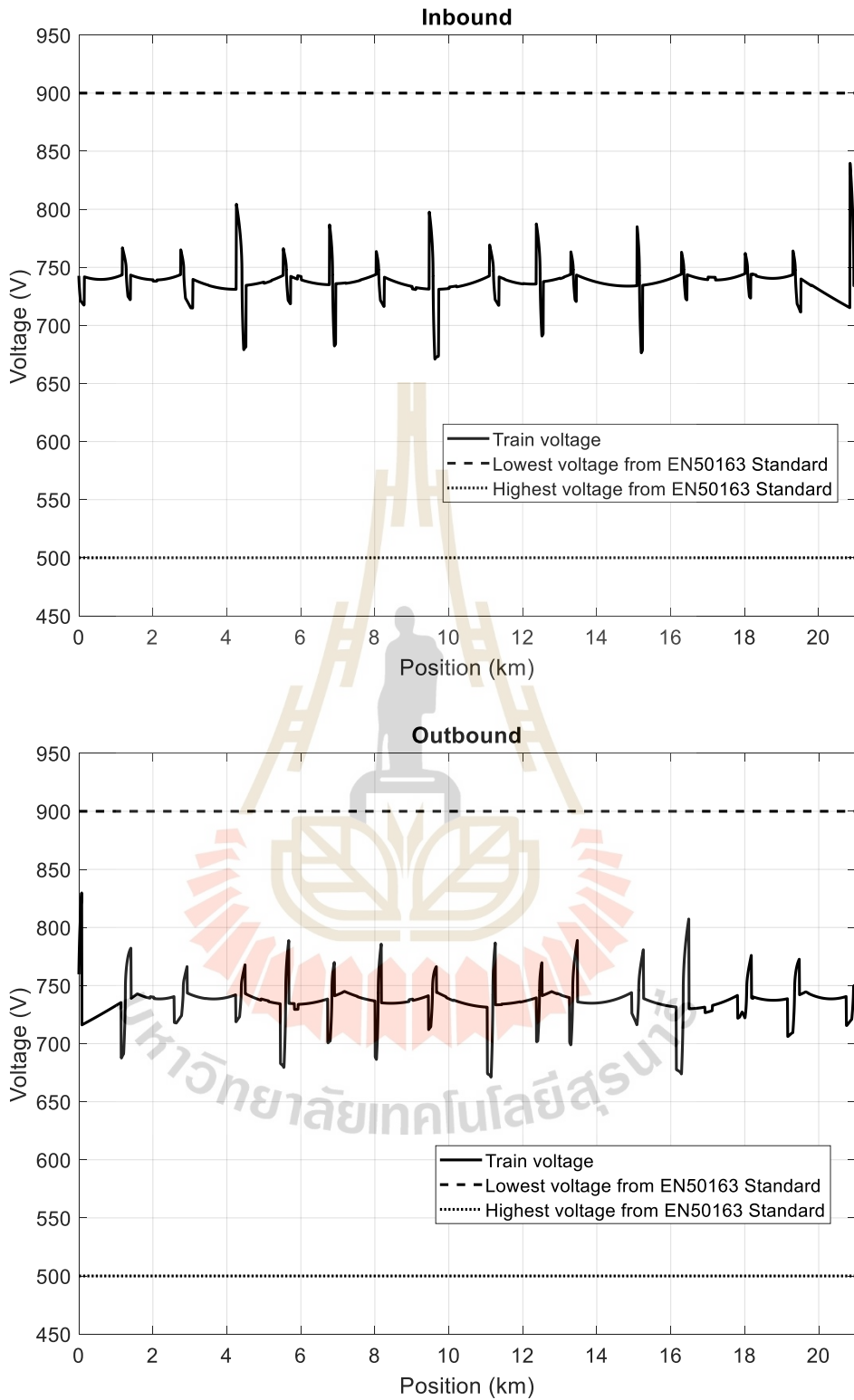
การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในแบบจำลองมีการเคลื่อนที่ 3 โหมดการทำงาน ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว โหมดความเร็วคงที่ และโหมดเบรก จากรูปที่ 4.16 ช่วงเริ่มต้นรถไฟฟ้าเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งไปจนถึงความเร็วทำงานที่ได้รับการออกแบบ เมื่อรถไฟฟ้าถึงความเร็วทำงานเข้าสู่โหมดความเร็วคงที่จะมีการทำงานในลักษณะรักษาความเร็วทำให้มีการใช้กำลังงานในการเร่งความเร็วหรือเบรกเป็นระยะเพื่อไม่ให้ความเร็วเกินความเร็วทำงานหรือต่ำกว่าความเร็วทำงาน และตำแหน่งของรถไฟฟ้าเข้าสู่จุดระยะวิกฤตเบรกรถไฟฟ้าจะทำงานในโหมดเบรกทำให้เกิดการจ่ายคืนกำลังงาน ซึ่งลักษณะของการเคลื่อนที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ดังรูปที่ 4.18 ในช่วงโหมดเร่งความเร็วกำลังไฟฟ้าจะมีค่ายอดสูงถึง 2.60 MW โหมดเบรกจ่ายคืนกำลังงานได้สูงสุดถึง 2.09 MW และในช่วงที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ในโหมดความเร็วคงที่มีภาระเร่งและเบรกเป็นระยะ เพื่อรักษาระดับความเร็วส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้มีช่วงเพิ่มขึ้นและลดลง จากรูปที่ 4.21 พลังงานไฟฟ้าสะสมของรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาให้บริการโดยพลังงานสะสมสูงสุดเมื่อให้บริการเสร็จสิ้นตามเส้นทางเดินรถเท่ากับ 785.45 kWh



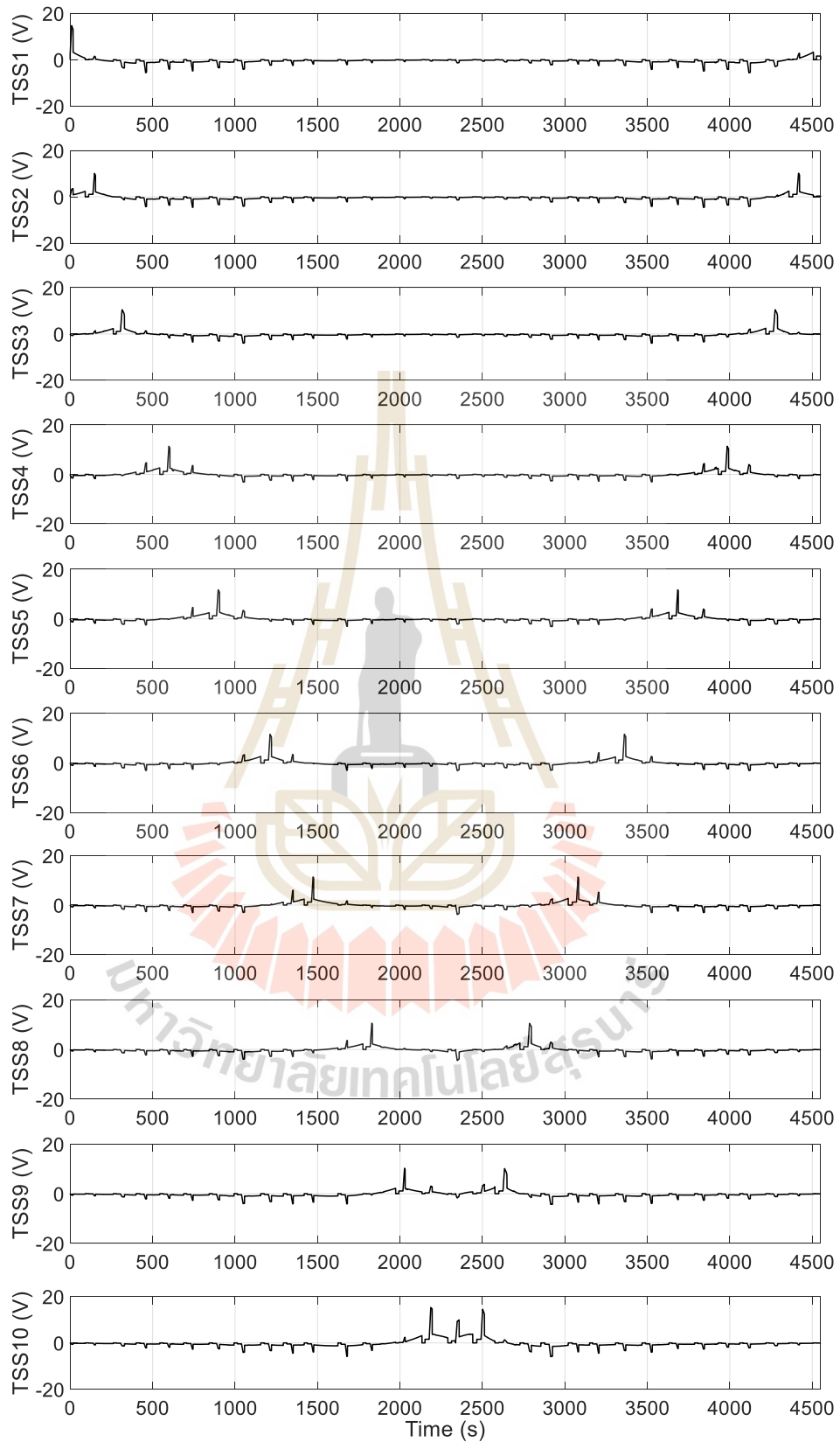
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการจำลองผลกับตำแหน่งของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน



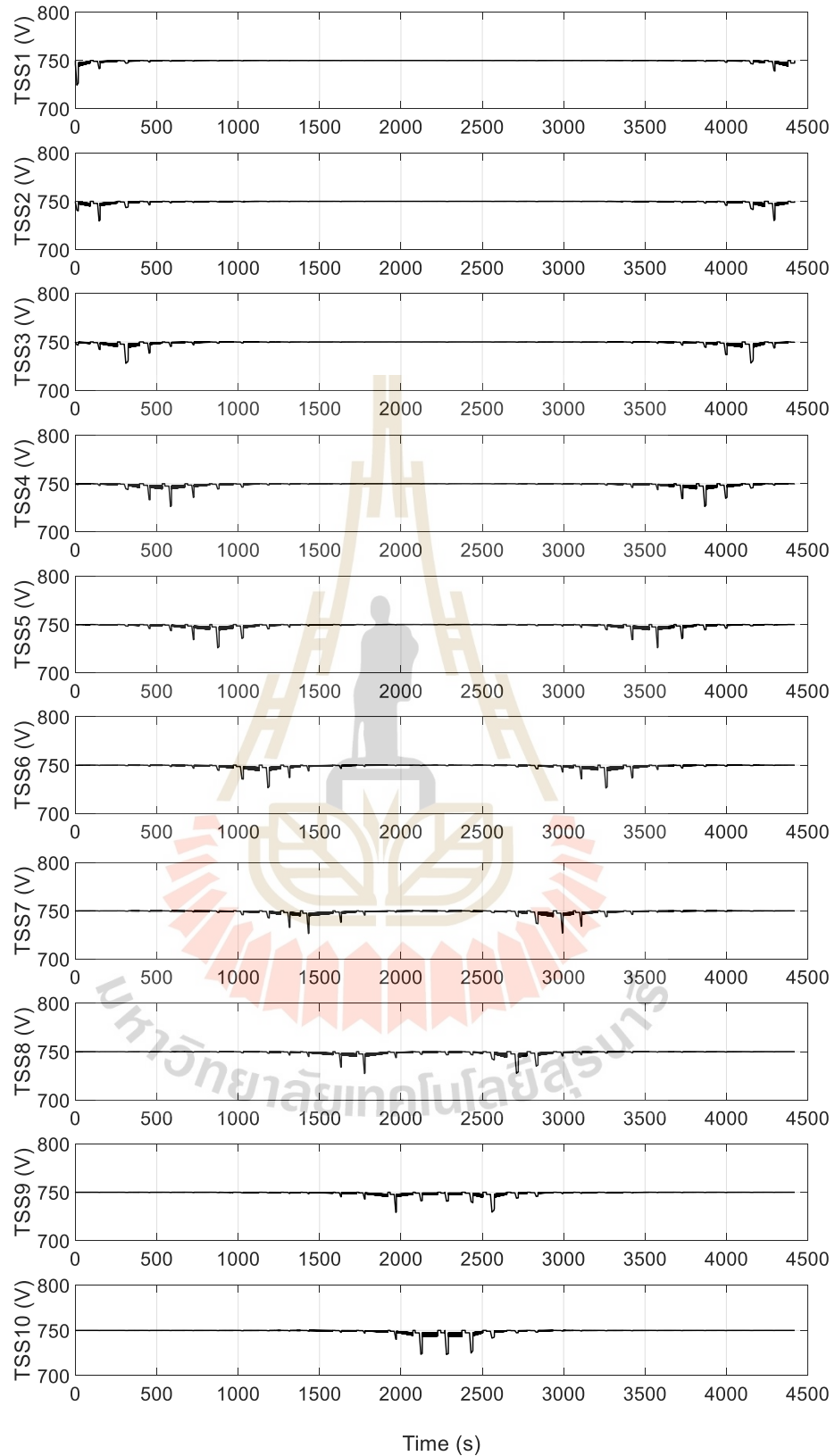
รูปที่ 4.21 พลังงานสะสมที่รถไฟฟ้าหนึ่งขบวนใช้ในการเคลื่อนที่ตลอดเส้นทาง



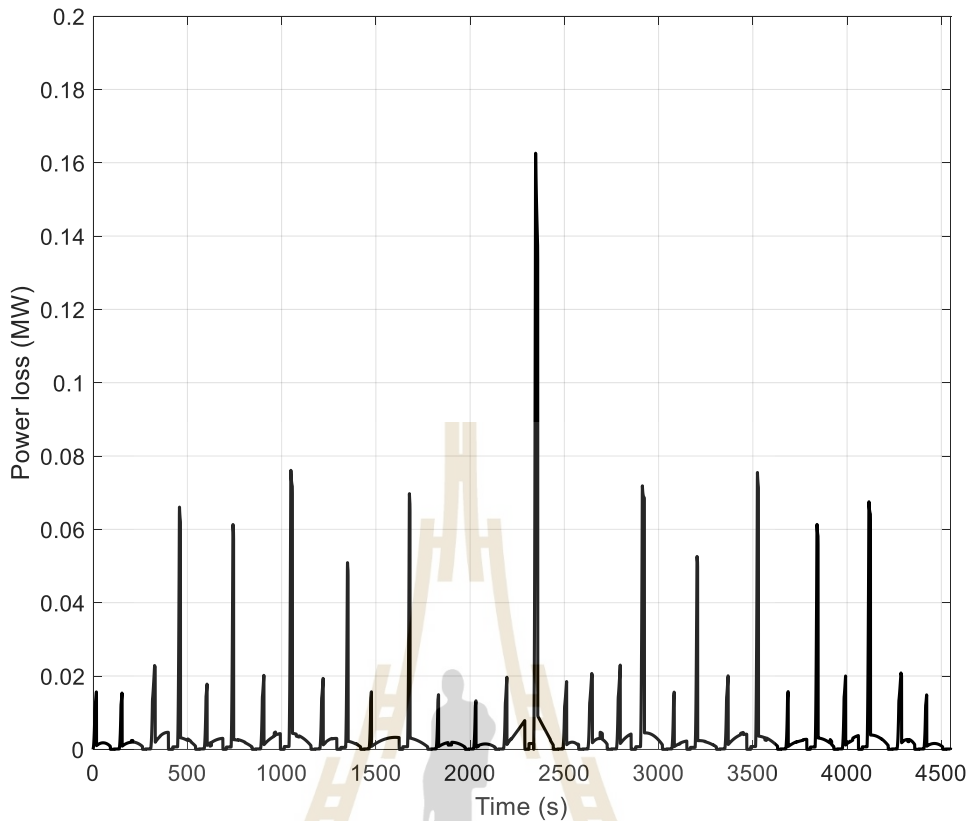
รูปที่ 4.22 แรงดันรถไฟฟ้าในขณะที่เคลื่อนที่



รูปที่ 4.23 ระดับแรงดันรางที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับเวลาระบบรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน



รูปที่ 4.24 ระดับแรงดันสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับเวลาระบบรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน



รูปที่ 4.25 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำรางที่สามระบบรถไฟฟ้างานหนึ่งขบวน

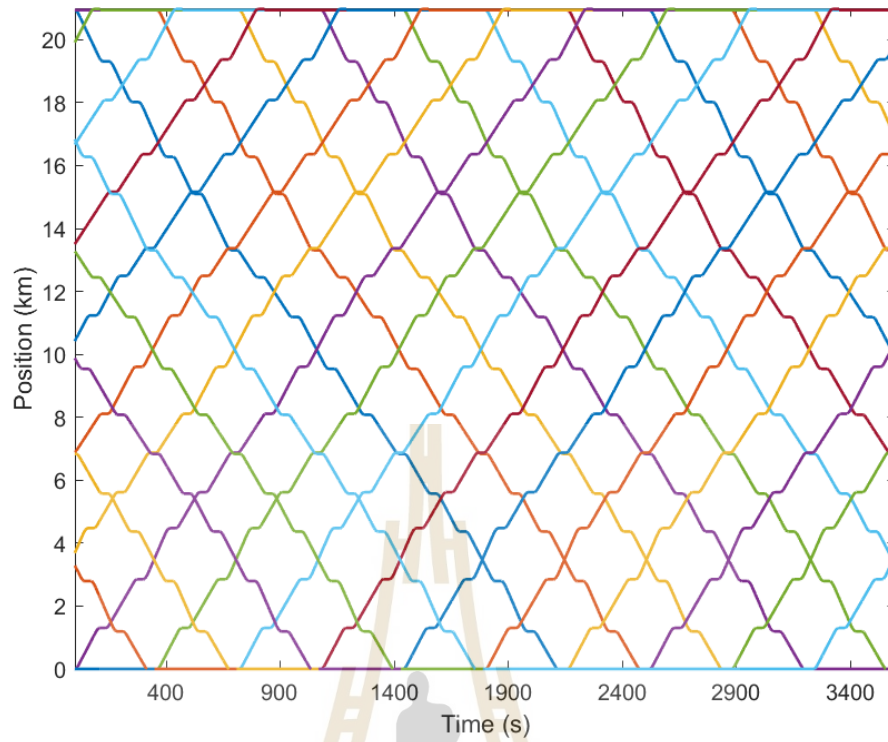
จากการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในระบบรถไฟฟ้างานหนึ่งขบวนสามารถแสดงแรงดันของรถไฟฟ้างานหนึ่งขบวนเทียบกับตำแหน่งของรถไฟฟ้างานหนึ่งขบวน และแรงดันของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนกับตำแหน่งที่รถไฟฟ้างานหนึ่งขบวนที่ผ่านได้ ดังรูปที่ 4.22 - 4.24 เมื่อรถไฟฟ้างานหนึ่งขบวนเคลื่อนที่ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่งตัวนำรางที่สาม แสดงดังรูปที่ 4.25 ซึ่งกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีผลมาจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังขบวนรถไฟฟ้างานหนึ่งขบวนอยู่ห่างกับสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าทำให้ค่าความต้านทานในสายส่งตัวนำสูงขึ้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

จากสมการที่ (4.12) ค่าคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่า เมื่อรถไฟฟ้างานหนึ่งขบวนเคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง มีการใช้กำลังไฟฟ้ามากในการเร่งความเร็วไปจนถึงความเร็วทำงานส่งผลให้ระดับแรงดันของรถไฟฟ้างานหนึ่งขบวนตก (voltage drop) ดังรูปที่ 4.22 โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้างานหนึ่งขบวนมาจากตำแหน่งของรถไฟฟ้างานหนึ่งขบวน ยิ่งรถไฟฟ้างานหนึ่งขบวนมีตำแหน่งที่อยู่ห่างจากสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าจะส่งผลให้แรงดันตกมาก สังเกตจากเส้นทางออกเมืองเมื่อรถไฟฟ้างานหนึ่งขบวนเร่งความเร็วทำให้ใช้กำลังงานไปปริมาณมาก ประกอบกลับที่สถานีรับส่งผู้โดยสารปลายทางไม่มีสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าติดตั้ง ส่งผลให้เกิดแรงดันตก

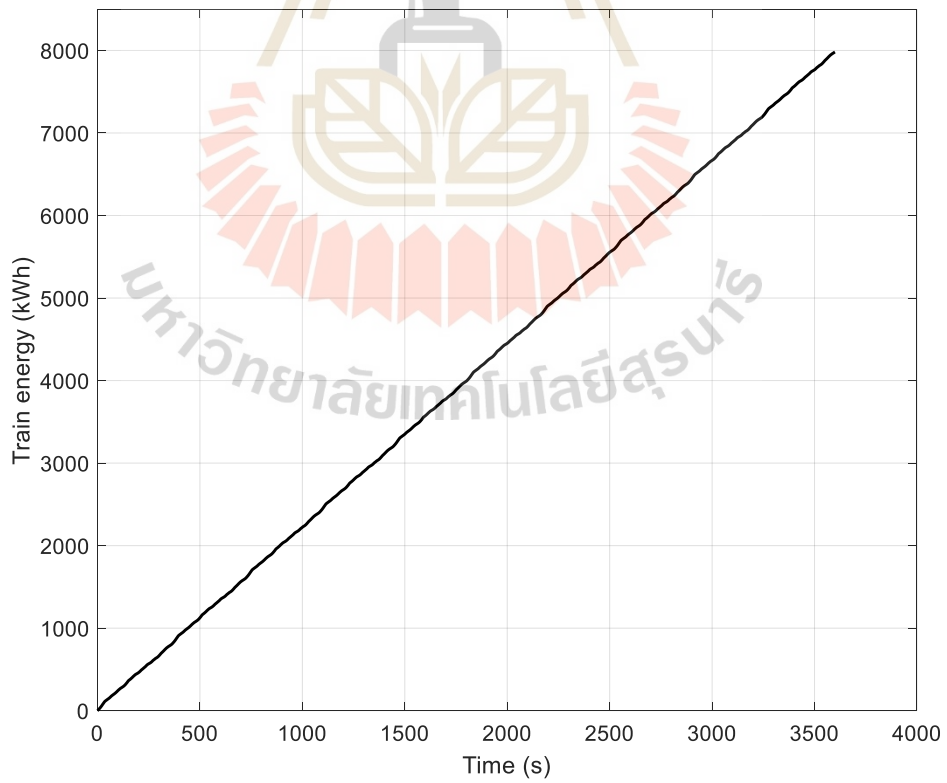
เป็นปริมาณมากเช่นกัน ผลเฉลยแรงดันรางและแรงดันรถไฟฟ้าของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าที่แสดงดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของรถไฟฟ้ามีผลต่อสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยที่รถไฟฟ้าจะทำการดึงกระแสไฟฟ้าจากสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงส่งผลให้แต่ละสถานี มีระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกลงตามตำแหน่งที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน

4.6.2 ผลการทดสอบแบบจำลองรถไฟฟ้าหลายขบวน

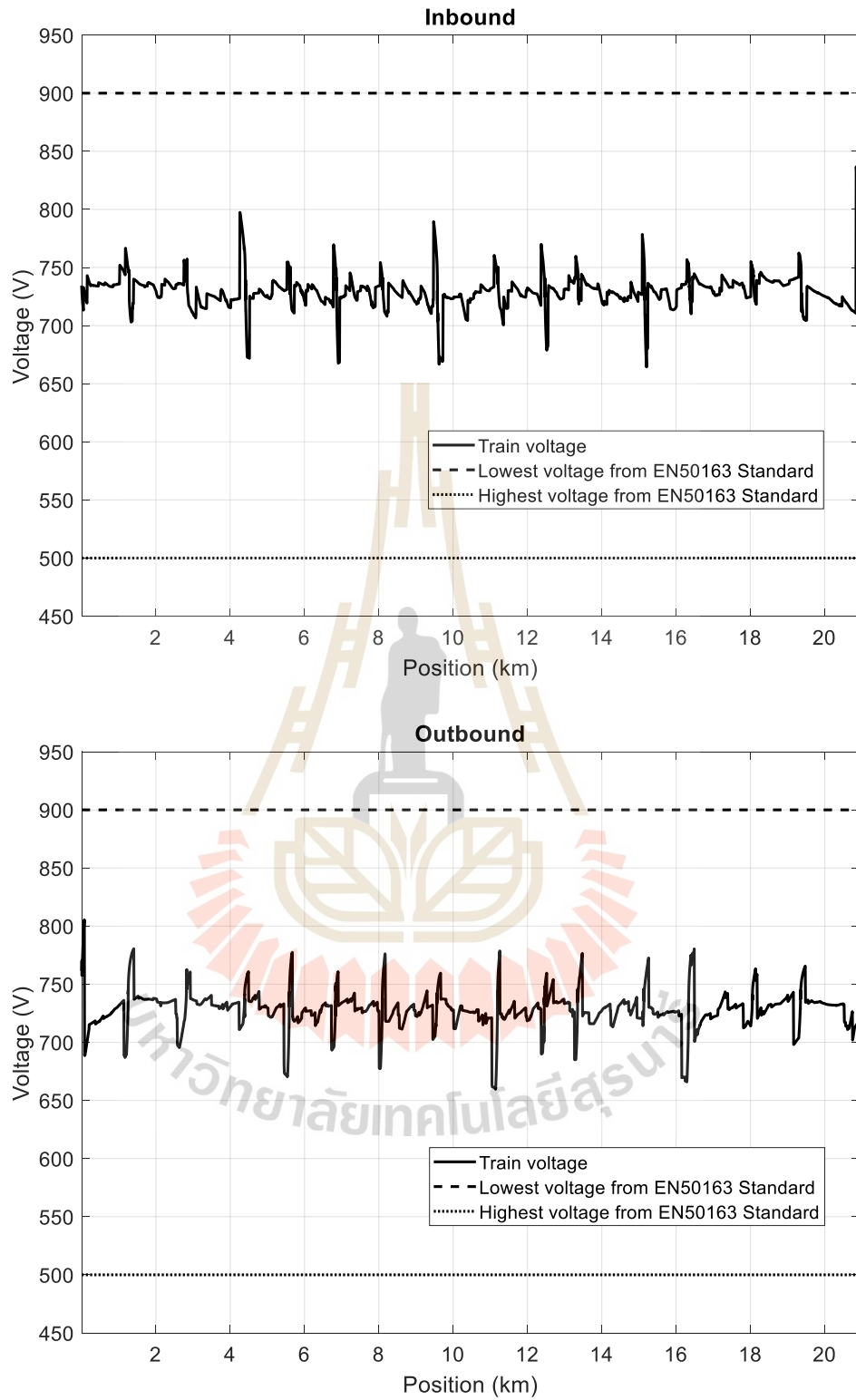
สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนากรณีฐานจากระบบรถไฟฟ้าหนึ่งขบวนเป็นระบบรถไฟฟ้าหลายขบวนด้วยการเพิ่มจำนวนรถไฟฟ้าในระบบโดยกำหนดระยะเวลาการจำลองผลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในช่วงเวลาเร่งด่วน (peak time) ดังนั้นระยะห่างขบวนรถไฟฟ้า (headway) ในช่วงเวลาเร่งด่วนเป็น 6 นาทีต่อขบวน ส่งผลให้กรณีฐานถูกปรับปรุงเป็นรถไฟฟ้าหลายขบวน ความเร็วที่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนใช้ในการเคลื่อนที่เป็นไปตามการออกแบบดังรูปที่ 4.16 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ส่งผลมาจากลักษณะของความเร็วกับแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 4.17 ดังนั้นการใช้พลังงานของแต่ละขบวนรวมถึงกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกกับแรงดันไฟฟ้าตกที่รถไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ ส่วนที่แตกต่าง คือ ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการจำลองกับตำแหน่งของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนแสดงดังรูปที่ 4.26 และ พลังงานสะสมรวมของรถไฟฟ้าทุกขบวนที่ใช้ในการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 4.27 ซึ่งในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าช่วงที่นำมาวิเคราะห์ คือ ช่วงที่มีการให้บริการเต็มระบบ ดังนั้นแรงดันของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนในระบบมีลักษณะที่คล้ายกันทุกขบวนแสดงดังรูปที่ 4.28 ลักษณะการวิ่งของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนจึงมีลักษณะที่คล้ายกันต่างกันเพียงระยะห่างของขบวนรถจึงทำให้ผลเฉลยกำลังไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายกันในทุก ๆ 6 นาที แรงดันรางของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.29 แรงดันของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.30 และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำแสดงดังรูปที่ 4.31



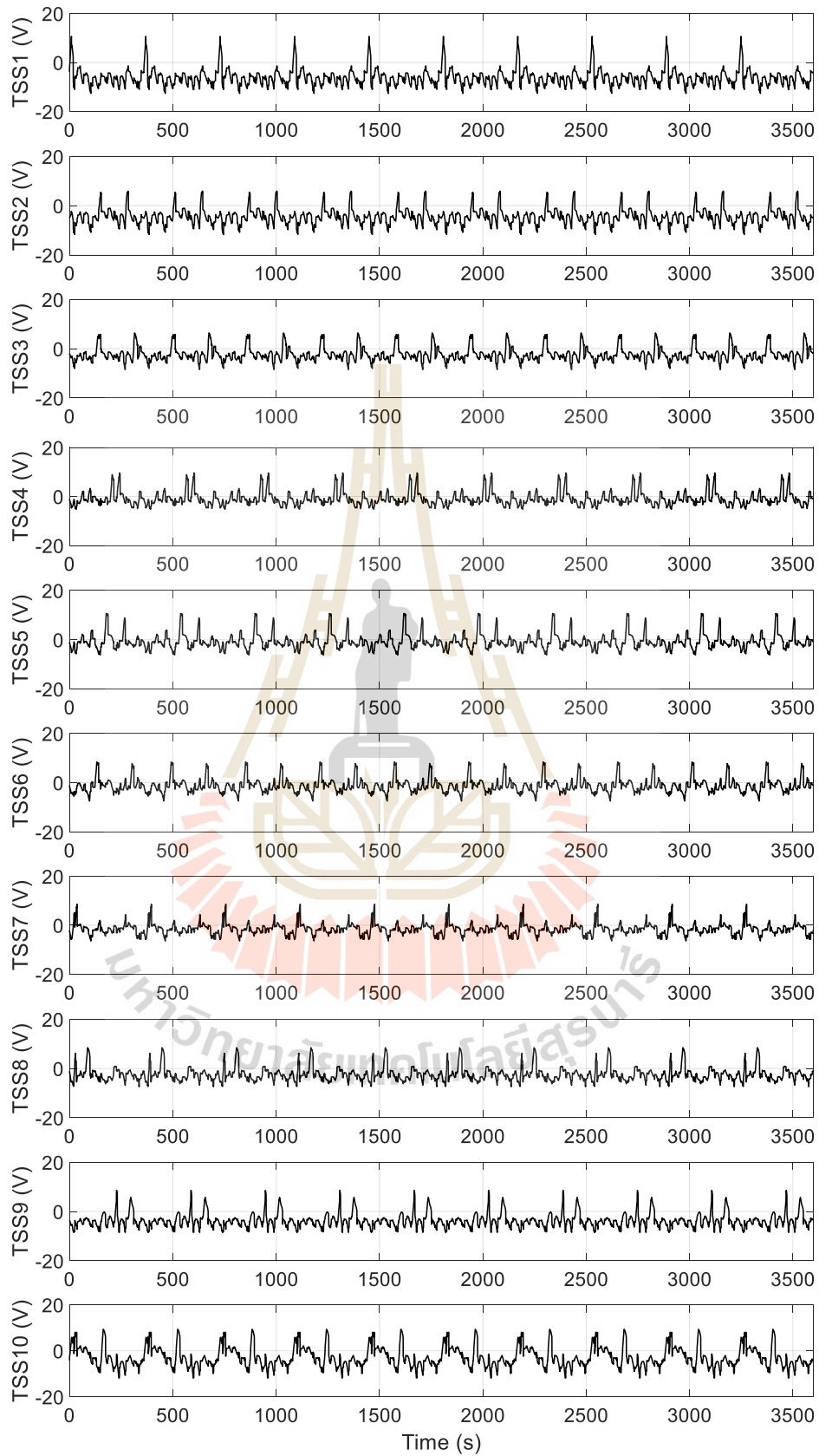
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการจำลองผลกับตำแหน่งของรถไฟฟ้าหลายขบวน



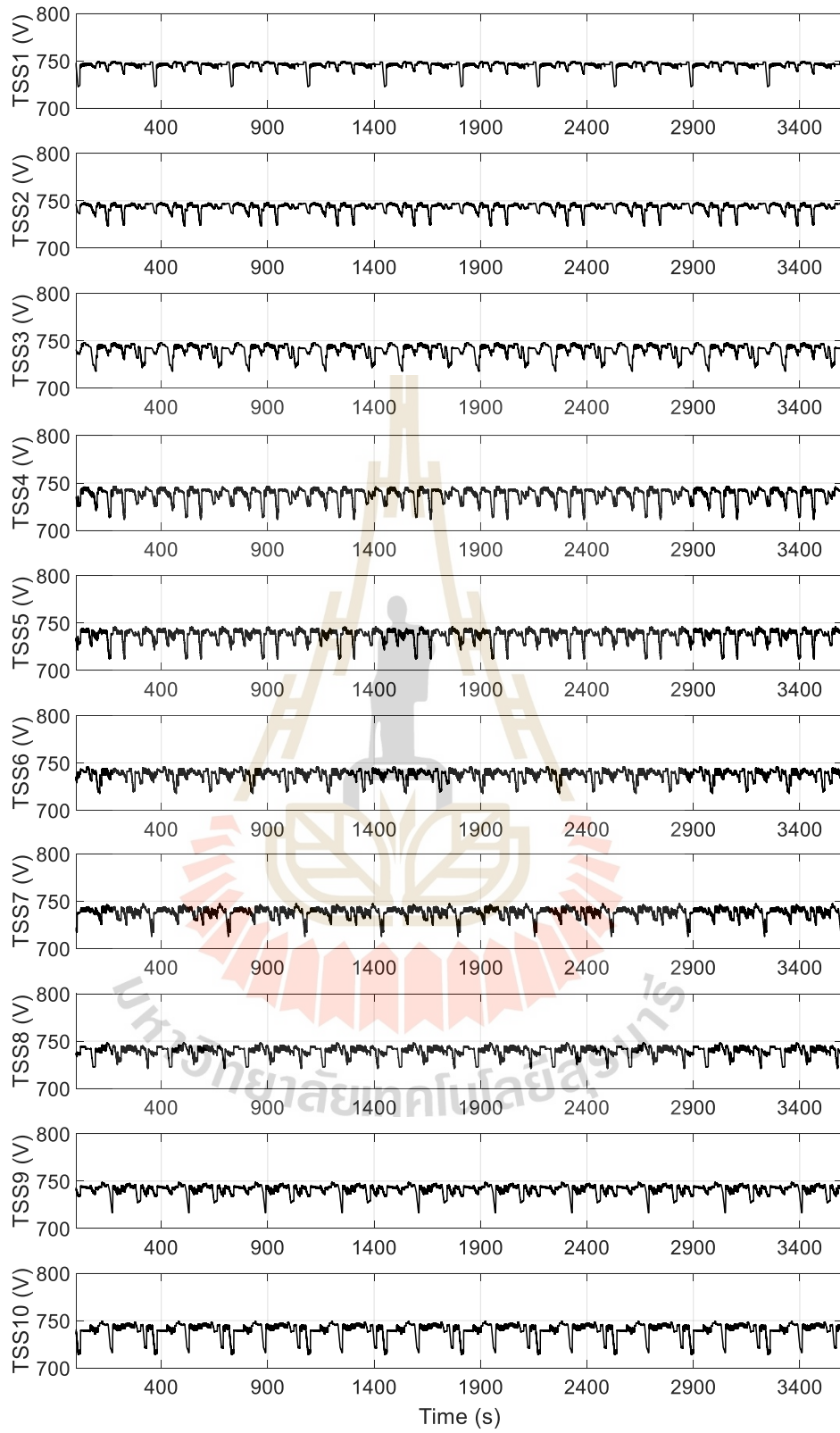
รูปที่ 4.27 พลังงานสะสมที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่หลายขบวน



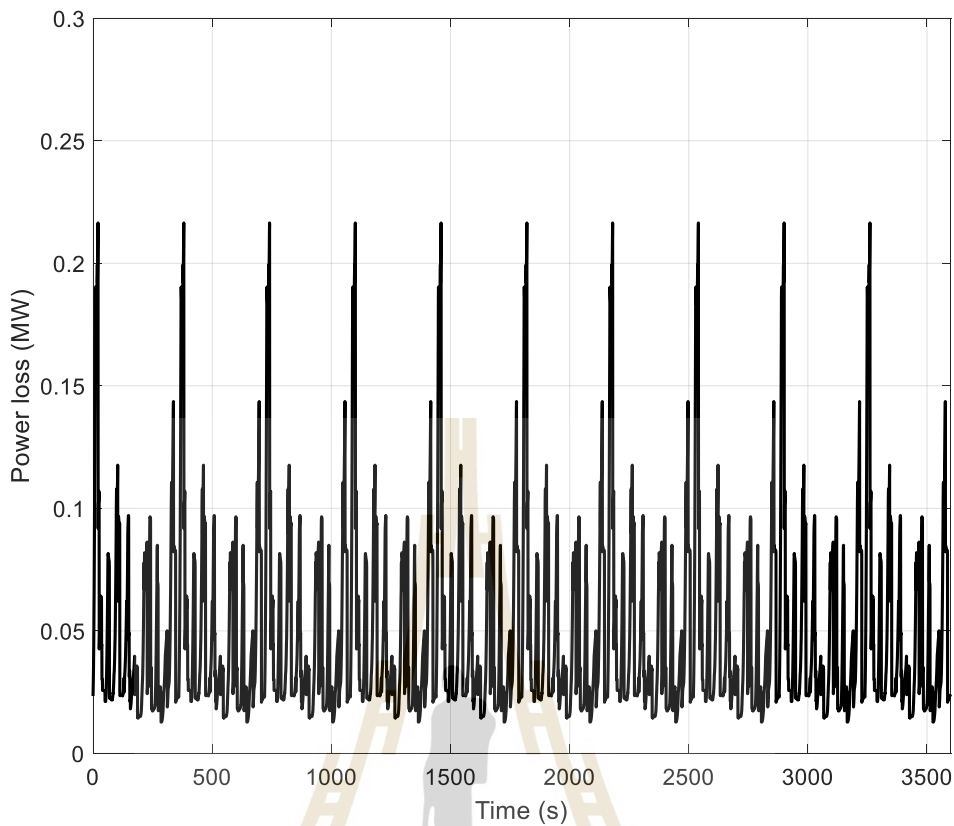
รูปที่ 4.28 แรงดันรถไฟฟ้าในขณะที่เคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวน



รูปที่ 4.29 ระดับแรงดันรางที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับเวลาระบบรถไฟฟ้ามหานคร



รูปที่ 4.30 ระดับแรงดันสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนเทียบกับเวลาระบบรถไฟฟ้าหลายขบวน



รูปที่ 4.31 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำรางที่สามระบบรถไฟฟ้าหลายขบวน

จากรูปที่ 4.26 การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายกันในทุก ๆ 6 นาที ส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า แรงดันรางที่สถานีไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำรูปที่ 4.29 - 4.31 มีลักษณะคล้ายกันในทุก ๆ 6 นาทีเช่นเดียวกัน

4.7 สรุป

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรงหนึ่งขบวนเป็นขั้นต้นของการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมการทำงานของรถไฟฟ้า ประกอบไปด้วย การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้ากระแสดตรง แบบจำลองตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า และการทดสอบแบบจำลองผลระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรงหนึ่งขบวน และหลายขบวน เพื่อพัฒนาและศึกษาทำความเข้าใจในระบบการทำงานของรถไฟฟ้าเป็นกรณีฐานในการเปรียบเทียบผลจากการจำลอง รายละเอียดจะกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 5

เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม

5.1 บทนำ

การศึกษาระบบเก็บสะสมพลังงานแบบติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน กระแสตรงเพื่อลดการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าและเก็บสะสมพลังงานที่เกิดจากการเบรก วิธีการควบคุมการทำงานเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน ดังนั้น ในบทนี้กล่าวถึงการพิจารณาวิธีการควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยวิธีการ Piece-wise linear SOC โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม Particle swarm optimization และ Genetic algorithm optimization เปรียบเทียบการหาค่าที่เหมาะสมของส่วนเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าในการควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า

5.2 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี Particle swarm optimization

การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ Particle swarm optimization หรือที่เรียกว่า PSO เป็นวิธีการหาค่าตอบแบบสุ่ม (random search algorithm) ถูกพัฒนาโดย Eberhart และ Kennedy ในปี ค.ศ. 1995 ซึ่งเป็นวิธีการใช้สำหรับแก้ปัญหาทางคอมพิวเตอร์ หรือวิศวกรรม มีแนวคิดจากการหาอาหารของฝูงนก หรือการหาอาหารของฝูงปลา ซึ่งต้องอาศัยการเคลื่อนที่เป็นกลุ่มและการเว้นระยะห่างของนกแต่ละตัวซึ่งในที่นี้ เรียกว่า กลุ่มอนุภาค (Particle) (Eberhart and Kennedy, 1995) การเปรียบเทียบการหาค่าที่เหมาะสมของวิธี PSO เปรียบเสมือนการหาอาหารของฝูงนกจึงมีคำจำกัดความที่ใช้ในการอ้างอิงถึงการเคลื่อนที่ของฝูงนก เช่น ความเร็ว (velocity) หรือ ตำแหน่ง (position) วิธีการ PSO จะเริ่มจากการสุ่มกลุ่มของคำตอบกับเวกเตอร์ (vector) ที่ใช้ปรับปรุงคำตอบนั้น ๆ กลุ่มคำตอบกับเวกเตอร์จะมีจำนวน k ตัว เท่ากัน โดย PSO จะเรียกคำตอบว่า ตำแหน่ง และเรียกเวกเตอร์ว่า ความเร็ว ของตำแหน่งและความเร็วเปรียบเสมือนตัวนกหรืออนุภาค หรือกล่าวได้ว่าอนุภาคหนึ่งตัวจะรู้ตำแหน่งและความเร็วของตัวเอง โดยอนุภาคทุกตัวจะมีหมายเลขกำกับตั้งแต่อนุภาคหมายเลข 1 อนุภาคหมายเลข 2 ไปถึง อนุภาคหมายเลข k

ความเร็วของอนุภาคแต่ละตัวมีการปรับเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ ตามข้อมูลที่ได้รับโดยข้อมูลสำคัญ คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ตัวมันเองเคยไปมา เรียกว่า ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว (Personal Best position: P_{best}) และตำแหน่งที่ดีที่สุดที่กลุ่มอนุภาคเคยพบ เรียกว่า ตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (Global Best position: G_{best}) ขั้นตอนการทำงานของวิธีการ PSO แบบมาตรฐานเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีความเข้าใจง่ายและไม่ซับซ้อน ดังนี้

- 1) ตั้งค่าเริ่มต้นของอนุภาค (initial particle) การสร้างกลุ่มอนุภาคเริ่มต้นโดยใช้การสุ่มค่าตำแหน่ง X_k และค่าความเร็วการเคลื่อนที่ V_k ของแต่ละอนุภาคดังสมการที่ (5.1) และ (5.2) สุ่มค่าพารามิเตอร์ (parameter) ให้ตัวแปร X และ V ตามจำนวน k

$$X_k = \text{function random value } () \quad (5.1)$$

$$V_k = \text{function random value } () \quad (5.2)$$

- 2) การคำนวณค่าความเหมาะสมของอนุภาค (evaluate fitness value) ฟังก์ชันความเหมาะสมดังสมการที่ (5.3) คำนวณโดยส่งค่า X ให้แก่ฟังก์ชันเป้าหมาย

$$\text{fitness value} = \text{objective function } (X_k) \quad (5.3)$$

- 3) การเก็บค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุด (update P_{best}) ซึ่งเป็นค่าความเหมาะสมในรอบการทำงานปัจจุบัน ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคปัจจุบันดีกว่า P_{best} จะทำการปรับปรุงค่า P_{best} ดังสมการที่ (5.4)

$$\text{IF } \text{fitness value} > P_{best} \\ P_{best} = \text{fitness value} \quad (5.4)$$

- 4) การเก็บค่าตำแหน่งให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (update G_{best}) เป็นตำแหน่งที่ได้ผลลัพธ์ที่พิจารณาจากรอบวนซ้ำตั้งแต่รอบแรกถึงปัจจุบันซึ่งแตกต่างจาก P_{best} ที่พิจารณาเฉพาะรอบปัจจุบัน เงื่อนไขการปรับปรุงดังสมการที่ (5.5)

$$\begin{aligned} \text{IF } fitness\ value > G_{best} \\ G_{best} = X_k \end{aligned} \quad (5.5)$$

5) การคำนวณความเร็วการเคลื่อนที่ (update velocity) ของแต่ละอนุภาคดังสมการ (5.6)

$$V_{k,new} = wV_{k,old} + n_1 random() (P_{best} - X_k) + n_2 random() (G_{best} - X_k) \quad (5.6)$$

โดยที่ w คือ ค่าการถ่วงน้ำหนัก

$V_{k,new}$ คือ ความเร็วที่คำนวณได้จากอนุภาครอบปัจจุบัน

$V_{k,old}$ คือ ความเร็วที่คำนวณได้จากอนุภาครอบก่อนหน้า

n_1, n_2 คือ ค่าคงที่ความเร็วในการค้นหาของอนุภาค และกลุ่มอนุภาคตามลำดับ

6) การปรับปรุงตำแหน่ง (update position) ของแต่ละอนุภาค โดยใช้ผลลัพธ์จากการคำนวณในสมการที่ (5.6) ทำให้ได้ตำแหน่งใหม่ที่อนุภาคทำการเคลื่อนที่ ดังสมการที่ (5.7) ซึ่งการปรับปรุงนั้นจำเป็นต้องตรวจสอบขอบเขตของปัญหา เพื่อไม่ให้ตำแหน่งเกินค่าขอบเขต

$$X_{k,new} = X_{k,old} + V_{k,new} \quad (5.7)$$

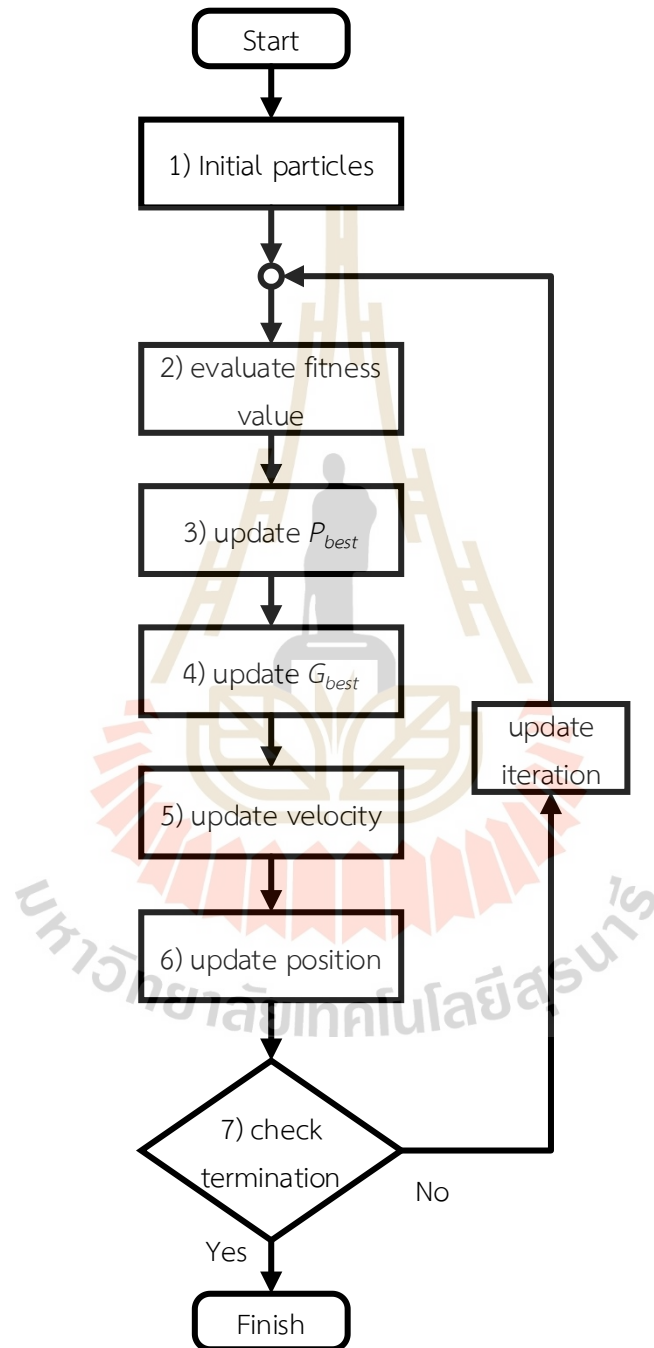
โดยที่ $X_{k,new}$ คือ ค่าตำแหน่งที่คำนวณได้จากอนุภาครอบปัจจุบัน

$X_{k,old}$ คือ ค่าตำแหน่งที่คำนวณได้จากอนุภาครอบก่อนหน้า

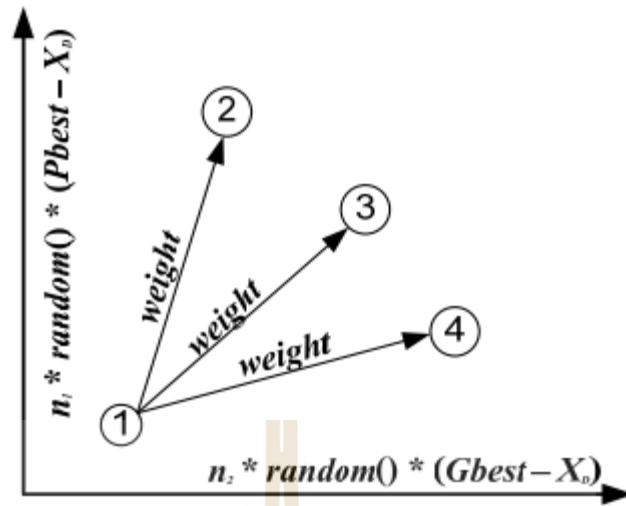
7) การตรวจสอบสิ้นสุดการวนรอบ (termination check) เงื่อนไขที่ตรวจสอบแบ่งได้สองลักษณะ คือ เมื่อผลลัพธ์ที่ได้มีค่าที่สูงหรือดีกว่าคำตอบที่ต้องการให้หยุดการทำงาน หรือการค้นหาใช้ระยะเวลาานาน มีจำนวนรอบถึงค่าที่กำหนดจึงหยุดการทำงาน หากไม่เข้าเงื่อนไขการสิ้นสุดการวนรอบทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2

แผนผังการทำงานแสดงดังรูปที่ 5.1 จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามการคำนวณในขั้นตอนที่ 5 จากสมการที่ (5.6) เมื่อนำมาพิจารณาเขียนเป็นกราฟแสดงการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 5.2 พิจารณาการเคลื่อนที่ในลักษณะหนึ่งมิติ ค่าการถ่วงน้ำหนักใช้ระยะทางในการเคลื่อนที่ ช่วงสมการส่วนที่มี P_{best} ประกอบอยู่ใช้คำนวณทิศทางแนวแกน y และช่วงสมการส่วนที่มี G_{best} ประกอบอยู่ใช้คำนวณทิศทาง

แนวแกน x เมื่อสมการสามส่วนรวมกัน หากส่วนของ P_{best} มีค่าที่ได้จากการสุ่มมากและเป็นทิศทางที่ได้ผลลัพธ์ที่ดี ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่ 1 ไปตำแหน่งที่ 2 ถ้าหากส่วนของ P_{best} ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเดิม ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่ 1 ไปตำแหน่งที่ 4



รูปที่ 5.1 แผนผังการทำงานของ PSO



รูปที่ 5.2 การคำนวณการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค

ที่มาภาพ: (นุทยะสกุล, 2011)

5.3 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี Genetic algorithm optimization

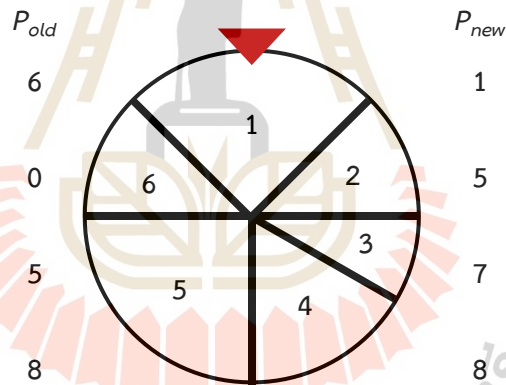
การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ Genetic algorithm หรือที่เรียกว่า GA วิธีการเชิงพันธุกรรมมีลักษณะการทำงานเลียนแบบกระบวนการวิวัฒนาการทางธรรมชาติ โดยอิงหลักการคัดเลือกตามธรรมชาติของดาร์วิน (Darwin's theory of natural selection) ซึ่งแนวคิดดังกล่าว ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นวิธีการในการแก้ปัญหาในปี ค.ศ. 1975 โดย John Holland หลักการทำงานของวิธี GA จะมีวิธีการหาค่าคำตอบที่ต้องการ โดยอาศัยรูปแบบกลไกการคัดเลือกพันธุกรรมจากธรรมชาติซึ่งสามารถอยู่รอดและถูกถ่ายทอดไปยังรุ่นต่อ ๆ ไปได้ จุดเด่นของ GA จะเก็บผลเฉลยเป็นเซต ในปัจจุบันวิธีการ GA ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้มีความสามารถและประสิทธิภาพสูงขึ้น

วิธีการ GA มีการแบ่งประชากรเป็นสองชนิด คือ ประชากรเก่า (P_{old}) และประชากรใหม่ (P_{new}) เปรียบเสมือนกลุ่มของรุ่นพ่อแม่กับกลุ่มของรุ่นลูก ประชากรทั้งหมดมีโครงสร้างเหมือนกัน ประกอบด้วย โครโมโซม (chromosome) และยีน (gene) เป็นส่วนประกอบภายใน ส่วนประกอบอีกส่วน คือ ลักษณะภายนอกซึ่งเรียกว่าค่าความเหมาะสมของประชากร (fitness value) เปรียบได้กับความสูงหรือน้ำหนักของประชากร ดังนั้น โครโมโซม คือ กลุ่มพารามิเตอร์ที่เป็นส่วนประกอบใช้ค้นหาหรือคำนวณ สร้างจากเลขไบนารี ซึ่งเป็นการสร้างจากเลขฐานสอง ขั้นตอนการทำงานของ GA แบบพื้นฐาน ดังนี้

- 1) การสร้างประชากรเริ่มต้น (initial population) โดยใช้การสุ่มยีน ค่าของยีนมีค่าไม่เกินขอบเขตของปัญหา การสุ่มที่ดีค่าที่ได้ต้องกระจายและไม่มีรูปแบบเลขซ้ำกัน ดังสมการที่ (5.8) ฟังก์ชันการสุ่มส่งค่าโครโมโซมของประชากรที่ได้สุ่มค่าแล้วให้ประชากรเก่า

$$P_{old} = \text{random generation}() \quad (5.8)$$

- 2) การคัดเลือกประชากร (selection population) เพื่อนำไปทำกระบวนการทางพันธุกรรม (genetic operation) โดยวิธีการคัดเลือกประชากรทำได้หลายวิธี เช่น การคัดเลือกโดยการหมุนวงล้อ แสดงดังรูปที่ 5.3 การคัดเลือกแบบสุ่ม และการคัดเลือกแบบแข่งขัน แต่ละวิธีให้น้ำหนักการเลือกประชากรที่แตกต่างกัน วิธีการสุ่มเป็นวิธีการกระจายโอกาสให้แก่ประชากรมากที่สุด ส่วนวิธีการแข่งขันประชากรในกลุ่มที่มีค่าความเหมาะสมสูงมีโอกาสได้คัดเลือกมากที่สุด ดังสมการที่ (5.9)



รูปที่ 5.3 การคัดเลือกโดยการหมุนวงล้อ

ที่มาภาพ: (ชัยวิลาศ, 2011)

$$[P_{new,i}, P_{new,j}] = \text{function selection}(P_{old}) \quad (5.9)$$

- 3) การกระทำทางพันธุกรรม (genetic operation) ประกอบด้วยการครอสโอเวอร์ (crossover) คือ การสลับค่าของโครโมโซมระหว่างประชากรที่ได้คัดเลือก วิธีการสลับค่ามีหลายรูปแบบ เช่น การสุ่มตำแหน่งยีนที่ต้องการสลับค่า และการสลับค่าแบบระบุตำแหน่งยีน จำนวนของการสลับค่าของยีนขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนยีน (Crossover Probability: pc) เมื่อทำการครอสโอเวอร์เสร็จแล้วจึงเข้าสู่

กระบวนการกลายพันธุ์ (mutation) เป็นกระบวนการสุ่มค่าพารามิเตอร์ใหม่ให้ยีน โดย ยีนในตำแหน่งที่ถูกกำหนดค่าจากโอกาสความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (Mutation Probability: pm) จากสมการที่ (5.10) ประชากรใหม่ ส่งค่าให้ฟังก์ชันเพื่อแลกเปลี่ยน โครโมโซมระหว่างกันโดยโอกาสในการสลับกำหนดจาก pc ผลลัพธ์ที่ได้ส่งกลับแทน ให้แก่ประชากรใหม่ซึ่งโครโมโซมของประชากรทั้งสองมีลักษณะแตกต่างไปจากเดิม เพราะมีบางส่วนที่ได้จากประชากรอีกตัวมาผสมอยู่ จากสมการที่ (5.11) ประชากรใหม่ ส่งค่าให้ฟังก์ชันกลายพันธุ์ ฟังก์ชันทำหน้าที่เปลี่ยนค่ายีนใหม่ด้วยการสุ่ม โอกาสที่จะได้ ค่ายีนใหม่ขึ้นอยู่กับ pm ผลลัพธ์ที่ได้ส่งกลับให้ประชากรใหม่ตัวเดิม

$$[P_{new,i}, P_{new,j}] = \text{function crossover}(P_{new,j}, P_{new,i}, pc) \quad (5.10)$$

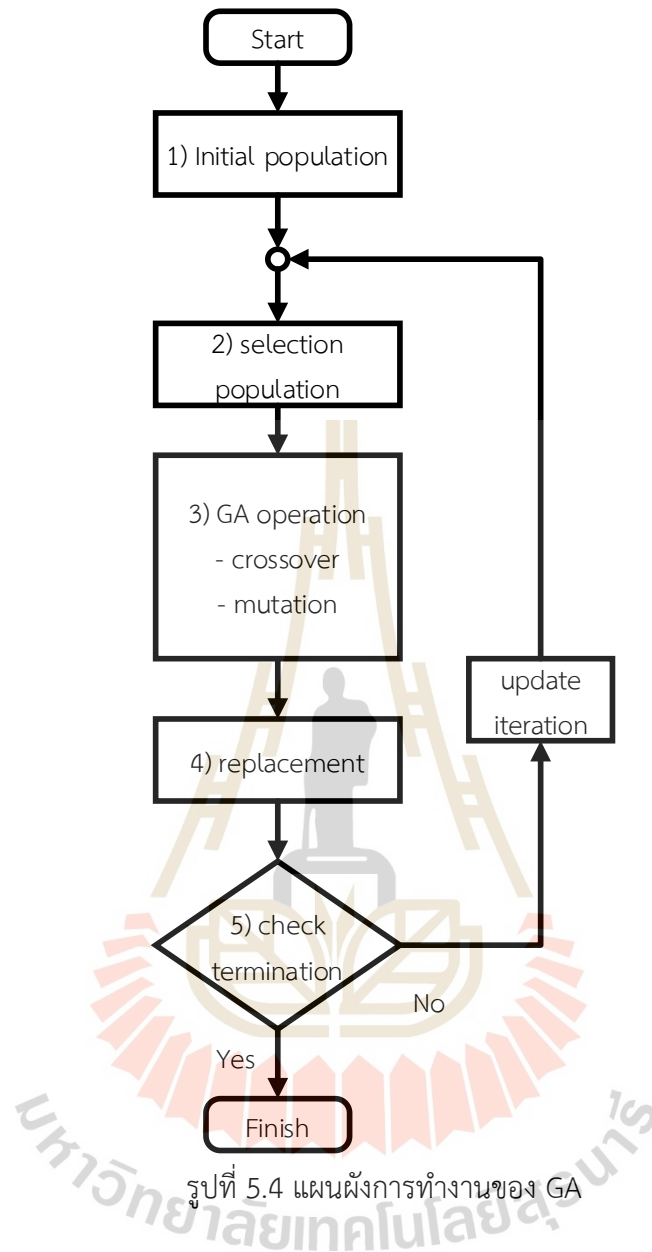
$$P_{new} = \text{function mutation}(P_{new}, pm) \quad (5.11)$$

- 4) การแทนค่าประชากร (replacement) ที่มีค่าเหมาะสมเป็นประชากรรุ่นต่อไป ดังสมการ ที่ (5.12) ประชากรเก่าทั้งหมดและประชากรใหม่ทั้งหมด จะนำมาพิจารณาเลือก เฉพาะที่มีค่าความเหมาะสมสูงส่งให้แก่กลุ่มประชากรรุ่นต่อไป

$$P_{old} = \text{function replacement}(P_{old}, P_{new}) \quad (5.12)$$

- 5) การตรวจสอบสิ้นสุดการทำงาน (termination) การค้นหาผลลัพธ์ใช้ระยะเวลาาน หลายรุ่นประชากร เงื่อนไขการตรวจสอบกำหนดได้สองลักษณะ ได้แก่ เมื่อผลลัพธ์ที่ได้มี ค่าสูงกว่าหรือเท่ากับผลลัพธ์ที่ต้องการ หรือจำนวนประชากรถึงรอบการค้นหาที่กำหนด หากไม่เข้าเงื่อนไขการสิ้นสุดการวนรอบทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2

แผนผังการทำงานแสดงดังรูปที่ 5.4 จากการสุ่มของประชากรด้วยวิธี GA เมื่อหาค่าที่ เหมาะสมที่สุดของประชากร วิธีการเป็นการสุ่มผ่านความน่าจะเป็นค่าคำตอบที่ได้ไม่รับรองว่าดีที่สุด แต่ใกล้เคียงค่าที่ดีที่สุด จึงควรมีการคำนวณซ้ำหลาย ๆ รอบเพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสม



5.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การจำลองผลการประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นค่าการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่ำสุดของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยรวม ดังสมการที่ (5.13)

$$\text{Minimize } f = \sum_{t=0.5}^{ST} \sum_{i=1}^{NS} E_{sub,i,t} \quad (5.13)$$

โดยที่ f	คือ	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
NS	คือ	จำนวนสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า
ST	คือ	ระยะเวลาในการจำลอง (s)
E_{sub}	คือ	พลังงานที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า (Wh)

เงื่อนไขบังคับการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ เงื่อนไขบังคับอสมการ (inequality constraint) และเงื่อนไขบังคับสมการ (equality constraint) รายละเอียดดังนี้

เงื่อนไขบังคับอสมการ

$$0 \leq \Delta V_{d,min} \leq \Delta V_{d,max} \quad (5.14)$$

เงื่อนไขบังคับสมการ

$$SOC_{end} = 100 \quad (5.15)$$

$$V_{train} = V_{limit,NP} \quad (5.16)$$

$$S_{train} = S_{NP} \quad (5.17)$$

โดยที่ $\Delta V_{d,min}$	คือ	ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่คายประจุ (V)
$\Delta V_{d,max}$	คือ	ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่คายประจุ (V)
$\Delta V_{c,min}$	คือ	ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ชาร์จประจุ (V)
$\Delta V_{c,max}$	คือ	ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ชาร์จประจุ (V)
SOC_{end}	คือ	สถานะประจุไฟฟ้าที่สิ้นสุดการเดินทาง (%)
SOC_{set}	คือ	สถานะประจุไฟฟ้าที่กำหนด (%)
$V_{limit,NP}$	คือ	ความเร็วจำกัดที่สถานีรับส่งผู้โดยสาร NP (km/h)
S_{NP}	คือ	ตำแหน่งของสถานีรับส่งผู้โดยสาร (km)

การคำนวณพลังงานรวมที่เกิดขึ้นในระบบรถไฟฟ้าดังสมการ (5.18) โดยการคำนวณพลังงานไฟฟ้าจะคิดจากผลรวมของกำลังไฟฟ้าในทุก ๆ time step

$$E = \sum_{t=0.5}^{ST} P_t \cdot \frac{1}{3600} \cdot \Delta t \quad (5.18)$$

โดยที่	E	คือ พลังงานไฟฟ้า (Wh)
	ST	คือ ระยะเวลาในการจำลอง (s)
	Δt	คือ time step = 0.5 s
	P_t	คือ กำลังไฟฟ้าในแต่ละ time step (W)

ผลเฉลยของพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าสอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังสมการ (5.19) ส่วนพลังงานที่เกิดจากการเบรกไม่ถูกนำมาคิดในสมการเพราะพลังงานส่วนนี้ถูกกำจัดทิ้งเป็นพลังงานความร้อน

$$E_{sub} = E_{train} + E_{loss} \quad (5.19)$$

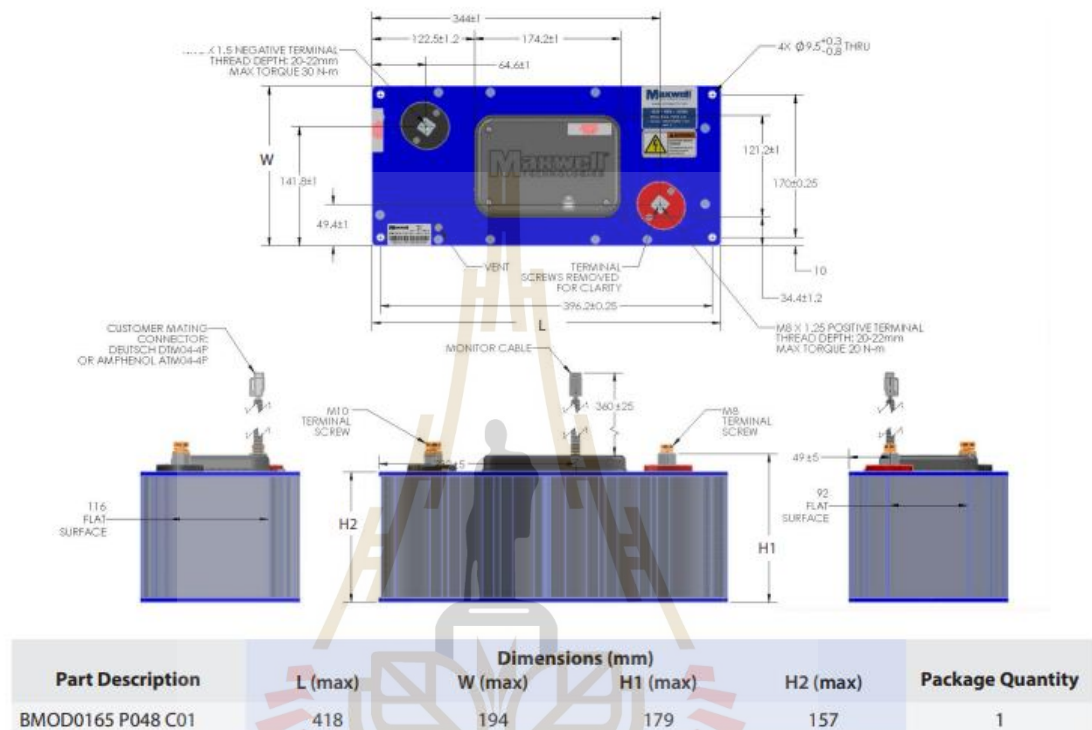
โดยที่	E_{sub}	คือ พลังงานไฟฟ้าของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า (Wh)
	E_{train}	คือ พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า (Wh)
	E_{loss}	คือ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำ (Wh)

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการ PSO และวิธีการ GA เปรียบเทียบการทำงานและค่าที่ดีที่สุดที่โปรแกรมคำนวณแก้ไขปัญหาของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มานำเสนอ

5.4.1 ระบบทดสอบ

การทดสอบการทำงานใช้กับกรณีศึกษาในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดรสายสีม่วง รายละเอียดพารามิเตอร์และเงื่อนไขสำหรับการจำลองผลแสดงในหัวข้อที่ 4 พารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 5.1 เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในท้องตลาด ในการประยุกต์ใช้งานมีการออกแบบให้ระดับแรงดันไฟฟ้ามีขนาดที่ใกล้เคียงกับระบบรถไฟฟ้าที่ 765 V ด้วยการอนุกรม 15 โมดูล และออกแบบให้มีขนาดของ

กระแสไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีขนาดมากกว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกของรถไฟฟ้าที่ 2000 A ด้วยการขนาน 20 โมดูล ทำให้ขนาดของความจุพลังงานรวมอยู่ที่ 15.90 kWh แสดงพารามิเตอร์รวมดังตารางที่ 5.2 รูปที่ 5.5 แสดงขนาดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด



รูปที่ 5.5 ขนาดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด Maxwell BMOD0165

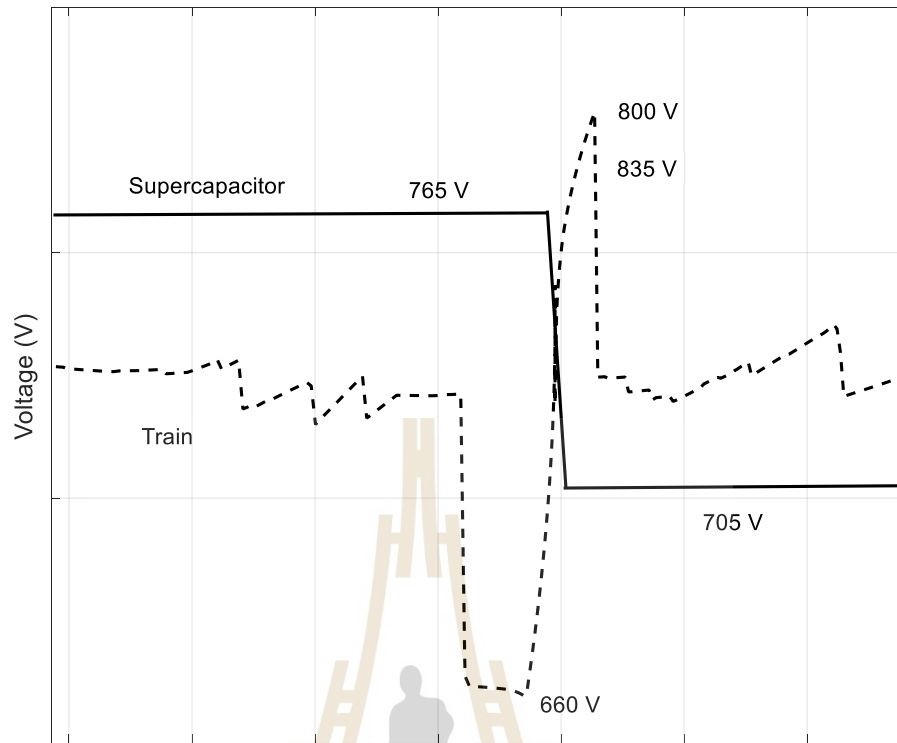
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ตัวเก็บประจุยิ่งยวด Maxwell BMOD0165 ต่อ 1 โมดูล

Parameter	Value	Unit
Rated capacitance	165	F
ESR	6.0	mΩ
Rated voltage	48	V
Maximum voltage	51	V
Rated current	100	A
Storage energy	53	Wh
Mass	13.8	kg

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ชุดตัวเก็บประจุยิ่งยวด Maxwell BMOD0165 ติดตั้งบนขบวนรถ

Parameter	Value	Unit
Rated capacitance	220	F
ESR	4.5	m Ω
Rated voltage	720	V
Maximum voltage	765	V
Maximum current	2000	A
Storage energy	15.90	kWh
Mass	4.14	Ton

การจำลองผลการทดสอบกำหนดให้มีขบวนรถไฟฟ้าให้บริการหลายขบวน วิ่งจาก สถานีคลองบางไผ่ ไปถึง สถานีเตาปูน และทำการวิ่งกลับมายังสถานีคลองบางไผ่รวมระยะทางทั้งสิ้น 41.88 km โดยกำหนดเส้นโค้งความเร็วในการวิ่งของรถไฟฟ้าดังรูปที่ 4.16 ซึ่งผ่านการออกแบบตาม ตารางเวลา และใช้วิธีการควบคุมตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยวิธีการ Piece-wise linear SOC ซึ่งในการ หาค่าที่เหมาะสมจะทำการสุ่มหาค่า ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของการคายประจุ ที่สามารถควบคุม ให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีระดับของสถานะประจุตามที่กำหนดได้ในตอนจบการเดินทาง โดยค่าของส่วน ต่างแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่คายประจุและส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ชาร์จประจุกำหนดจากสมการ (4.22) ใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟฟ้าเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุ ยิ่งยวดได้ส่วนต่างสูงสุดที่ 130 V และใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของรถไฟฟ้าเทียบกับระดับ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้ส่วนต่างสูงสุดที่ 105 V แสดงดังรูปที่ 5.6 ตารางที่ 5.3 แสดงเงื่อนไขการจำลองผลการทดสอบ ซึ่งในการจำลองผลหาส่วนต่างต่ำที่สุดเริ่มกำหนดค่าขอบเขต ในการคำนวณตั้งแต่ 0 V ถึง 105 V ของการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่คายประจุ ดังตารางที่ 5.4 โดยแบ่งเป็นเส้นทางขาเข้า และเส้นทางขาออก



รูปที่ 5.6 ระดับแรงดันไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้าเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขการจำลองผลแต่ละกรณี

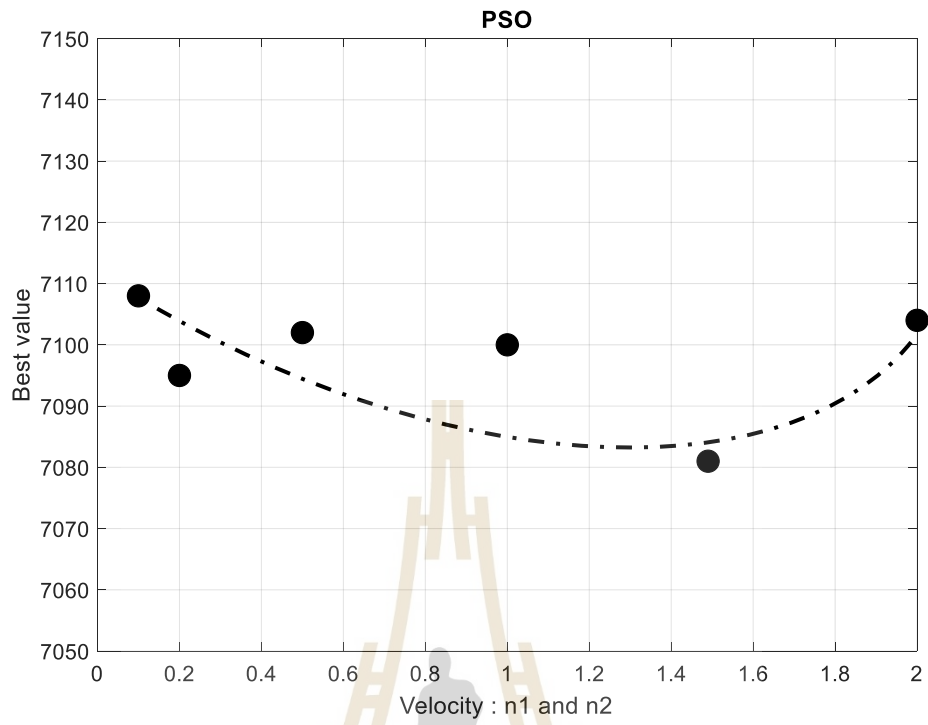
กรณี	ตัวเก็บประจุยิ่งยวด	การควบคุม SOC
ฐาน	ไม่ติดตั้ง	-
1	ติดตั้ง	$SOC_{start} = 100$
2	ติดตั้ง	$SOC_{start} = 75$
3	ติดตั้ง	$SOC_{start} = 50$
4	ติดตั้ง	$SOC_{start} = 25$
5	ติดตั้ง	$SOC_{start} = 0$

ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์สำหรับการหาค่าที่เหมาะสม

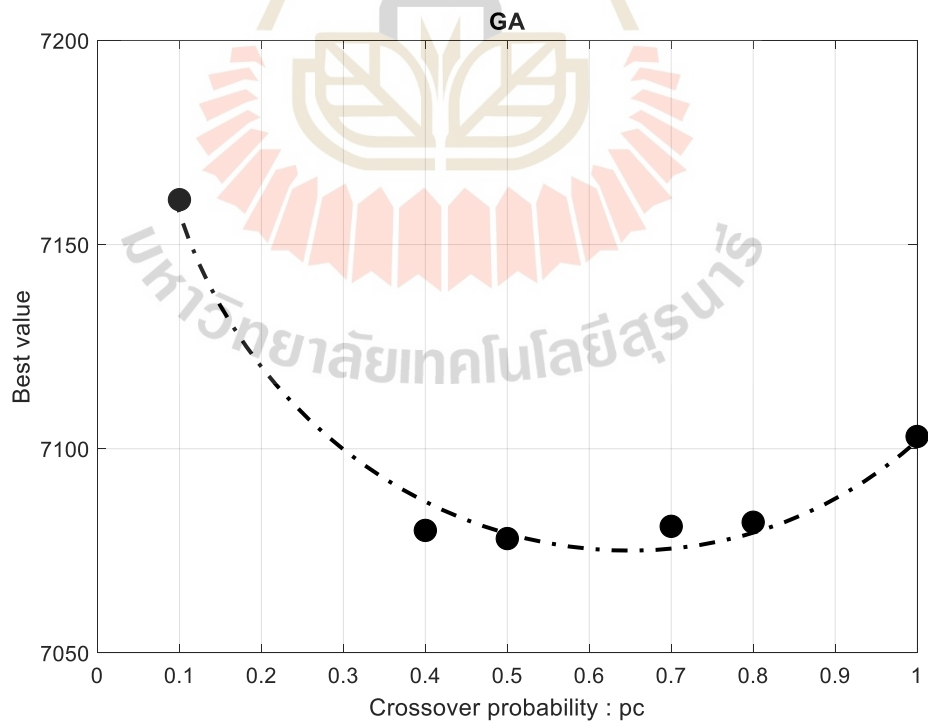
ตัวแปรควบคุม	ขอบเขตข้อจำกัดของตัวแปร [min, max]
ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าคายประจุต่ำสุดขาเข้า ($\Delta V_{d,min}$)	[0, 105]
ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าคายประจุต่ำสุดขาออก ($\Delta V_{d,min}$)	[0, 105]
พารามิเตอร์สำหรับวิธี PSO	
Swarm size	50
Particle velocity (n_1)	1.49
Group velocity (n_2)	1.49
Function tolerance	10^{-3}
พารามิเตอร์สำหรับวิธี GA	
Population	50
Crossover probability	0.6
Mutation probability	0.4
Function tolerance	10^{-3}

ในการจำลองวิธีหาค่าที่เหมาะสมด้วย PSO ได้มีการปรับปรุง ค่าคงที่ความเร็วในการค้นหาของอนุภาค (n_1) และค่าคงที่ความเร็วในการค้นหาของกลุ่มอนุภาค (n_2) จากสมการที่ (5.6) โดยในการปรับปรุงจากการสุ่มจำลองผลในช่วง 0.1 ถึง 2.0 ผลการสุ่มแสดงดังรูปที่ 5.7 มีลักษณะเป็นกราฟระฆังหงาย และแสดงผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่ค่าคงที่ความเร็วในการค้นหาของอนุภาค และกลุ่มอนุภาคเท่ากับ 1.49

ในการจำลองวิธีหาค่าที่เหมาะสมด้วย GA ได้มีการปรับปรุง อัตราความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนยีนส์ (Crossover Probability: pc) จากสมการที่ (5.10) โดยในการปรับปรุงจากการสุ่มจำลองผลช่วง 0.1 ถึง 1.0 ผลการสุ่มแสดงดังรูปที่ 5.8 มีลักษณะเช่นเดียวกับกราฟของวิธีการ PSO เป็นลักษณะระฆังหงาย มีช่วงที่ผลลัพธ์ดีที่สุดใกล้เคียงกันอยู่ที่ความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนยีนส์ 0.5 ถึง 0.8 จึงเลือกใช้ $pc = 0.6$ และอัตราความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (Mutation Probability: pm) จากสมการที่ (5.11) $pm = 0.4$



รูปที่ 5.7 ผลการสุ่มปรับค่าคงที่ความเร็วของวิธีการ PSO



รูปที่ 5.8 ผลการสุ่มปรับค่าอัตราการ crossover ของวิธีการ GA

5.5 สรุป

บทนี้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อลดพลังงานที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับระบบรถไฟฟ้า โดยมีกรณีศึกษาเป็นระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรงสายสีม่วง ที่ให้บริการในประเทศไทย โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถที่มีการควบคุมด้วยวิธีการ Piece-wise linear SOC และมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม Particle swarm optimization และ Genetic algorithm optimization ที่นำมาเปรียบเทียบหาค่าการทำงานที่เหมาะสมและประสิทธิภาพที่ดี กรณีศึกษาทั้งหมดและการประเมินจะถูกนำเสนอในบทถัดไป



บทที่ 6

ผลการจำลองและการประเมิน

6.1 บทนำ

จากการศึกษาการควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถด้วยวิธีการ Piece-wise linear SOC และการหาค่าเหมาะสมที่สุดของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ในบทนี้นำเสนอผลการศึกษาและการประเมินเปรียบเทียบการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เพื่อทราบถึงแนวโน้มของแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำงาน

6.2 ผลการจำลอง

ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวนแสดงดังแสดงในบทที่ 4 การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าและการหาผลเฉลยทางไฟฟ้า ในทุกกรณีรถไฟฟ้ามีลักษณะการเคลื่อนที่และเส้นโค้งความเร็วเท่ากันแสดงดังรูปที่ 4.16 โดยแบ่งเป็นเส้นทางเข้าเมืองสถานีคลองบางไผ่ไปเตาปูน และเส้นทางออกเมืองสถานีเตาปูนไปสถานีคลองบางไผ่ กรณีฐานระบบรถไฟฟ้าหลายขบวนที่วิ่งให้บริการอย่างสม่ำเสมอทุก ๆ 6 นาที โดยกรณีศึกษากำหนดสถานะประจุเริ่มต้นที่ 100%, 75%, 50%, 25% และ 0% ตามลำดับ ระดับแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเริ่มต้นแสดงดังตารางที่ 6.1 มีการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดอนุกรม 15 โมดูล และขนาน 20 โมดูลในทุกกรณีศึกษา

ตารางที่ 6.1 ระดับสถานะเริ่มต้นของตัวเก็บประจุยิ่งยวดทุกกรณี

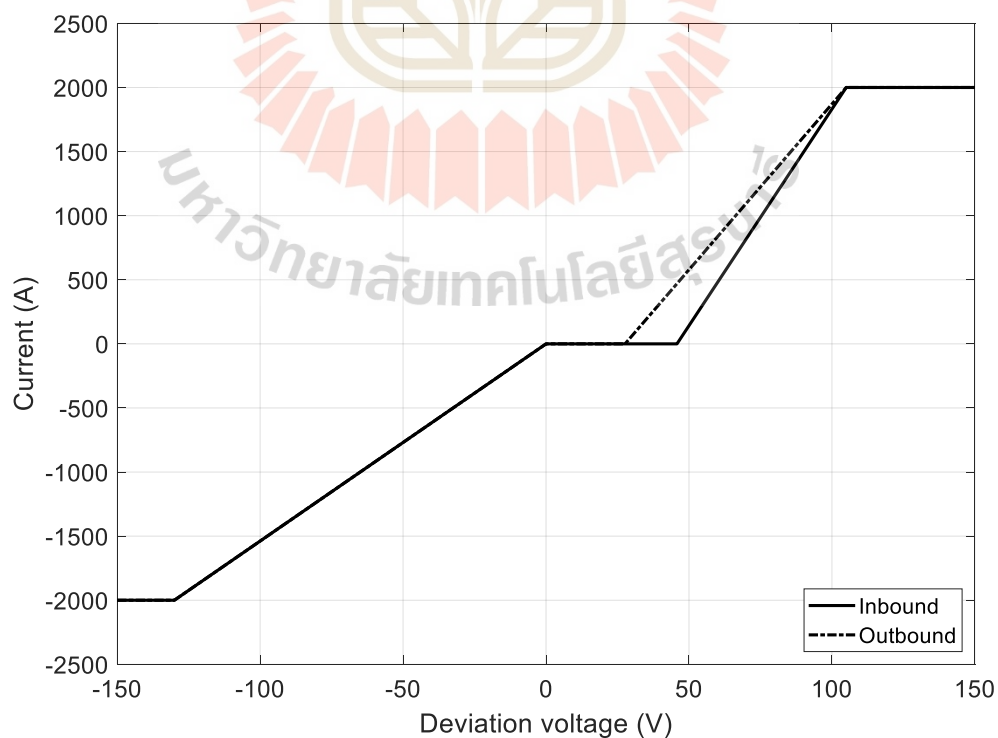
กรณี	สถานะประจุ (%)	แรงดันไฟฟ้า (V)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)
1	100	765	15.90
2	75	750	11.92
3	50	735	7.95
4	25	720	3.97
5	0	705	0

6.2.1 ผลการจำลองกรณีที่ 1 สถานะประจุเริ่มต้น 100%

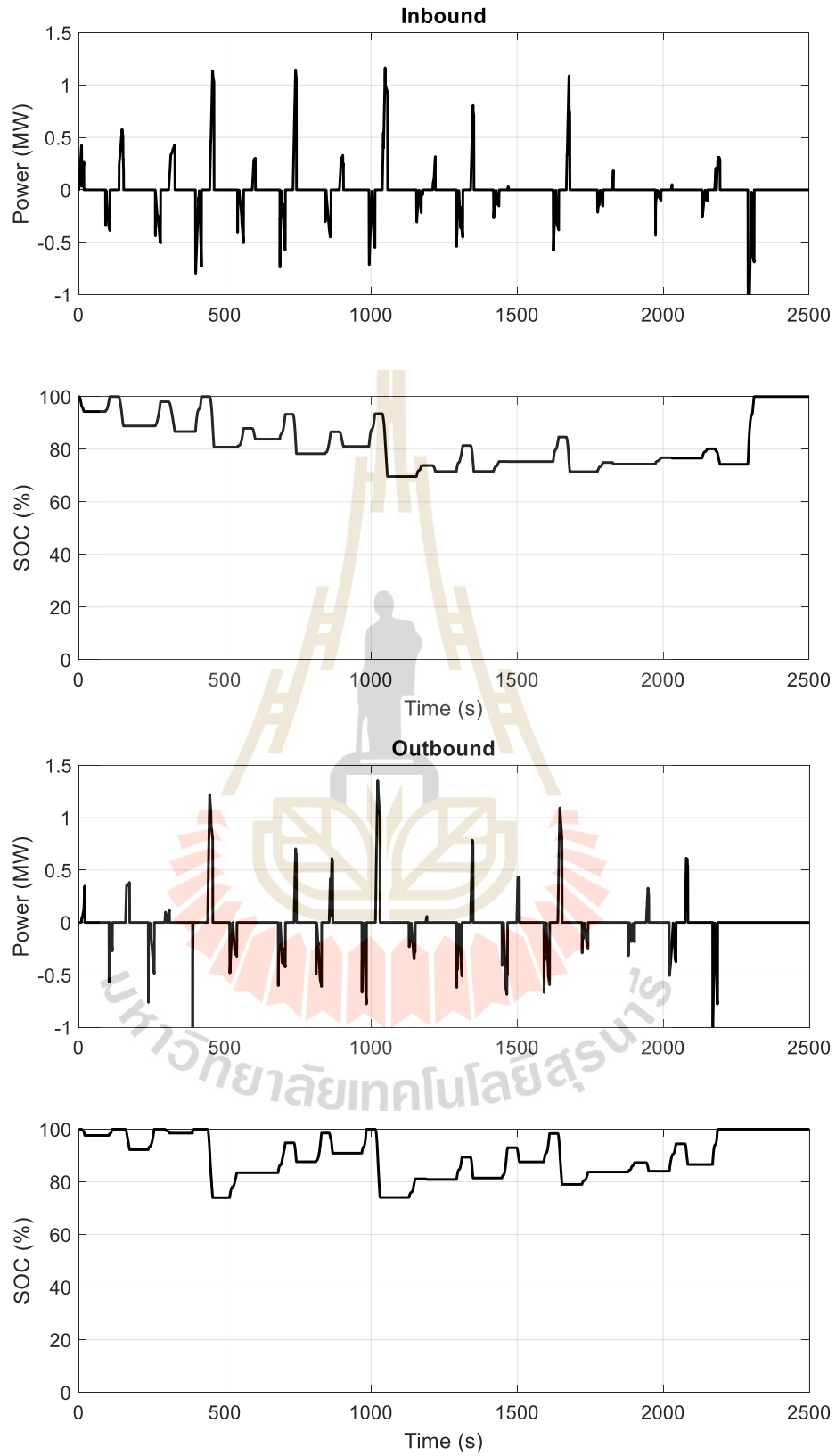
ผลการหาค่าเหมาะที่สุดของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำงานแสดงดังตารางที่ 6.2 และแผนภาพคุณลักษณะความชันของการทำงานแสดงดังรูปที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบกับกรณีฐาน แสดงดังรูปที่ 6.2 - 6.5

ตารางที่ 6.2 ผลการหาค่าเหมาะที่สุด กรณีที่ 1

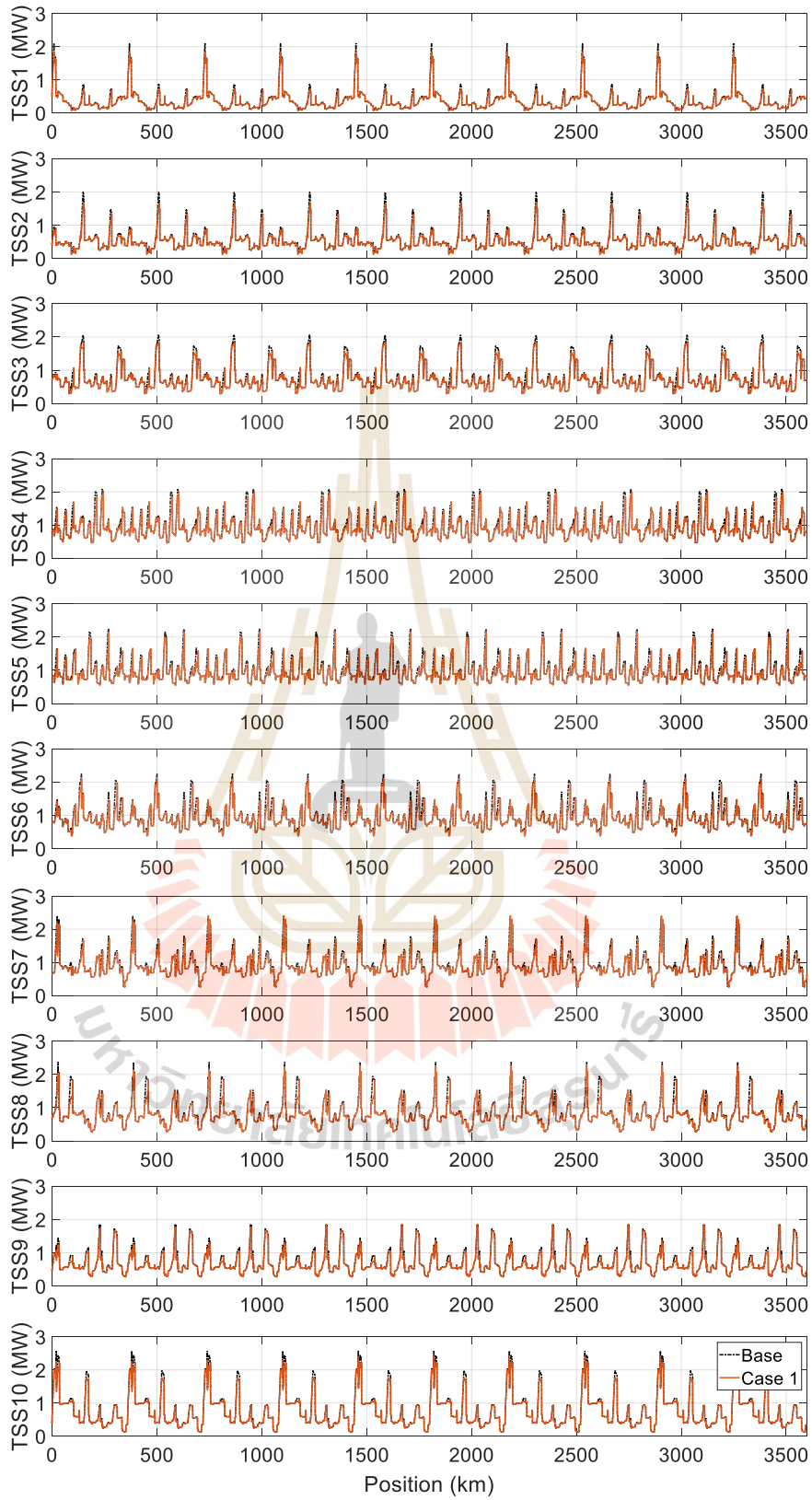
Non-optimization			
Energy substation (kWh)		7506.83	
Optimization (PSO)			
$\Delta V_{d,min}$ Inbound (V)	$\Delta V_{d,min}$ Outbound (V)	Best function (kWh)	Saving (%)
45.80	27.64	7078.43	5.71
Optimization (GA)			
$\Delta V_{d,min}$ Inbound (V)	$\Delta V_{d,min}$ Outbound (V)	Best function (kWh)	Saving (%)
45.76	27.34	7077.38	5.72



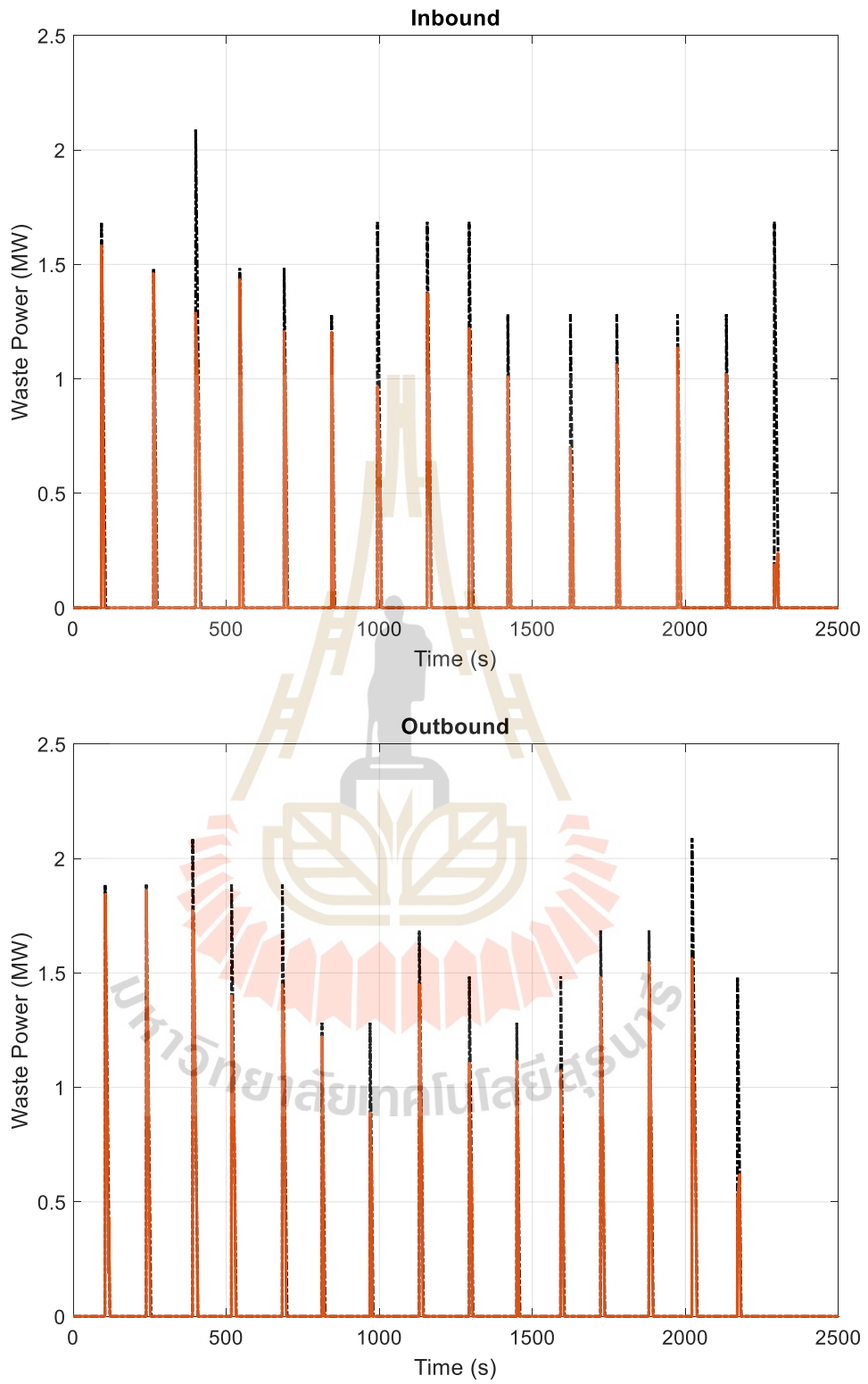
รูปที่ 6.1 คุณลักษณะความชัน กรณีที่ 1



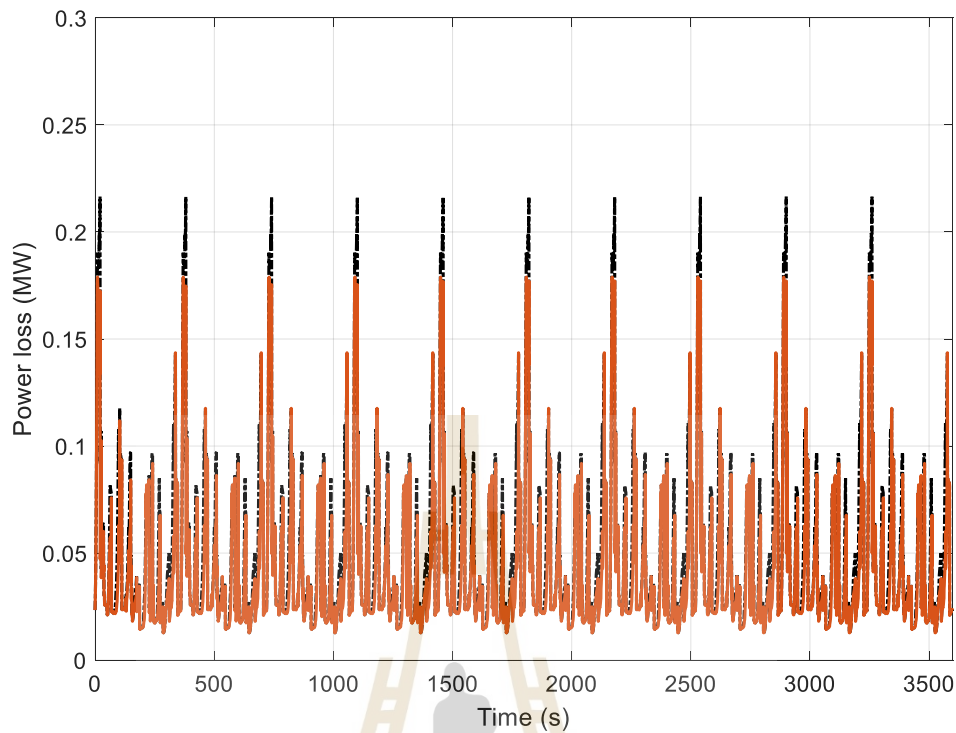
รูปที่ 6.2 กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุของการทดสอบกรณีที่ 1



รูปที่ 6.3 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกรณี 1



รูปที่ 6.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกกรณี 1



รูปที่ 6.5 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำของกรณีที่ 1

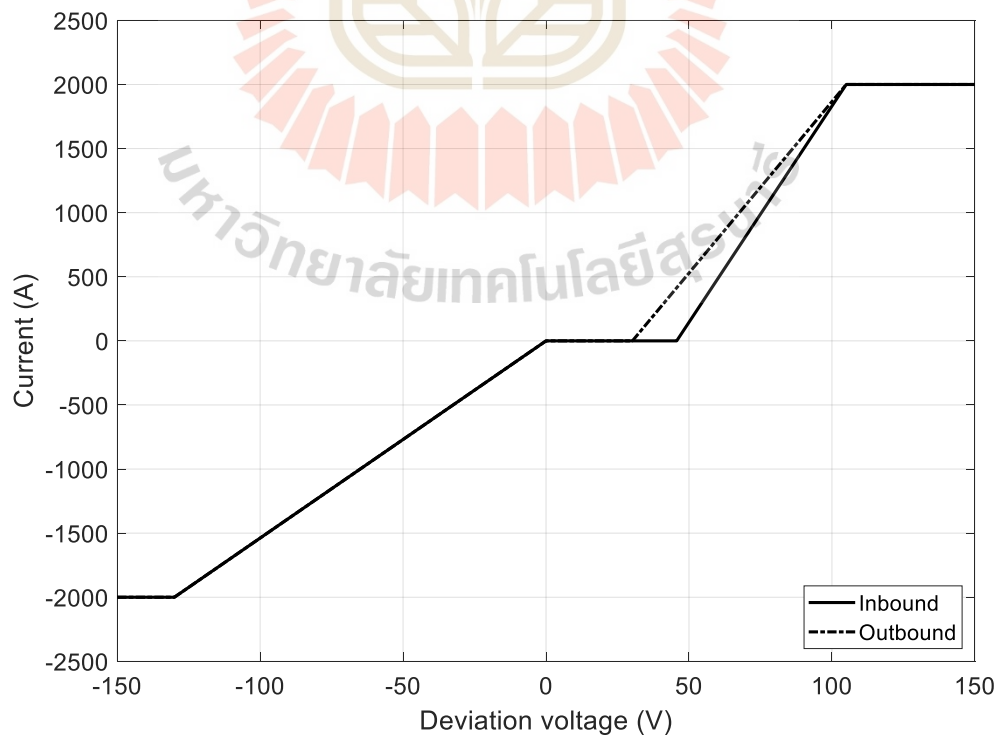
จากผลการทดสอบของกรณีที่ 1 ติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ และค่าเริ่มต้นสถานะประจุที่ 100% แสดงดังรูปที่ 6.2-6.5 การทดสอบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุแสดงดังรูปที่ 6.2 โดยแบ่งเป็นเส้นทางเข้าเมืองและเส้นทางออกเมือง การทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดขึ้นอยู่กับแรงดันของรถไฟฟ้าโดยเริ่มต้นตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีแรงดันที่สูงสุด 765 V จากตารางที่ 6.2 ทำให้ในช่วงเริ่มต้นการวิ่งมีการคายประจุเพื่อช่วยลดพลังงานในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าทำให้สามารถประหยัดพลังงานในการเคลื่อนที่ได้ 5.72% ในรูปที่ 6.3 แสดงให้เห็นระดับกำลังไฟฟ้าที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟาลดลงในกรณีที่ 1 รูปที่ 6.4 แสดงให้เห็นการลดลงของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกที่ถูกนำไปเก็บสะสมในตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำให้กำลังไฟฟ้าที่ถูกกำจัดทิ้งลดลง 42.25% ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีสถานะประจุที่สิ้นสุดการบริการที่ 100% รูปที่ 6.5 แสดงให้เห็นระดับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำที่ลดลง 9.40%

6.2.2 ผลการจำลองกรณีที่ 2 สถานะประจุเริ่มต้น 75%

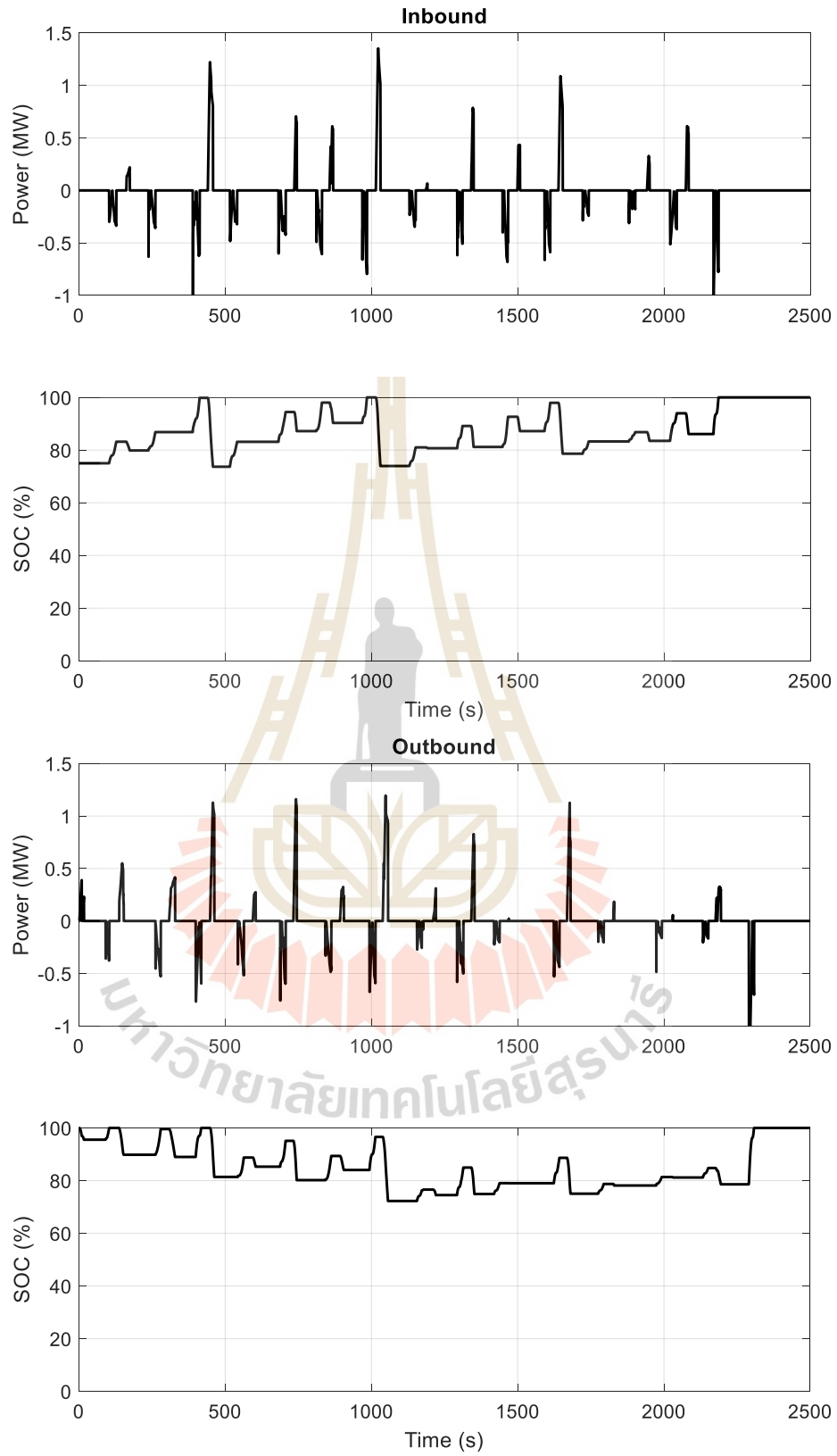
ผลการหาค่าเหมาะที่สุดของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำงานแสดงดังตารางที่ 6.3 และแผนภาพคุณลักษณะความชันของการทำงานแสดงดังรูปที่ 6.6 ผลการเปรียบเทียบกับกรณีฐาน แสดงดังรูปที่ 6.7 - 6.10

ตารางที่ 6.3 ผลการหาค่าเหมาะที่สุด กรณีที่ 2

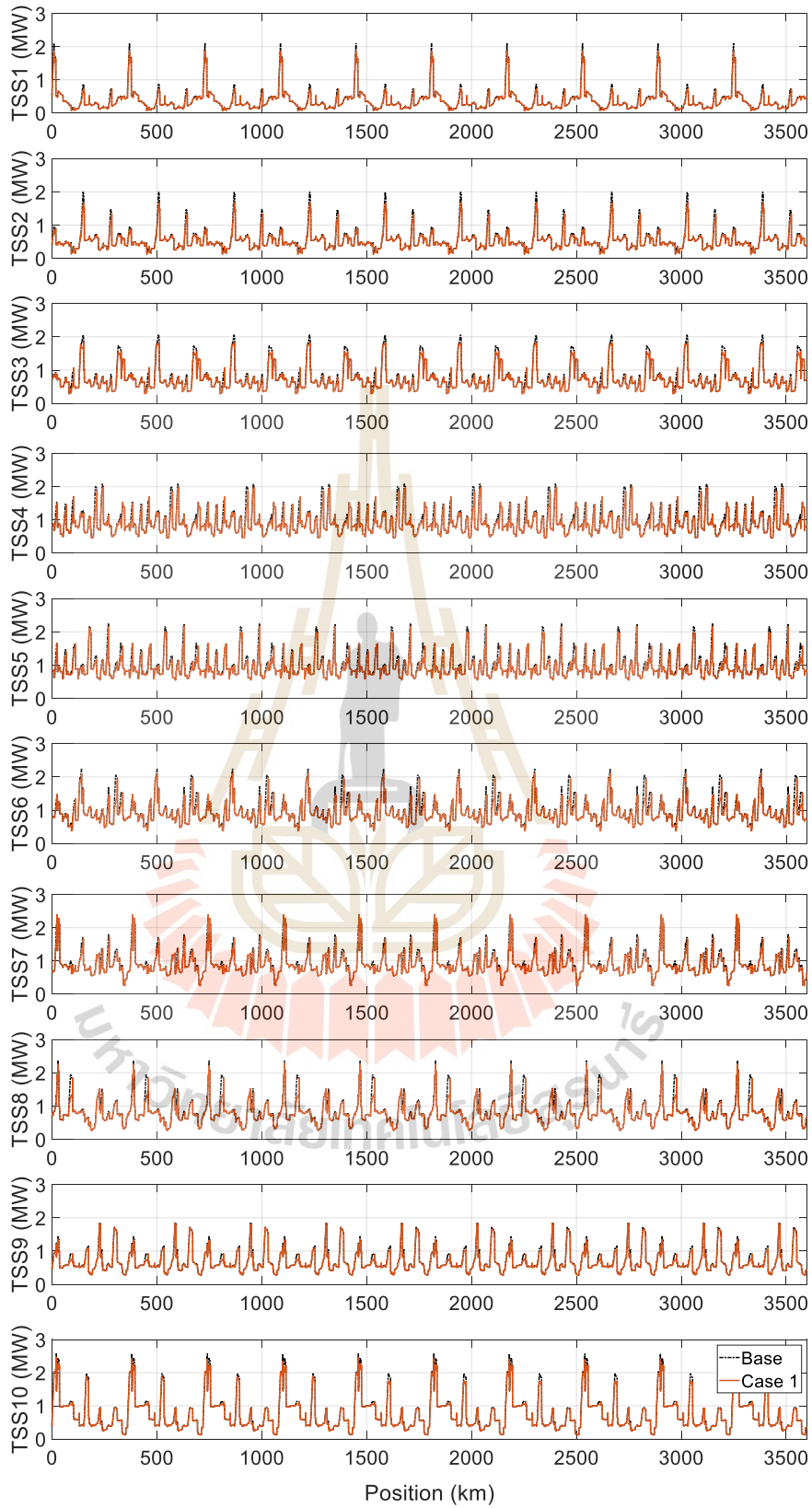
Non-optimization			
Energy substation (kWh)		7506.83	
Optimization (PSO)			
$\Delta V_{d,min}$ Inbound (V)	$\Delta V_{d,min}$ Outbound (V)	Best function (kWh)	Saving (%)
45.72	30.47	7109.93	5.29
Optimization (GA)			
$\Delta V_{d,min}$ Inbound (V)	$\Delta V_{d,min}$ Outbound (V)	Best function (kWh)	Saving (%)
45.70	30.22	7109.55	5.29



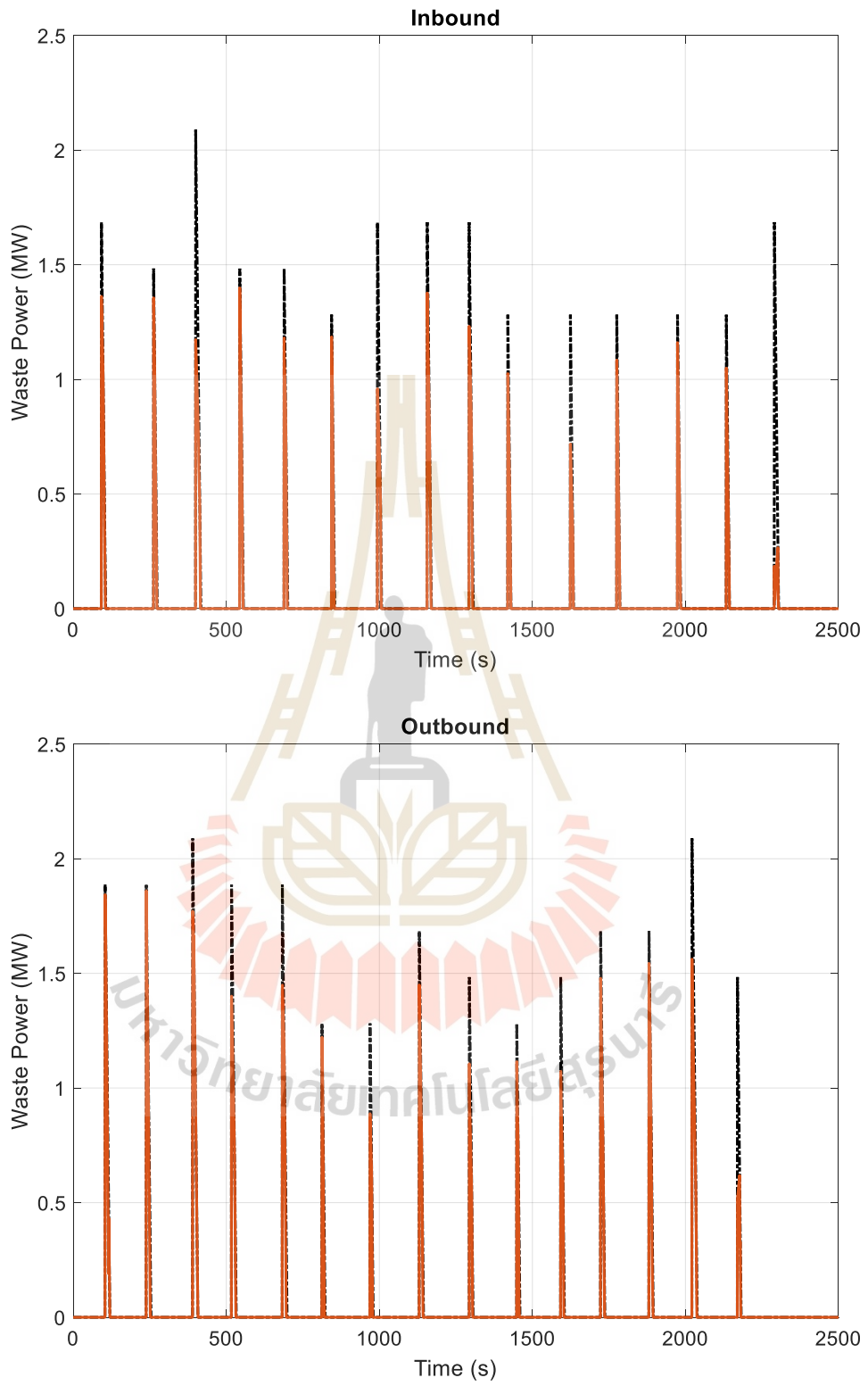
รูปที่ 6.6 คุณลักษณะความชัน กรณีที่ 2



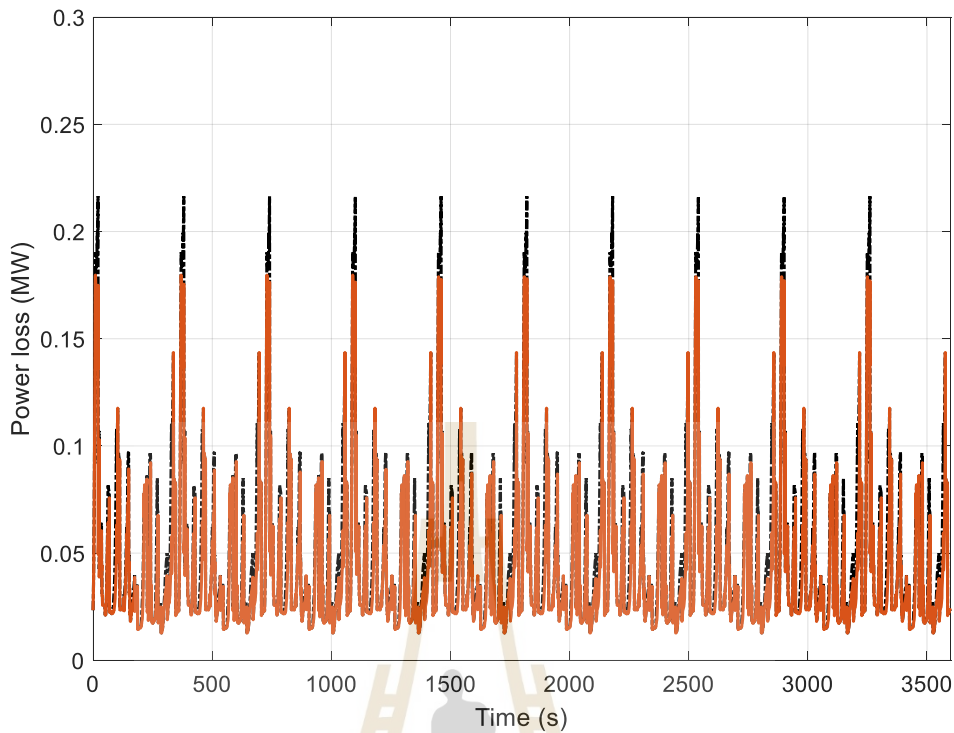
รูปที่ 6.7 กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุของการทดสอบกรณีนี้ที่ 2



รูปที่ 6.8 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกรณี 2



รูปที่ 6.9 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกรถที่ 2



รูปที่ 6.10 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำของกรณีที่ 2

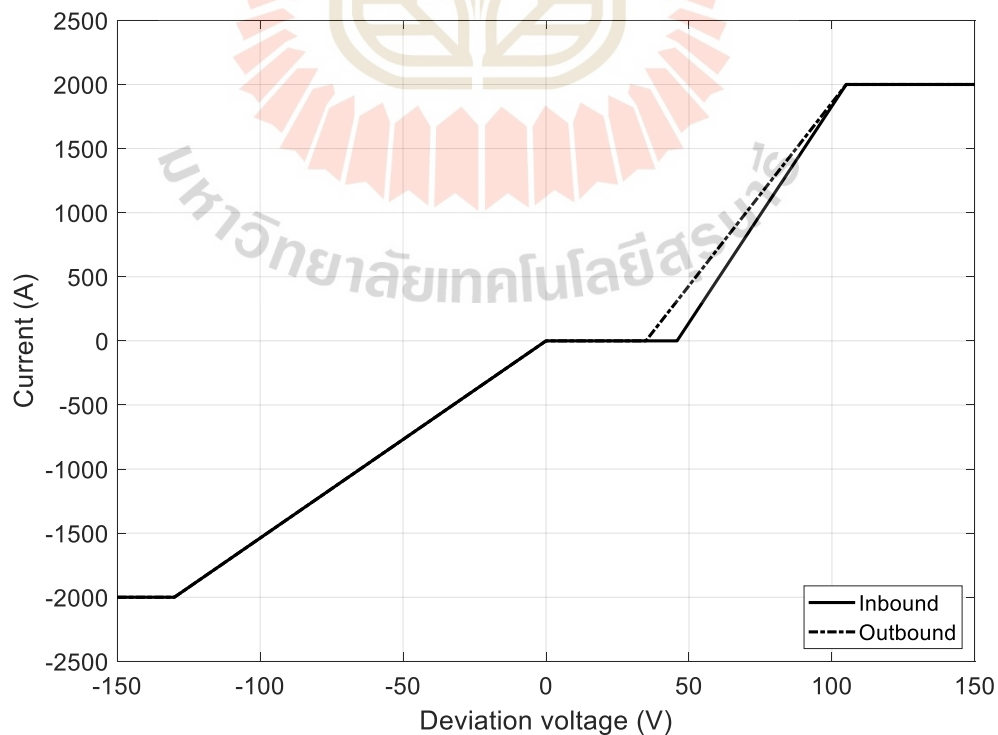
จากผลการทดสอบของกรณีที่ 2 ติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ และค่าเริ่มต้นสถานะประจุที่ 75% แสดงดังรูปที่ 6.6-6.10 การทดสอบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุแสดงดังรูปที่ 6.6 การทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดขึ้นอยู่กับแรงดันของรถไฟฟ้าโดยเริ่มต้นตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีแรงดันที่ 750 V จากตารางที่ 6.1 ทำให้ในช่วงเริ่มให้บริการตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังไม่มีมีการคายประจุเนื่องจากระดับแรงดันไฟฟ้าที่มียังไม่เพียงพอต่อการทำงานจึงทำการชาร์จประจุจากการเบรกในช่วงแรก จากนั้นจึงมีการคายประจุในช่วงสถานะประจุที่มากกว่า 85% ทำให้สามารถประหยัดพลังงานในการเคลื่อนที่ได้ 5.29% ในรูปที่ 6.8 แสดงให้เห็นระดับกำลังไฟฟ้าที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าลดลงในกรณีที่ 2 รูปที่ 6.9 แสดงให้เห็นการลดลงของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกที่ถูกนำไปเก็บสะสมในตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำให้กำลังไฟฟ้าที่ถูกกำจัดทิ้งลดลง 43.37% ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีสถานะประจุที่สิ้นสุดการบริการที่ 100% รูปที่ 6.10 แสดงให้เห็นระดับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำที่ลดลง 9.04%

6.2.3 ผลการจำลองกรณีที่ 3 สถานะประจุเริ่มต้น 50%

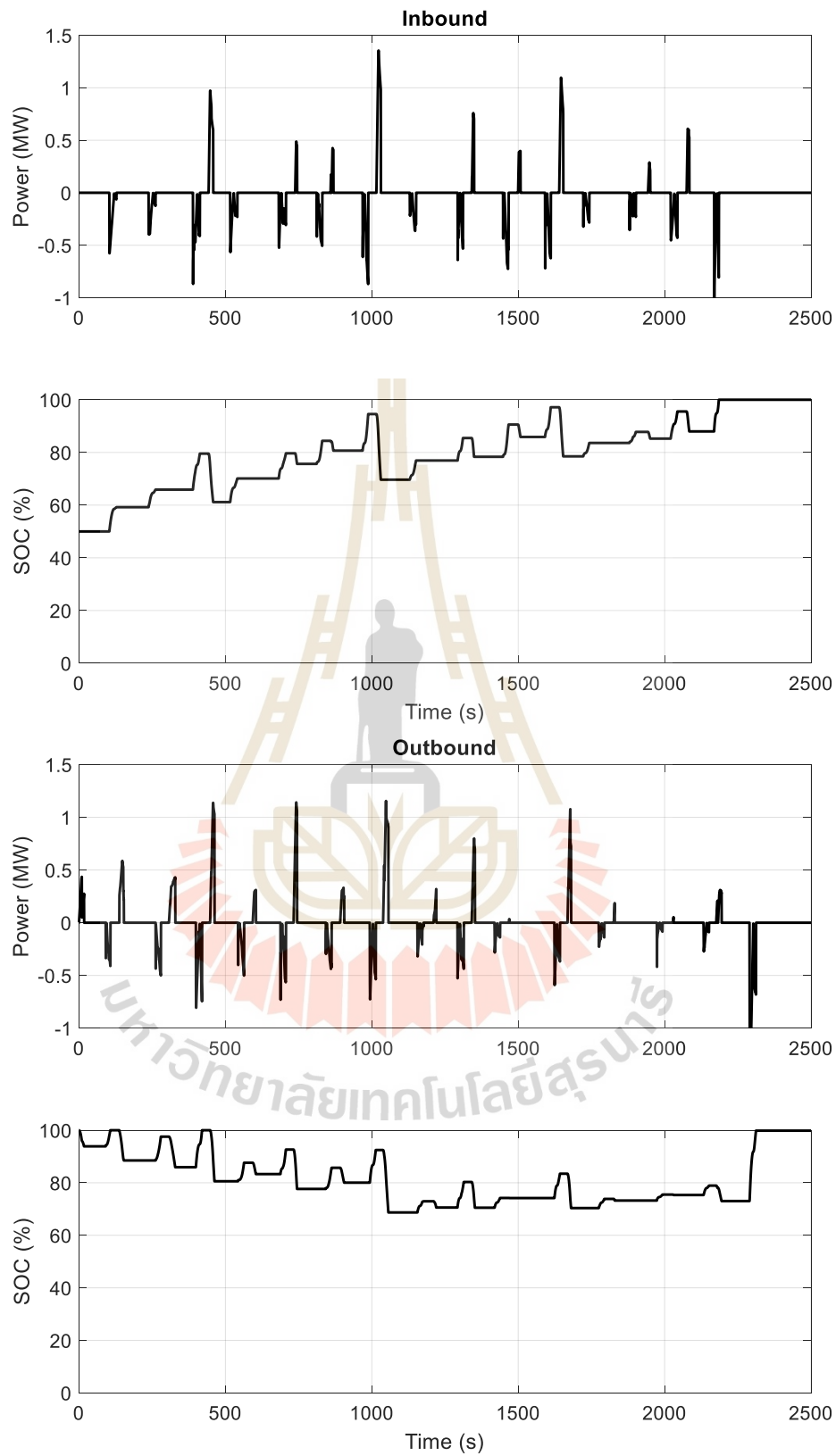
ผลการหาค่าเหมาะที่สุดของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำงานแสดงดังตารางที่ 6.4 และแผนภาพคุณลักษณะความชันของการทำงานแสดงดังรูปที่ 6.11 ผลการเปรียบเทียบกับกรณีฐาน แสดงดังรูปที่ 6.12 - 6.15

ตารางที่ 6.4 ผลการหาค่าเหมาะที่สุด กรณีที่ 3

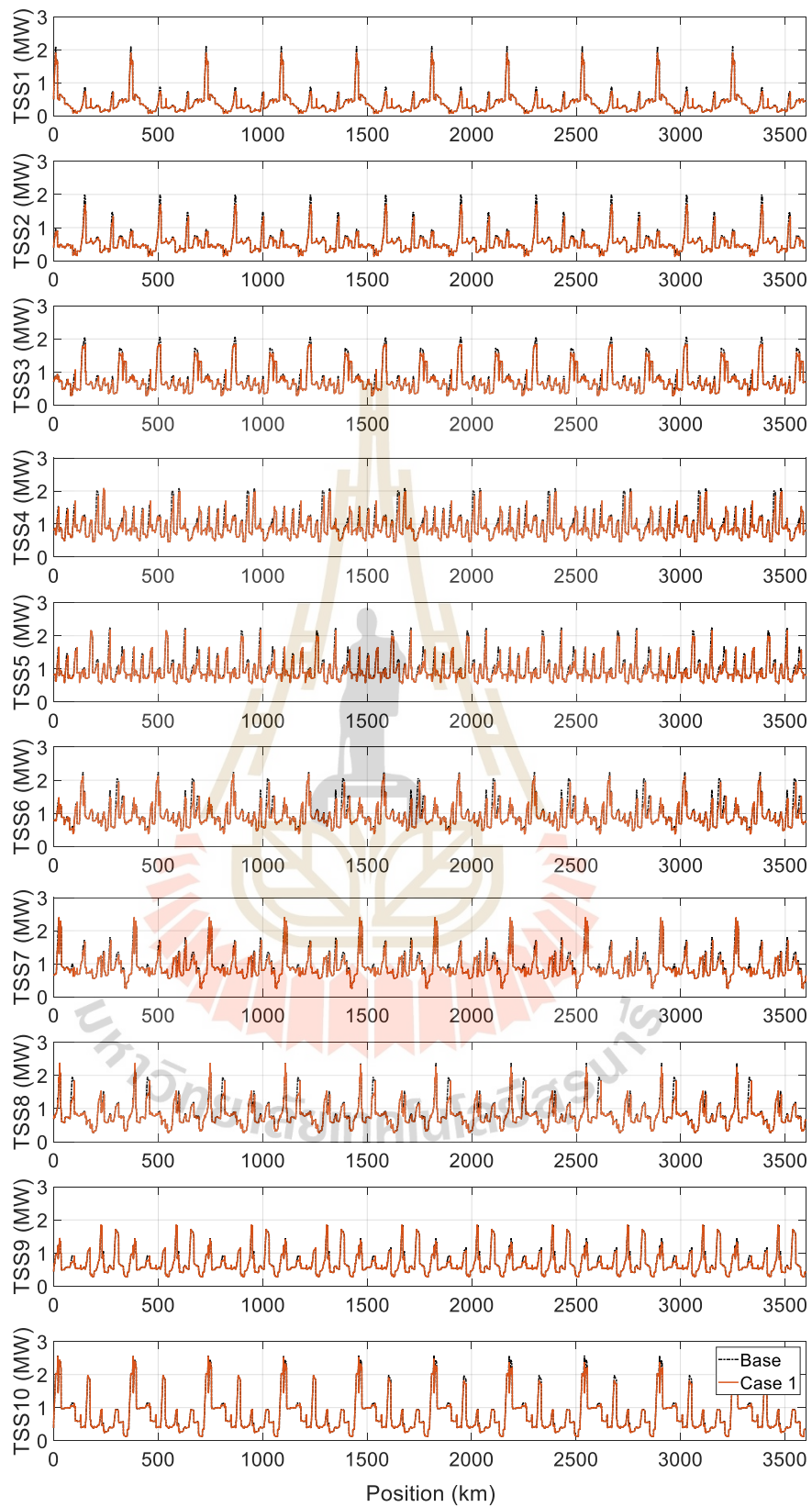
Non-optimization			
Energy substation (kWh)		7506.83	
Optimization (PSO)			
$\Delta V_{d,min}$ Inbound (V)	$\Delta V_{d,min}$ Outbound (V)	Best function (kWh)	Saving (%)
45.91	34.77	7154.19	4.70
Optimization (GA)			
$\Delta V_{d,min}$ Inbound (V)	$\Delta V_{d,min}$ Outbound (V)	Best function (kWh)	Saving (%)
45.72	34.27	7152.23	4.72



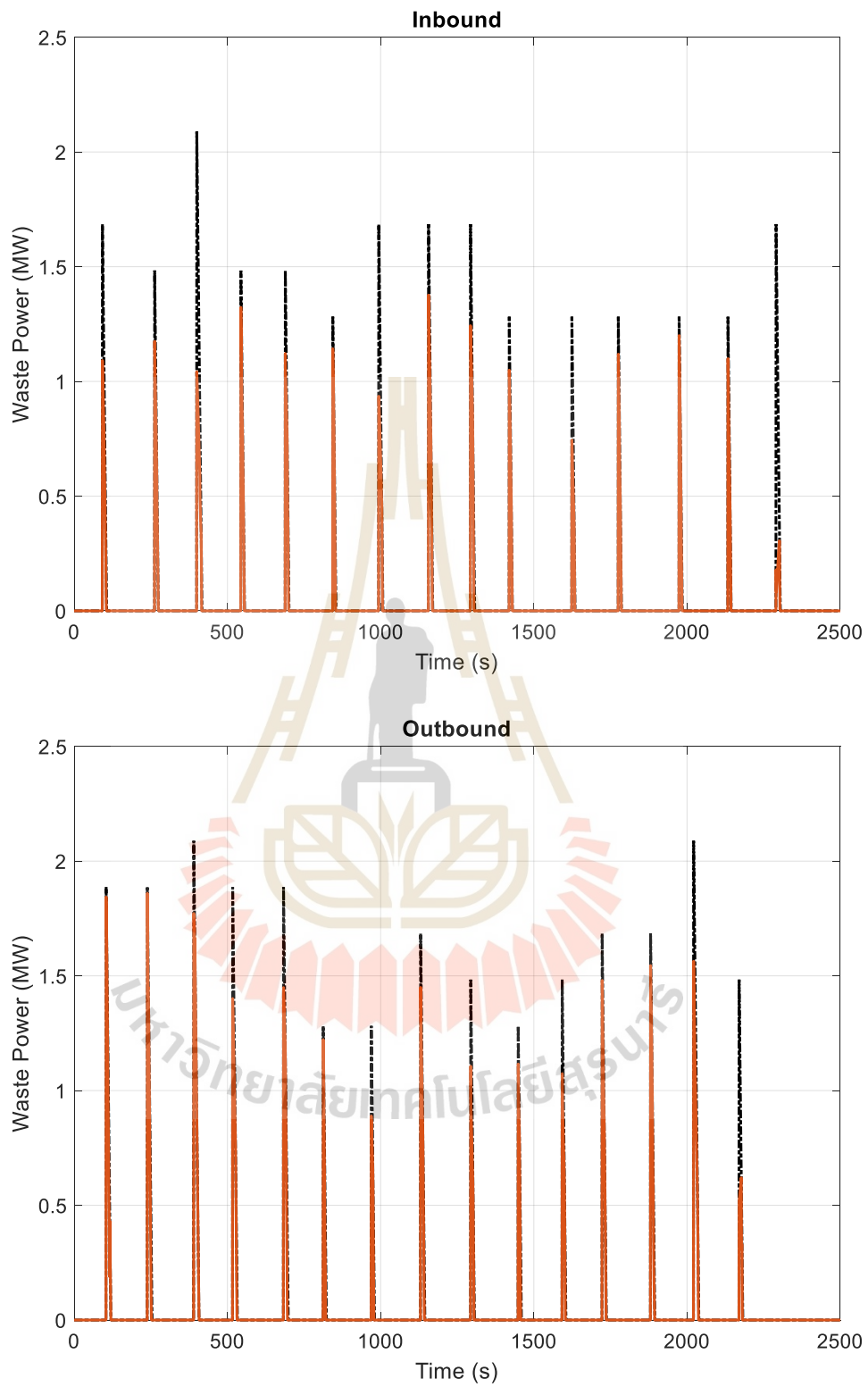
รูปที่ 6.11 คุณลักษณะความชัน กรณีที่ 3



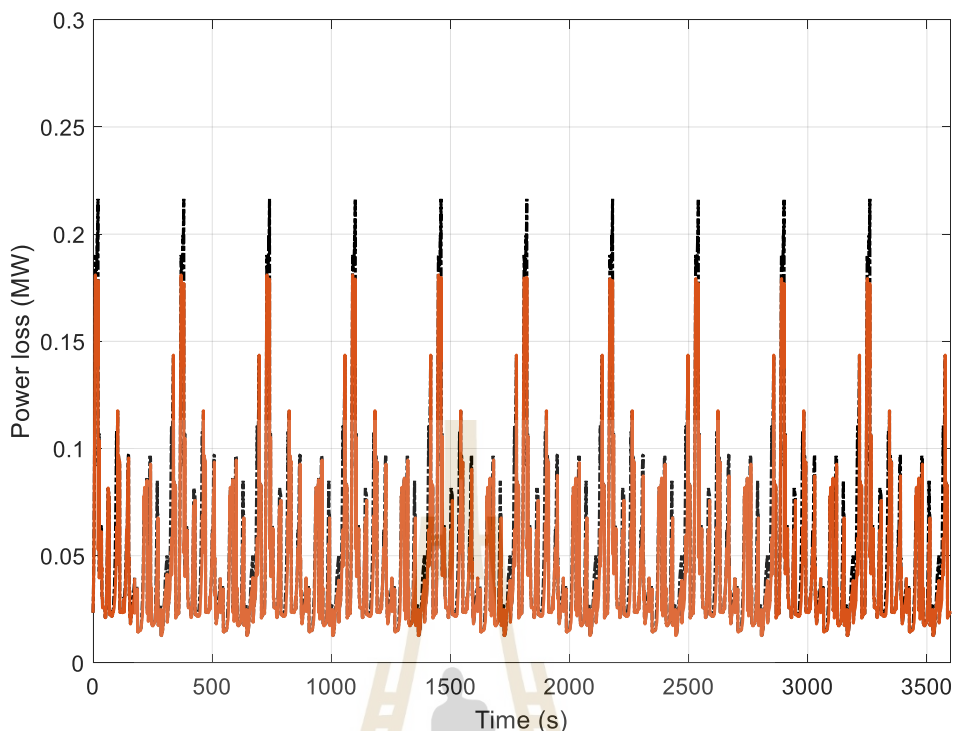
รูปที่ 6.12 กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุของการทดสอบกรณีที่ 3



รูปที่ 6.13 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกรณี 3



รูปที่ 6.14 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกกรณีนี้ที่ 3



รูปที่ 6.15 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำกรณี 3

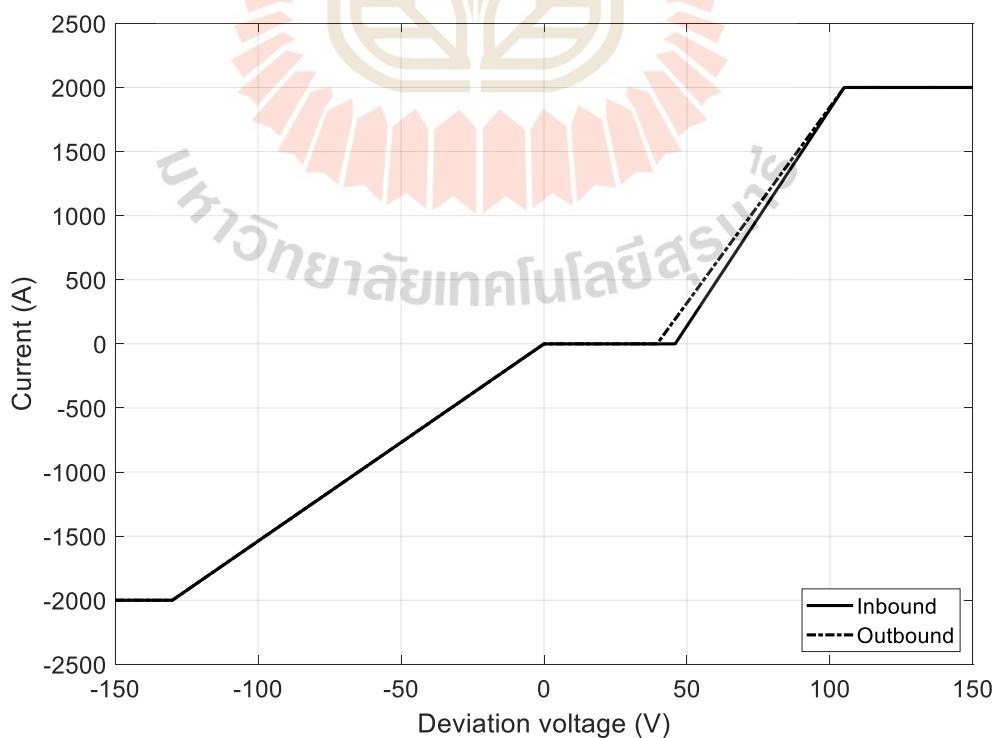
จากผลการทดสอบของกรณี 3 ติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ และค่าเริ่มต้นสถานะประจุที่ 50% แสดงดังรูปที่ 6.12-6.15 การทดสอบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุแสดงดังรูปที่ 6.12 การทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดขึ้นอยู่กับแรงดันของรถไฟฟ้าโดยเริ่มต้นตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีแรงดันที่ 735 V จากตารางที่ 6.1 ทำให้ในช่วงเริ่มให้บริการตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังไม่มีอาการคายประจุลักษณะการทำงานคล้ายกับกรณี 2 เนื่องจากเงื่อนไขที่สิ้นสุดการทำงานสถานะประจุต้องอยู่ที่ 100% จึงทำให้ในช่วงท้ายของการให้บริการจึงไม่มีอาการประจุทำให้การประหยัดพลังงานในการเคลื่อนที่ได้ 4.72% ในรูปที่ 6.13 แสดงให้เห็นระดับกำลังไฟฟ้าที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟาลดลงในกรณี 3 รูปที่ 6.14 แสดงให้เห็นการลดลงของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกที่ถูกนำไปเก็บสะสมในตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำให้กำลังไฟฟ้าที่ถูกกำจัดทิ้งลดลง 43.46% ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีสถานะประจุที่สิ้นสุดการบริการที่ 100% รูปที่ 6.15 แสดงให้เห็นระดับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำที่ลดลง 8.43%

6.2.4 ผลการจำลองกรณีที่ 4 สถานะประจุเริ่มต้น 25%

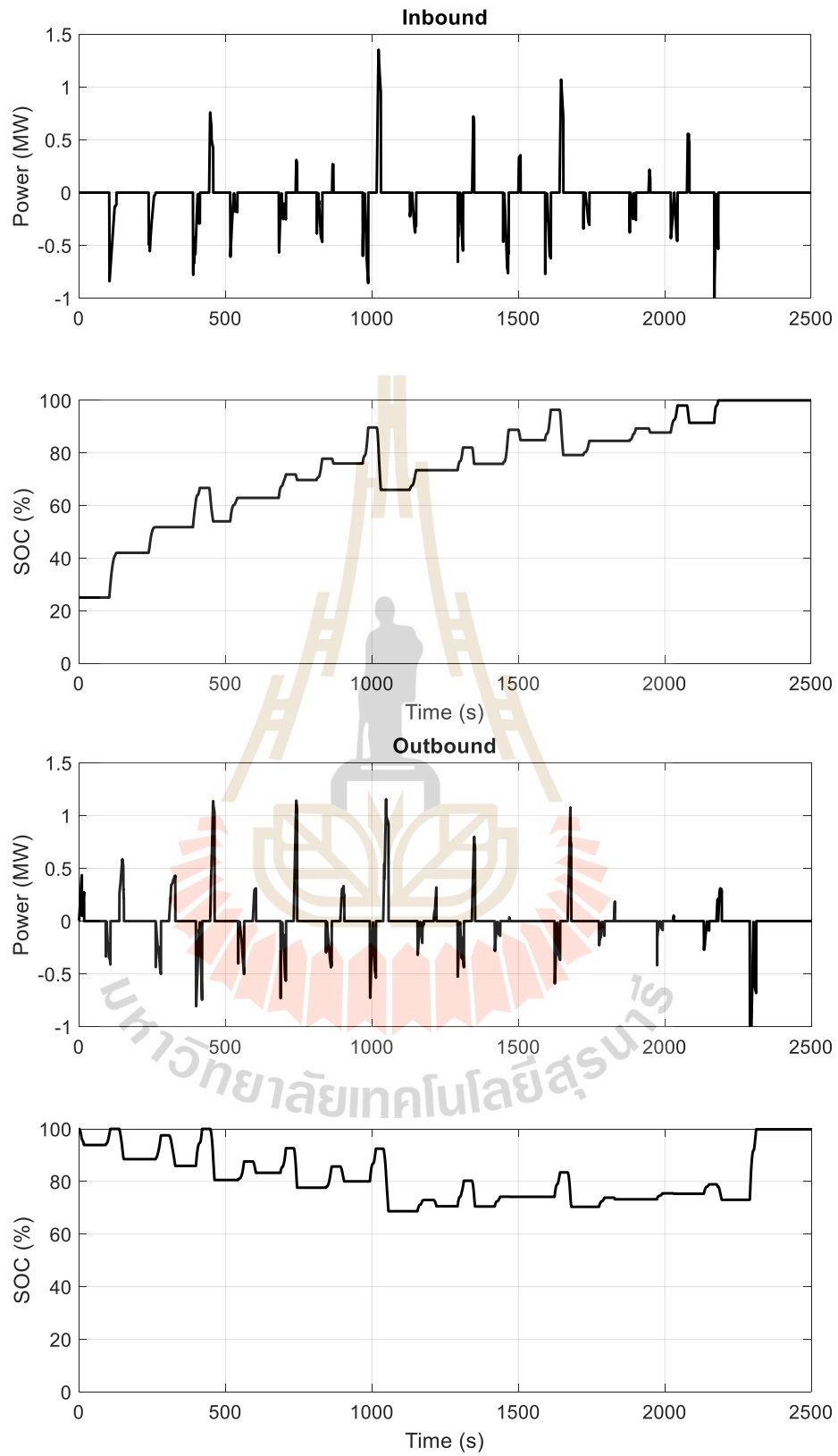
ผลการหาค่าเหมาะที่สุดของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำงานแสดงดังตารางที่ 6.5 และแผนภาพคุณลักษณะความชันของการทำงานแสดงดังรูปที่ 6.16 ผลการเปรียบเทียบกับกรณีฐาน แสดงดังรูปที่ 6.17 - 6.20

ตารางที่ 6.5 ผลการหาค่าเหมาะที่สุด กรณีที่ 4

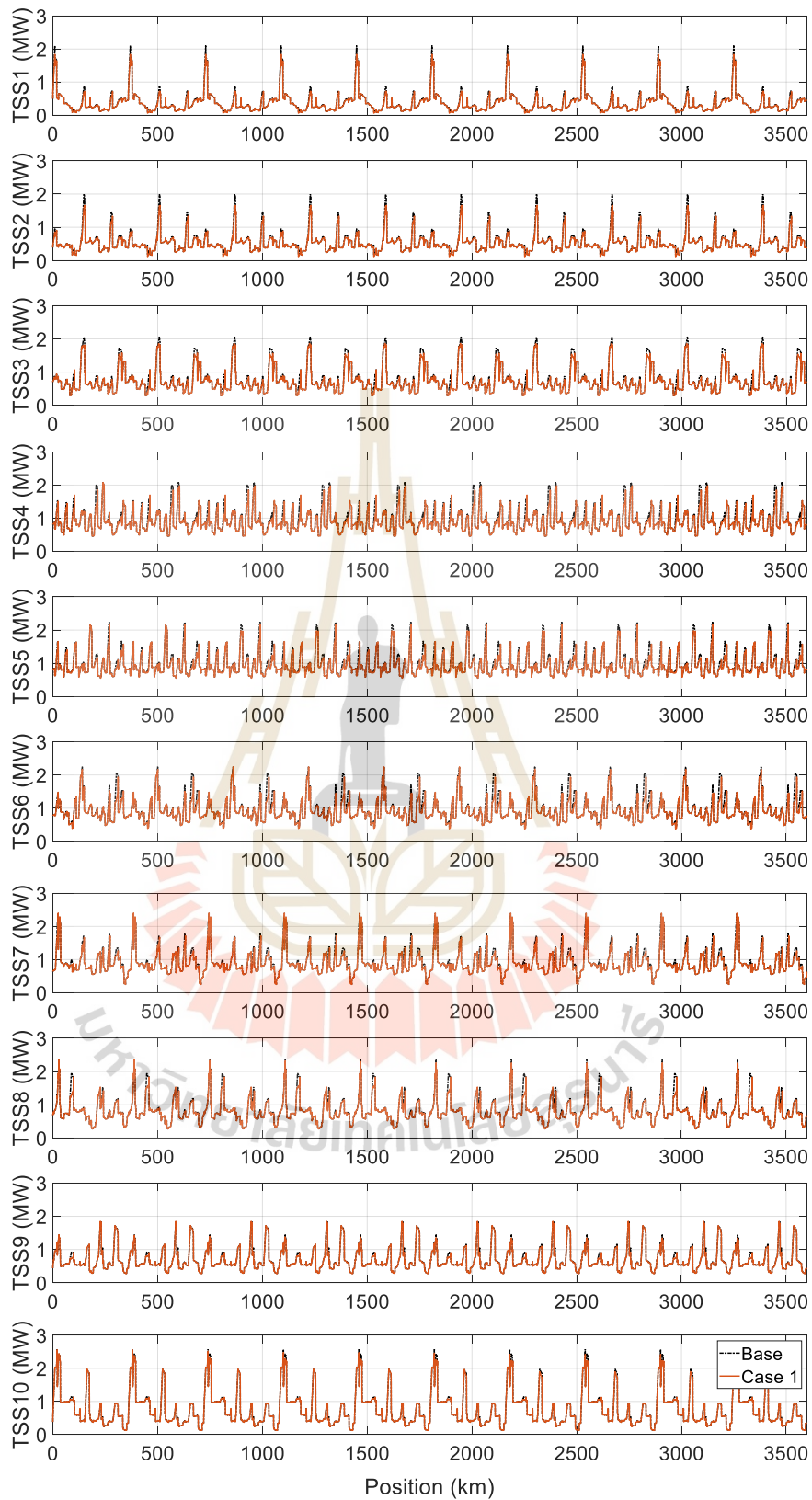
Non-optimization			
Energy substation (kWh)		7506.83	
Optimization (PSO)			
$\Delta V_{d,min}$ Inbound (V)	$\Delta V_{d,min}$ Outbound (V)	Best function (kWh)	Saving (%)
45.91	39.06	7183.29	4.31
Optimization (GA)			
$\Delta V_{d,min}$ Inbound (V)	$\Delta V_{d,min}$ Outbound (V)	Best function (kWh)	Saving (%)
45.76	39.11	7182.80	4.32



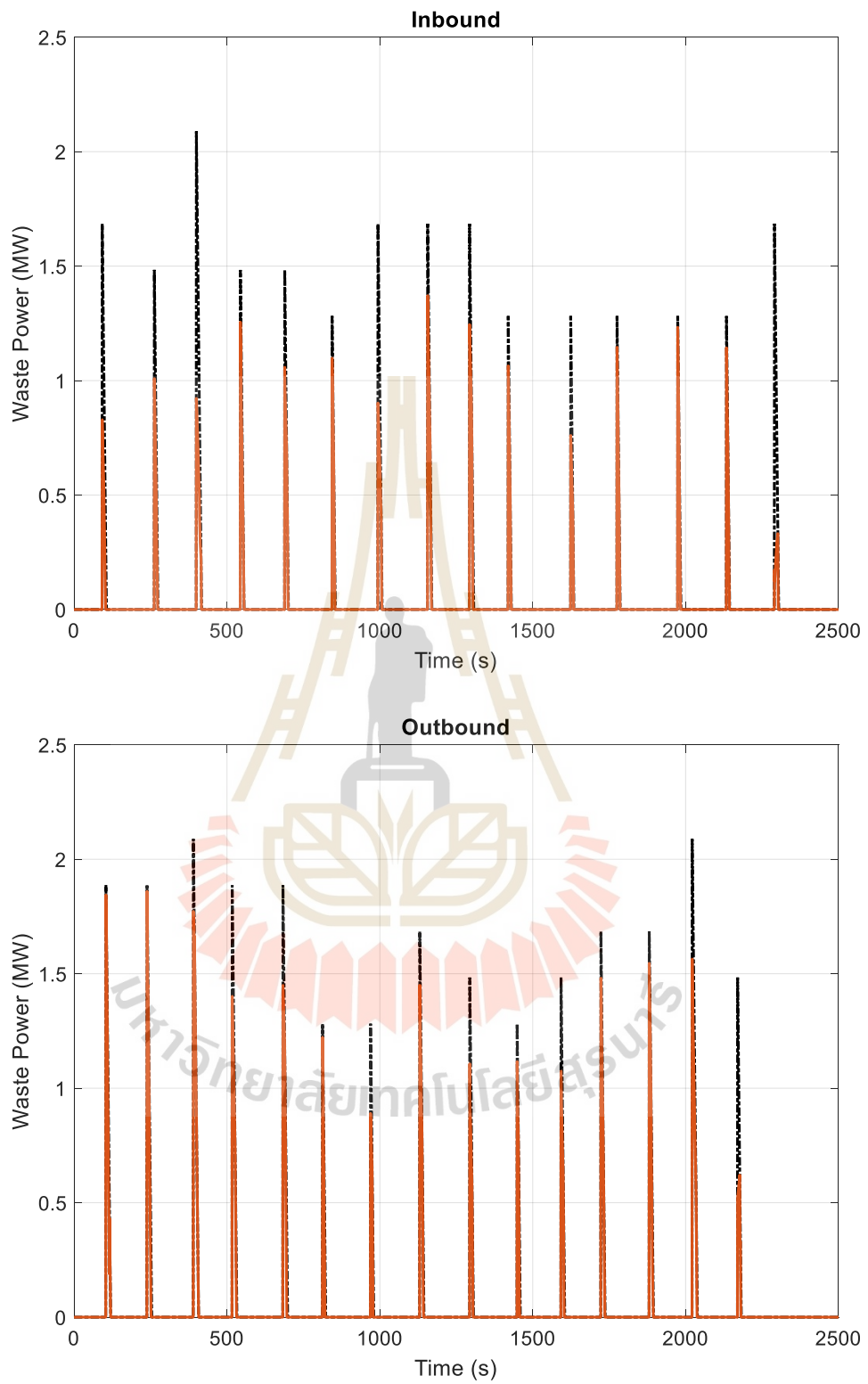
รูปที่ 6.16 คุณลักษณะความชัน กรณีที่ 4



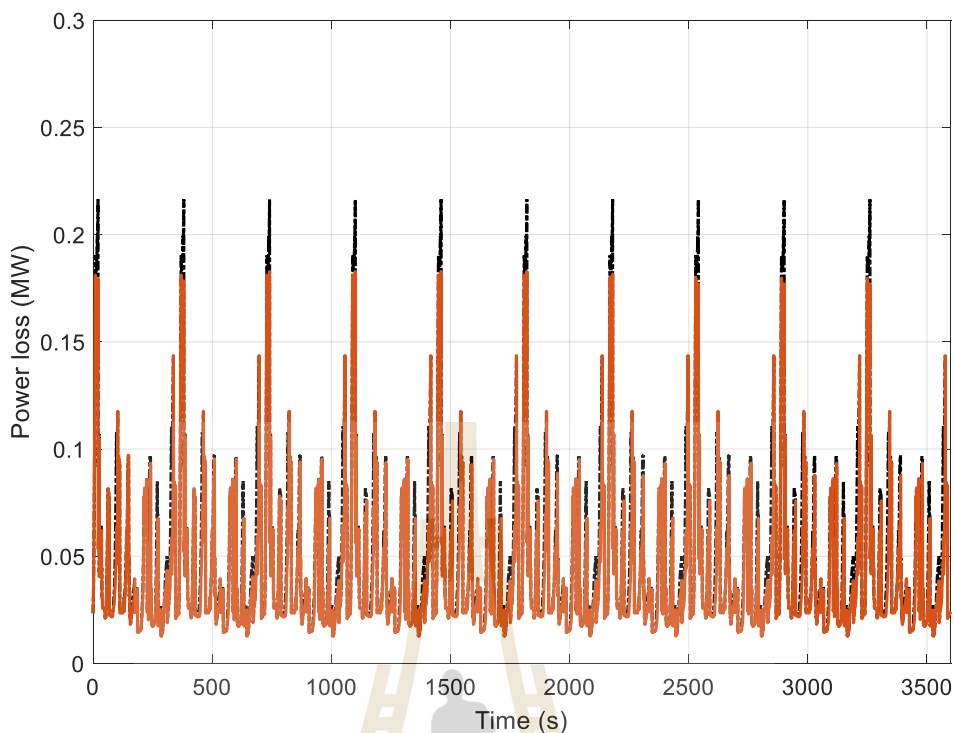
รูปที่ 6.17 กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุของการทดสอบกรณีที่ 4



รูปที่ 6.18 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกรณีที 4



รูปที่ 6.19 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกกรณีนี้ที่ 4



รูปที่ 6.20 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำกรณีที่ 4

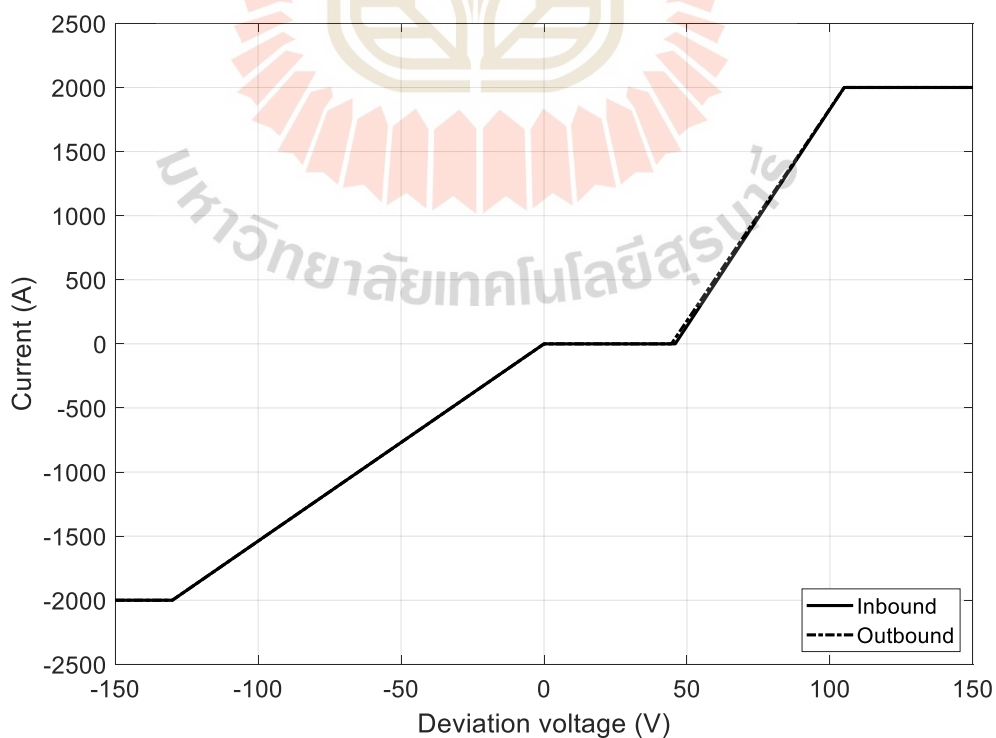
จากผลการทดสอบของกรณีที่ 4 ติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ และค่าเริ่มต้นสถานะประจุที่ 25% แสดงดังรูปที่ 6.17-6.20 การทดสอบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุแสดงดังรูปที่ 6.17 การทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดขึ้นอยู่กับแรงดันของรถไฟฟ้าโดยเริ่มต้นตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีแรงดันที่ 720 V จากตารางที่ 6.1 ลักษณะการทำงานคล้ายกับกรณีที่ 3 เพียงแต่มีส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าที่มากกว่าจึงทำให้การประหยัดพลังงานอยู่ที่ 4.32% ในรูปที่ 6.18 แสดงให้เห็นระดับกำลังไฟฟ้าที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าลดลงในกรณีที่ 3 รูปที่ 6.19 แสดงให้เห็นการลดลงของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกที่ถูกนำไปเก็บสะสมในตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำให้กำลังไฟฟ้าที่ถูกกำจัดทิ้งลดลง 44.82% ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีสถานะประจุที่สิ้นสุดการบริการที่ 100% รูปที่ 6.20 แสดงให้เห็นระดับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำที่ลดลง 7.94%

6.2.5 ผลการจำลองกรณีที่ 5 สถานะประจุเริ่มต้น 0%

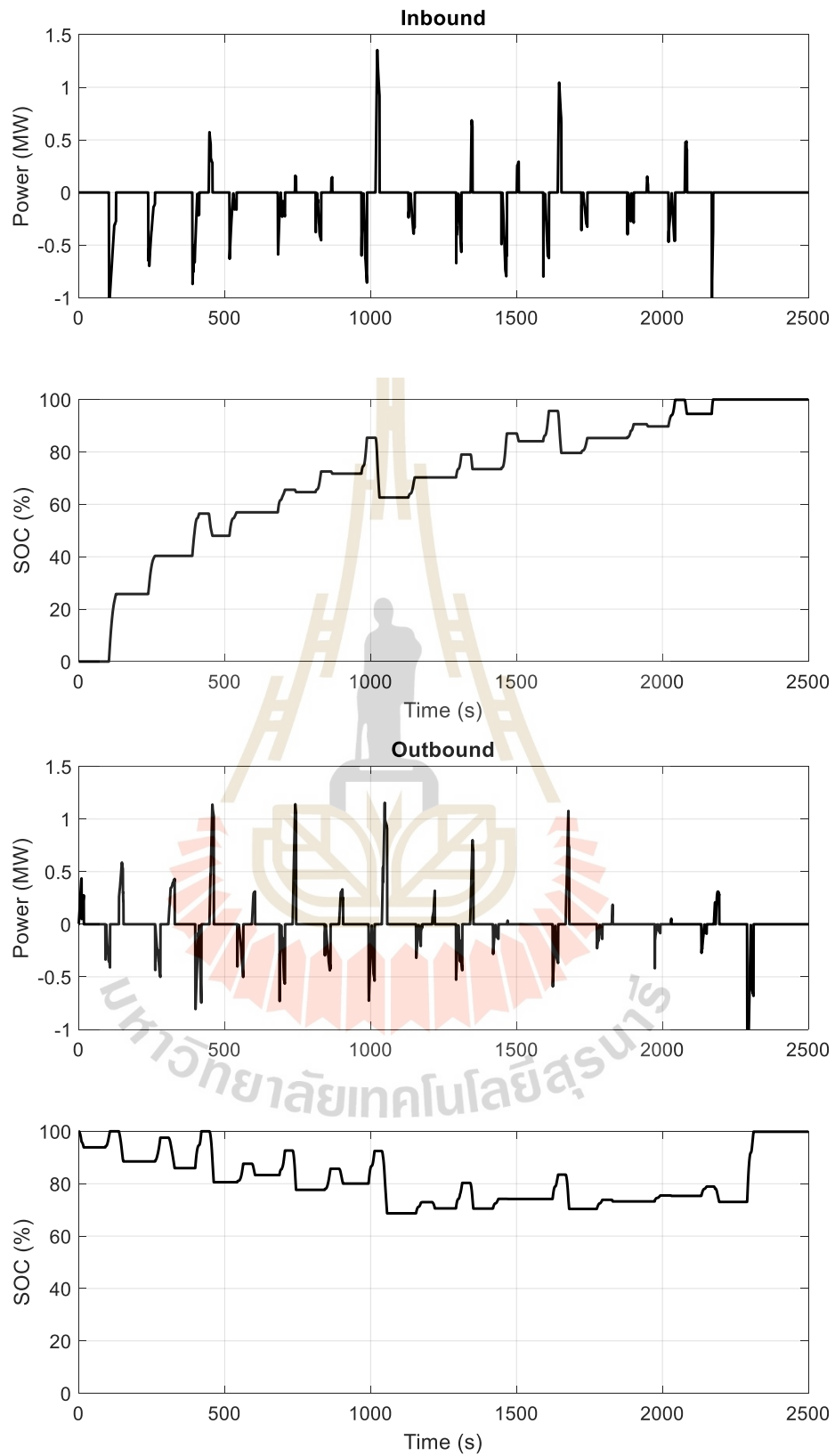
ผลการหาค่าเหมาะที่สุดของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำงานแสดงดังตารางที่ 6.6 และแผนภาพคุณลักษณะความชันของการทำงานแสดงดังรูปที่ 6.21 ผลการเปรียบเทียบกับกรณีฐาน แสดงดังรูปที่ 6.22 - 6.25

ตารางที่ 6.6 ผลการหาค่าเหมาะที่สุด กรณีที่ 5

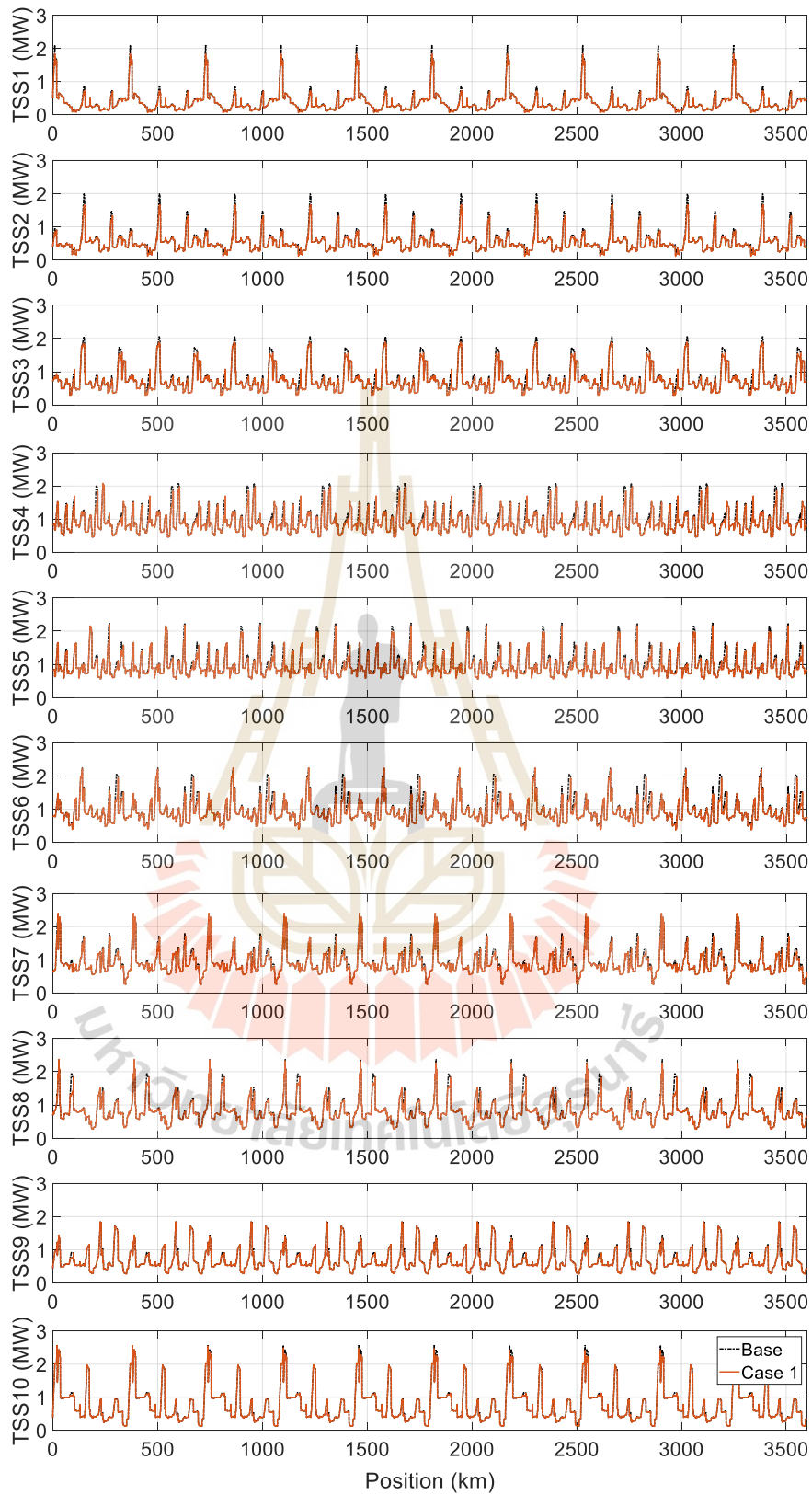
Non-optimization			
Energy substation (kWh)		7506.83	
Optimization (PSO)			
$\Delta V_{d,min}$ Inbound (V)	$\Delta V_{d,min}$ Outbound (V)	Best function (kWh)	Saving (%)
45.79	44.25	7209.26	3.96
Optimization (GA)			
$\Delta V_{d,min}$ Inbound (V)	$\Delta V_{d,min}$ Outbound (V)	Best function (kWh)	Saving (%)
45.84	44.00	7208.75	3.97



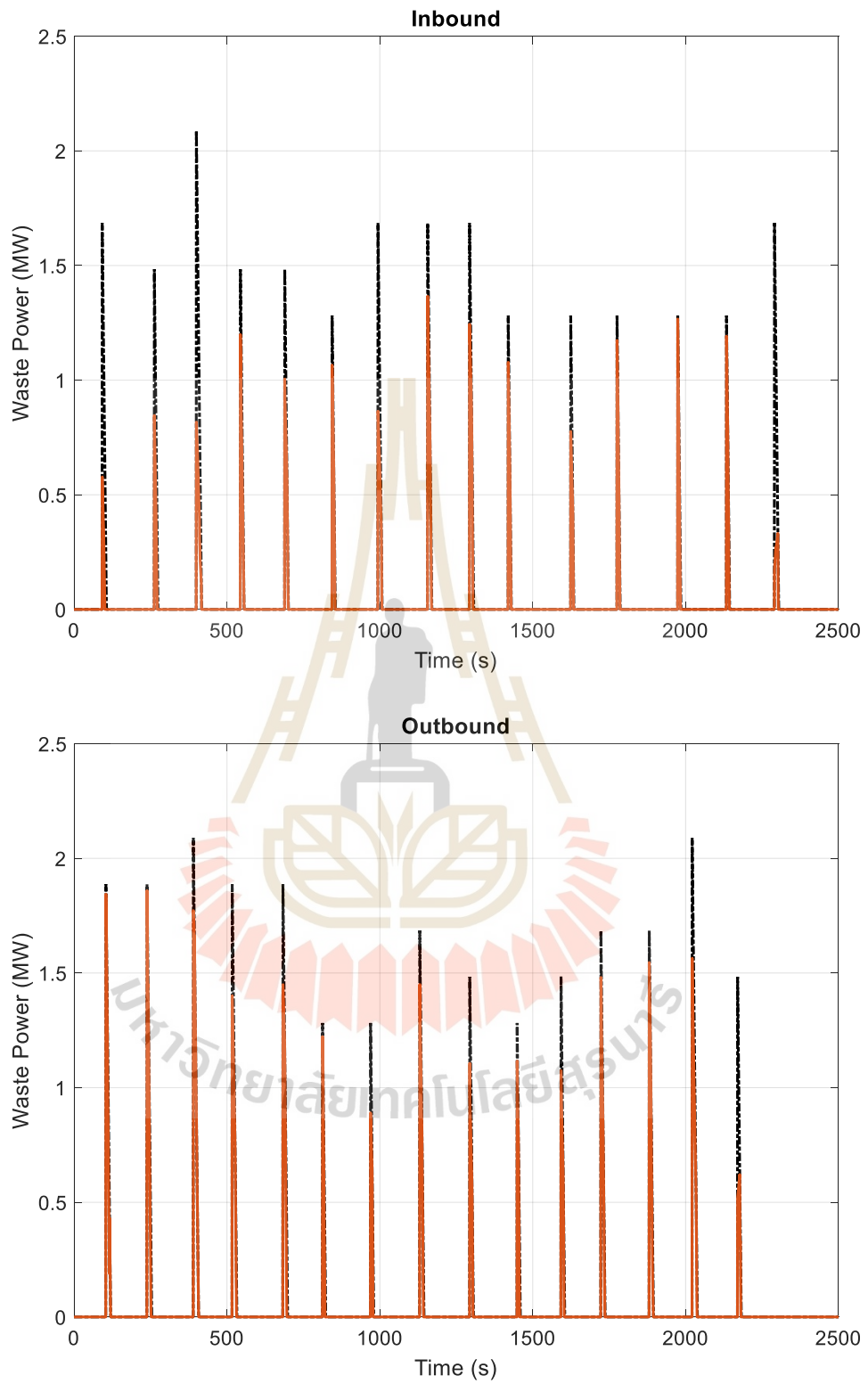
รูปที่ 6.21 คุณลักษณะความชัน กรณีที่ 5



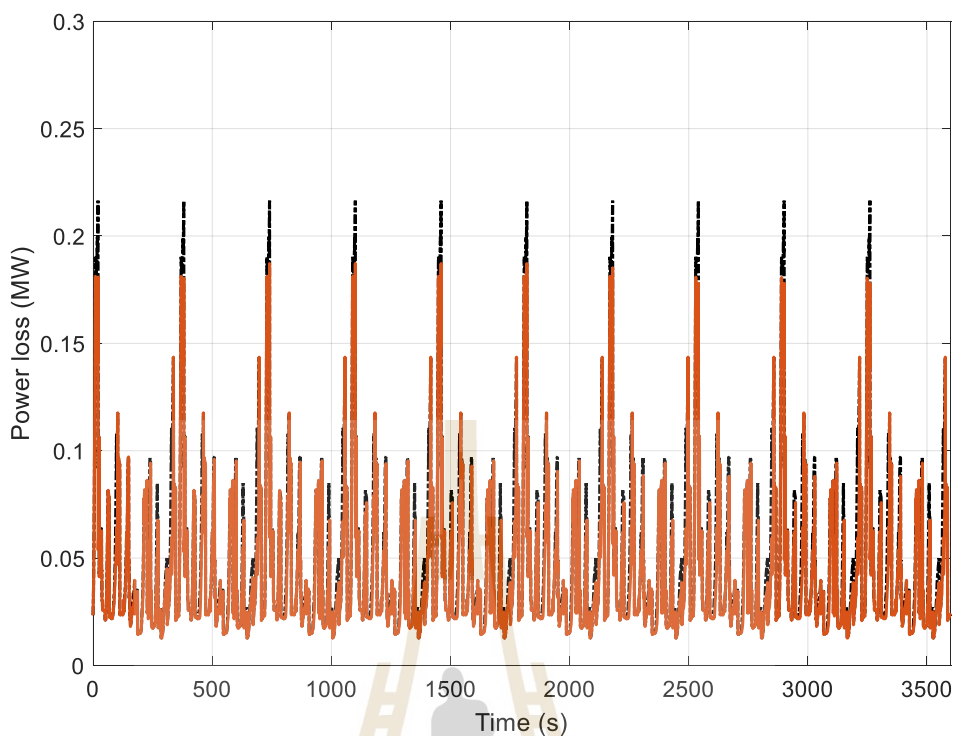
รูปที่ 6.22 กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุของการทดสอบกรณีที่ 5



รูปที่ 6.23 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกรณีที 5



รูปที่ 6.24 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกกรณีนี้ที่ 5



รูปที่ 6.25 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำกรณีที่ 5

จากผลการทดสอบของกรณีที่ 5 ติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ และค่าเริ่มต้นสถานะประจุที่ 25% แสดงดังรูปที่ 6.22-6.25 การทดสอบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และสถานะประจุแสดงดังรูปที่ 6.22 การทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดขึ้นอยู่กับแรงดันของรถไฟฟ้าโดยเริ่มต้นตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีแรงดันที่ 705 V จากตารางที่ 6.1 ทำให้ในช่วงเริ่มต้นไปถึงช่วงกลางมีการทำงานเพียงแค่การชาร์จประจุโดยมีการคายประจุเมื่อสถานะประจุมากกว่า 50% ทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้ 3.97% ในรูปที่ 6.23 แสดงให้เห็นระดับกำลังไฟฟ้าที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟาลดลงในกรณีที่ 5 รูปที่ 6.24 แสดงให้เห็นการลดลงของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกที่ถูกนำไปเก็บสะสมในตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำให้กำลังไฟฟ้าที่ถูกกำจัดทิ้งลดลง 46.60% ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีสถานะประจุที่สิ้นสุดการบริการที่ 100% รูปที่ 6.25 แสดงให้เห็นระดับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำที่ลดลง 7.44%

6.3 การประเมินเปรียบเทียบ

การทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าบนขบวนรถ ซึ่งได้รับผลกระทบจากหลายสาเหตุรวมถึง ตำแหน่งของรถไฟไฟฟ้า ความเร็วในการเคลื่อนที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าส่งผลต่อเนื่องถึงระดับแรงดันไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้าเมื่อมีการใช้กำลังไฟฟ้าในการเร่งความเร็วมากทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกมาก หรือรถไฟไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ ในระบบส่งผลกระทบต่อระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยเช่นเดียวกัน เนื่องจากในระบบรถไฟไฟฟ้าหลายขบวนมีการวิ่งอย่างสม่ำเสมอจึงทำการจำลองในช่วงเวลาเร่งด่วนเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบทุกกรณีแสดงดังตารางที่ 6.7 เห็นว่ากรณีที่ 1 เริ่มต้นการให้บริการที่ระดับแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ 765 V หรือสถานะประจุที่ 100% มีการประหยัดพลังงานสูงสุดที่ 5.72% ลองลงมาตามกรณีที่ 2 กรณีที่ 3 กรณีที่ 4 และกรณีที่ 5 ที่สามารถประหยัดได้ 5.29%, 4.72%, 4.32% และ 3.97% ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งตัวนำสอดคล้องกับการลดลงของพลังงานในการเคลื่อนที่เนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้าในสายส่งลดลงทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงเช่นกัน ในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกที่ไม่ถูกเก็บสะสมในตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะถูกกำจัดทิ้งในตัวต้านทานรูปแบบความร้อนซึ่งในกรณีที่ 5 มีการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกได้สูงสุดถึง 46.60%

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าระบบรถไฟไฟฟ้าหลายขบวน

Energy (kWh)	Base	1	2	3	4	5
Train	7418.28	7418.28	7418.28	7418.28	7418.28	7418.28
Substation	7506.83	7078.43 [5.71%]	7109.55 [5.29%]	7154.18 [4.70%]	7184.47 [4.29%]	7210.55 [3.95%]
Transmission Loss	88.55	80.23 [9.40%]	80.55 [9.04%]	81.11 [8.41%]	81.55 [7.91%]	81.99 [7.41%]
Waste	923.68	533.65 [42.23%]	523.11 [43.37%]	523.37 [43.34%]	510.50 [44.73%]	493.32 [46.59%]
Discharge	-	420.09	389.39	345.20	315.36	289.72
Charge	-	390.02	400.64	400.31	413.18	430.37

ตารางที่ 6.8 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า

กรณี	TSS1 (MW)	TSS2 (MW)	TSS3 (MW)	TSS4 (MW)	TSS5 (MW)	TSS6 (MW)	TSS7 (MW)	TSS8 (MW)	TSS9 (MW)	TSS10 (MW)
ฐาน	2.10	1.99	2.05	2.08	2.24	2.24	2.40	2.37	1.85	2.57
1	1.84	1.65	1.81	1.98	2.16	2.10	2.40	2.26	1.84	2.42
2	1.84	1.65	1.82	1.98	2.17	2.10	2.40	2.27	1.84	2.44
3	1.84	1.65	1.82	2.04	2.17	2.18	2.40	2.37	1.84	2.55
4	1.84	1.66	1.86	2.07	2.18	2.24	2.40	2.37	1.85	2.56
5	1.84	1.66	1.89	2.08	2.19	2.24	2.40	2.37	1.85	2.56

ตารางที่ 6.9 แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า

กรณี	TSS1 (V)	TSS2 (V)	TSS3 (V)	TSS4 (V)	TSS5 (V)	TSS6 (V)	TSS7 (V)	TSS8 (V)	TSS9 (V)	TSS10 (V)
ฐาน	716.98	718.79	717.78	717.30	714.75	714.67	712.02	712.56	721.16	709.17
1	721.22	724.20	721.69	719.05	716.02	717.04	712.08	714.46	721.16	711.81
2	721.33	724.28	721.72	719.05	715.93	717.06	712.07	714.19	721.16	711.45
3	721.33	724.28	721.67	718.09	715.85	715.69	712.02	712.61	721.15	709.52
4	721.33	724.28	720.97	717.41	715.69	714.72	712.02	712.56	721.15	709.44
5	721.33	724.18	720.45	717.36	715.55	714.72	712.02	712.56	721.15	709.35

จากผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบแต่ละกรณีดังตารางที่ 6.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 2 ลดลงประมาณ 17% ของทุก ๆ กรณี จากผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบแต่ละกรณีดังตารางที่ 6.5 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำสุดอยู่ที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 10 เนื่องจากตำแหน่งของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับสถานีรับส่งผู้โดยสารที่ 16 เพียงสถานีเดียว เมื่อมีการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยในกรณีที่ 1 ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดสามารถเพิ่มขึ้นได้เฉลี่ยที่ระดับ 717.87 V จากกรณีฐานที่ค่าเฉลี่ย 715.51 V

ผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 6.10 ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมด้วยวิธี Piece-wise linear SOC ผลการจำลองหาค่าที่เหมาะสมเพิ่มเติมแสดงดังภาคผนวก ก.

ตารางที่ 6.10 ผลที่ดีที่สุดจากการหาค่าเหมาะที่สุด

Case	$\Delta V_{d,min}$ Inbound (V)	$\Delta V_{d,min}$ Outbound (V)	Md Inbound (A/V)	Md Outbound (A/V)
Base	-	-	-	-
1	45.76	27.34	33.76	25.75
2	45.70	30.22	33.73	26.75
3	45.72	34.27	33.74	28.28
4	45.76	39.11	33.76	30.35
5	45.84	44.00	33.81	32.79

จากการจำลองด้วยเทคนิคหาค่าที่เหมาะสมแสดงให้เห็นส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่คายประจุของทุกกรณี ในกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีที่มีอัตราการประหยัดพลังงานมากที่สุดมีส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าน้อยที่สุด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับของแต่ละกรณี ซึ่งในแต่ละกรณีใช้คุณลักษณะความชันในการชาร์จประจุเท่ากันที่ 15.38 A/V เนื่องจากใช้ส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าที่ชาร์จประจุเท่ากันที่ 0 V จึงทำให้เมื่อแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกร้อมตัวเก็บประจุยิ่งยวด จะทำให้เกิดการชาร์จประจุทันที โดยในการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมผลจากการจำลองของงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นแนวโน้มว่าการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี GA มีแนวโน้มที่ให้ผลลัพธ์ได้ดีกว่าแนวโน้มของวิธี PSO

6.4 สรุป

บทนี้นำเสนอการทดสอบและผลการทดสอบการประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดรหหลายขบวนที่ให้บริการในช่วงเวลาเร่งด่วนระยะเวลา 1 ชั่วโมง โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดและควบคุมด้วยวิธีการ Piece-wise linear SOC พบว่าวิธีการที่นำเสนอช่วยให้ประหยัดพลังงานในระบบรถไฟฟ้าได้ รวมทั้งได้นำเสนอกรณีศึกษาระดับสถานีประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่สถานะประจุสูงสุดสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ดีที่สุดซึ่งการหาขนาดที่เหมาะสมจะยิ่งช่วยให้การทำงานของระบบประหยัดพลังงานได้อย่างดียิ่งขึ้น

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการจัดการสำหรับระบบเบรกจ่ายคืนพลังงานร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรง โดยพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรงและพัฒนาวิธีการควบคุมการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยวิธี Piece-wise linear State of Charge ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในการจัดการกับระบบเบรกจ่ายคืนพลังงาน ภายใต้เงื่อนไขการลดพลังงานไฟฟ้าที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าส่งจ่ายผ่านสายส่งตัวนำรางที่สาม ด้วยโปรแกรม MATLAB นำมาทดสอบและประเมินผลกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรงสายสีม่วงที่ให้บริการในกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบ 5 กรณี คือ กรณีที่สถานะประจุไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 100%, 75%, 50%, 25% และ 0% ตามลำดับ จากผลการประหยัดพลังงานโดยวิธีการควบคุม Piece-wise linear จำเป็นต้องมีการกำหนดส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดในการทำงานซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม Particle swarm optimization และ Genetic algorithm optimization เปรียบเทียบในการหาค่าที่เหมาะสมในการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อลดการใช้พลังงานสูงสุด จากผลการทดสอบพบว่ากรณีที่ 1 สถานะประจุไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 100% สามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนจ่ายผ่านสายส่งตัวนำได้ 5.72% ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้ 9.40% และในกรณีที่ 5 สามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรกได้ 46.60% เมื่อเทียบกับกรณีฐานที่ไม่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ โดยที่แนวโน้มของวิธีการ Genetic algorithm optimization ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการ Particle swarm optimization เพียงเล็กน้อยจากการเปรียบเทียบผลจำลองซ้ำ และค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์สำหรับงานวิจัยนี้ แสดงผลการจำลองเพิ่มเติมในภาคผนวก ก สามารถสรุปได้ว่าวิธีการ Genetic algorithm optimization มีความเหมาะสมสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดในวิทยานิพนธ์นี้

7.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพียงขนาดเดียวซึ่งเป็นขนาดที่ได้รับความนิยมในท้องตลาด และออกแบบการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดคำนึงเพียงระดับแรงดันไฟฟ้าและ

กระแสไฟฟ้าเท่านั้น จึงทำให้ขนาดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีความไม่เหมาะสมกับการทำงานในระบบ
รถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนสายสีม่วง เพื่อให้มีความละเอียด สมจริง และมีความเหมาะสม ควร
มีการพิจารณาขนาดความจุพลังงานไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้เหมาะสมกับระบบในการทดสอบ
และช่วงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถทำงานได้ ในลำดับต่อไป



รายการอ้างอิง

- ธนัชชัย กุลรวรานิชพงษ์. (2561) ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ (Railway Electrification). **เอกสารประกอบการสอน**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นคร จันทศร. (2559) ช่างรถไฟ. **ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ โครงการจัดตั้งสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีระบบขนส่งทางรางแห่งชาติ**. ตีพิมพ์ครั้งที่ 3.
- สุภกิจ นุตยะสกล. (2011) การคำนวณเชิงวิวัฒนาการระหว่าง เจเนติกอัลกอริทึม กับพาทิคอลสวอม ออปติมัยเซชัน. **Journal of Information Science and Technology**.
- อภิรักษ์ ชัดวิลาศ. (2011) การประยุกต์วิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด. **MUTP Research Journal**.
- Allègre Anne-Laure, Bouscayrol Alain, Delarue Philippe, Barrade Philippe, Chattot Eric and El-Fass Said. Energy Storage System with Supercapacitor for an Innovative Subway. **IEEE Transactions on Industrial electronics** 57. pp. 4001-4012.
- Arboleya Pablo, Bidaguren Peru, and Armendariz Urtzi. (2016) Energy is on board: Energy storage and other alternatives in modern light railways. **IEEE Electrification Magazine** 4. pp. 30-41.
- Ciccarelli Flavio, Iannuzzi Diego and Tricoli Pietro. (2011) Speed-based Supercapacitor State of Charge Tracker for Light Railway Vehicles. **Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications**. pp. 1-12.
- Ciccarelli Flavio, Iannuzzi Diego and Tricoli Pietro. (2012) Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies** 24. pp. 36-49.
- Dimitrova Emiliya and Tomov Svetoslav. (2020) Components of the Communication System for Metro Trains Control. **Proceeding of Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)**. IEEE. pp. 1-3.

- González-Gil A., Palacin R., Batty P. and Powell J.P.. (2014) A systems approach to reduce urban rail energy consumption. **Energy Conversion and Management** **80**. pp. 509-524
- González Ander, Goikolea Eider, Barrena Jon Andoni and Mysyk Roman. (2016) Review on supercapacitors: Technologies and materials. **Renewable and sustainable energy reviews** **58**. pp. 1189-1206.
- Hirai Naoki. (2019) Development of Sodium Sulfur Battery. **Proceeding of IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM)**. pp. 1-4.
- Henok A. Behabtu, Maarten Messagie, Thierry Coosemans, Maitane Berecibar, Kinde A. Fante, Abraham A. Kebede and Joeri V. Mierlo. (2020) A review of energy storage technologies' application potentials in renewable energy sources grid integration. **Sustainability** **12**.
- Iannuzzi Diego and Tricoli Pietro. (2010) Metro Trains Equipped Onboard with Supercapacitors: a Control Technique for Energy Saving. **SPEEDAM** **2010**. pp. 750-756.
- Iannuzzi Diego and Tricoli Pietro. (2010) Optimal Control Strategy of Onboard Supercapacitor Storage System for Light Railway Vehicles. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. pp. 280-285.
- Kampeerawar Warayut, Koseki Takafumi and Zhou Fulin. (2018) Efficient Urban Railway Design integrating Train Scheduling, Onboard Energy Storage, and Traction Power Management. **Proceeding of International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia)**. pp. 3257-3264
- Khodaparastan Mahdiyeh, Mohamed Ahmed A. and Brandauer Werner. (2019) Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems** **20**. pp. 2831-2847.
- Kleftakis Vasilis A. Hatzargyriou Nikos D. (2019) Optimal control of reversible substations and wayside storage devices for voltage stabilization and energy savings in metro railway networks. **IEEE Transactions on Transportation Electrification** **5**. pp. 515-523.

- Kreith Frank, Goswami D. Yogi. (2017) Energy Management and Conservation. **Handbook**.
- Lin Fei, Li Xuyang, Zhao Yajie and Yang Zhongping. (2016) Control Strategies with Dynamic Threshold Adjustment for Supercapacitor Energy Storage System Considering the Train and Substation Characteristics in Urban Rail Transit. **Energies 9**.
- Lin Sheng, Huang Di, Wang Aimin, Huang Yujian, Zhao Liping, Luo Rui and Lu Guotao. (2014) Research on the Regeneration Braking Energy Feedback System of Urban Rail Transit. **IEEE Transactions on Vehicular Technology 68**. pp. 7329-7339.
- Liu Xuan and Li Kang. (2020) Energy storage devices in electrified railway systems: A review. **Transportation Safety and Environment 2**. pp. 183-201.
- Liu Wei, Xu Jiakuan and Tang Jingkun. (2018) Study on control strategy of urban rail train with on-board regenerative braking energy storage system. **Proceeding of ECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. pp. 3924-3929.
- Mousavi S.M. G, Faraji Faramarz, Majazi Abbas and Al-Haddad Kamal. (2017) A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews 67**. pp. 477-490.
- Palmieri Giovanni, Vasca Francesco, Frasca Roberto and Marino Pompeo. (2014) Control of Supercapacitor Storage System in Energy Efficient Railway Vehicles. **Proceeding of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion**. pp. 801-806.
- Pellitteri F., Castiglia V., Livreri P. and Miceli R.. (2018) Analysis and design of bi-directional DC-DC converters for ultracapacitors management in EVs. **Proceeding of Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)**. pp. 1-6.
- Ping TANG, CunPing WANG and XiangGen YIN. (2013) Study on Inverter based Regenerative Braking Energy Feedback and Utilization Scheme in Urban Rail

- Transit. *Applied Mechanics and Materials* Vol. 330. Trans Tech Publications Ltd. pp. 214-217.
- Qin Qiangqiang, Guo Tingting, Lin Fei and Yang Zhongping. (2019) Energy Transfer Strategy for Urban Rail Transit Battery Energy Storage System to Reduce Peak Power of Traction Substation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68. pp 11714-11724.
- RATNIYOMCHAI TOSAPHOL. (2016) OPTIMAL DESIGN AND CONTROL OF STATIONARY ELECTROCHEMICAL DOUBLE-LAYER CAPACITORS FOR LIGHT RAILWAYS. **PhD Thesis University of Birmingham.**
- Shang Fei, Zhan Jingyuan and Chen Yangzhou. (2018) Distributed Model Predictive Control for Train Regulation in Urban Metro Transportation. **Proceeding of International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).** pp. 1592-1597.
- Sumpavakup Chaiyut. (2017) PEAK-CUTTING STRATEGY FOR REGENERATIVE ENERGY MANAGEMENT INCORPORATING EDLC IN MASS RAPID TRANSIT. **Master Thesis Suranaree University of Technology.**
- Sutphrom Natchaphon. (2019) OPTIMAL POSITIONS AND CAPACITIES OF WAYSIDE ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR MASS RAPID TRANSIT: SILOM LINE. **Master Thesis Suranaree University of Technology.**
- Wu Chaoxian, Lu Shaofeng, Xue Fei, Jiang Lin and Chen Minwu. (2020) Optimal sizing of onboard energy storage devices for electrified railway systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 6. pp. 1301-1311.
- YANG Zhihong, Z YANG hongping, LIN Fei, XIA Huan and LI Xuyang. (2016) Adjustment of Metro Train Operation Curve for Efficiently Using Regenerative Energy. **Proceeding of IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.** pp. 3806-3811
- YANG Zhongping, XIA Huan, WANG Bin and Fei L. (2014) An Overview on Braking Energy Regeneration Technologies in Chinese Urban Railway Transportation.

Proceeding of International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA). pp. 2133-2139.

Yu Haoyuan, Wang Yanbo and Chen Zhe. (2020) Impedance-based Stability Analysis of Metro Traction Power System Considering Regenerative Braking. Proceeding of International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia). pp. 224-229.



ภาคผนวก ก

ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด



ตารางที่ ก.1 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 1 ด้วยเทคนิค PSO

Iteration	$\Delta V_{d,min}$		E_{train} (kWh)	E_{Sub} (kWh)	E_{waste} (kWh)	E_{loss} (kWh)	Energy saving (%)	Waste saving (%)	Loss saving (%)
	Inbound	Outbound							
1	47.13	27.99	7418.28	7085.27	539.29	80.41	5.62	41.62	9.19
2	45.76	28.49		7080.48	535.61	80.23	5.68	42.01	9.40
3	45.68	29.64		7083.36	536.74	80.23	5.64	41.89	9.40
4	43.52	32.17		7080.11	533.40	79.97	5.68	42.25	9.69
5	45.92	27.55		7078.70	533.64	80.25	5.70	42.23	9.37
6	47.12	27.44		7083.65	537.68	80.40	5.64	41.79	9.20
7	46.51	28.10		7082.88	537.38	80.33	5.65	41.82	9.28
8	45.80	27.64		7078.43	533.65	80.23	5.71	42.23	9.40
9	46.38	27.68		7081.12	535.70	80.31	5.67	42.00	9.30
10	46.53	27.63		7081.64	535.62	80.33	5.66	42.01	9.28
11	45.80	27.81		7078.91	534.22	80.24	5.70	42.16	9.39
12	46.92	28.37		7085.44	538.80	80.39	5.61	41.67	9.21
13	46.46	27.62		7081.30	535.76	80.32	5.67	42.00	9.29
14	46.62	28.82		7085.36	538.01	80.36	5.61	41.75	9.25
15	45.97	27.47		7078.70	533.59	80.26	5.70	42.23	9.37
16	46.38	28.60		7083.72	537.90	80.32	5.64	41.77	9.29
17	45.70	27.71		7078.18	533.10	80.22	5.71	42.29	9.40
18	46.26	27.46		7079.96	534.71	80.29	5.69	42.11	9.32
19	46.48	27.67		7081.53	536.21	80.33	5.67	41.95	9.29
20	46.04	27.36		7078.69	533.51	80.26	5.70	42.24	9.36
21	45.72	27.78		7078.47	533.12	80.23	5.71	42.28	9.40
22	46.29	28.29		7082.45	536.63	80.31	5.65	41.90	9.31
23	45.82	27.42		7077.88	533.41	80.24	5.71	42.25	9.39
24	46.50	27.67		7081.62	536.18	80.33	5.66	41.95	9.29
25	46.74	27.61		7082.50	535.91	80.36	5.65	41.98	9.25
26	46.21	27.49		7079.83	534.75	80.29	5.69	42.11	9.33
27	46.62	28.52		7084.54	537.96	80.35	5.63	41.76	9.26
28	46.95	28.90		7087.02	540.11	80.40	5.59	41.53	9.20
29	46.49	27.51		7081.12	535.88	80.32	5.67	41.98	9.29
30	45.99	27.60		7079.16	533.43	80.26	5.70	42.25	9.36
Standard deviation				2.55	2.01	0.08	0.03	0.22	0.10
Average				7081.40	535.73	80.29	5.67	42.00	9.33

ตารางที่ ก.2 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 2 ด้วยเทคนิค PSO

Iteration	$\Delta V_{d,min}$		E_{train} (kWh)	E_{Sub} (kWh)	E_{waste} (kWh)	E_{loss} (kWh)	Energy saving (%)	Waste saving (%)	Loss saving (%)	
	Inbound	Outbound								
1	46.66	30.00	7418.28	7112.84	526.42	80.66	5.25	43.01	8.91	
2	47.32	30.24		7115.81	528.15	80.75	5.21	42.82	8.81	
3	47.03	31.53		7116.75	527.65	80.70	5.20	42.88	8.87	
4	45.49	32.59		7112.16	523.15	80.50	5.26	43.36	9.09	
5	46.10	33.73		7115.95	524.70	80.57	5.21	43.19	9.01	
6	45.84	31.14		7111.48	523.95	80.56	5.27	43.28	9.03	
7	45.97	30.76		7111.41	524.05	80.57	5.27	43.27	9.01	
8	45.88	31.08		7111.56	523.77	80.56	5.27	43.30	9.02	
9	46.26	31.91		7114.28	525.39	80.61	5.23	43.12	8.97	
10	46.49	31.49		7114.58	526.23	80.64	5.23	43.03	8.94	
11	46.67	31.52		7115.33	526.54	80.66	5.22	43.00	8.91	
12	46.08	31.49		7112.96	524.09	80.59	5.25	43.26	8.99	
13	45.77	31.79		7112.14	524.49	80.55	5.26	43.22	9.04	
14	46.44	30.67		7113.13	525.56	80.63	5.24	43.10	8.94	
15	46.55	30.15		7112.68	525.84	80.65	5.25	43.07	8.92	
16	46.52	31.46		7114.66	526.18	80.64	5.22	43.03	8.93	
17	46.76	30.52		7114.13	525.86	80.68	5.23	43.07	8.89	
18	46.43	31.66		7114.59	525.80	80.63	5.23	43.08	8.94	
19	45.78	31.49		7111.77	524.00	80.55	5.26	43.27	9.04	
20	46.29	30.96		7113.00	525.42	80.62	5.25	43.12	8.96	
21	45.86	31.59		7112.23	523.96	80.56	5.26	43.27	9.03	
22	46.71	31.98		7116.15	526.69	80.66	5.20	42.98	8.91	
23	46.59	31.03		7114.29	526.19	80.65	5.23	43.03	8.92	
24	46.78	30.76		7114.61	526.31	80.68	5.22	43.02	8.89	
25	46.49	30.47		7112.99	525.58	80.64	5.25	43.10	8.93	
26	45.72	30.47		7109.93	522.77	80.54	5.29	43.40	9.04	
27	46.73	31.26		7115.19	526.28	80.67	5.22	43.02	8.90	
28	46.04	30.16		7110.68	523.74	80.59	5.28	43.30	8.99	
29	46.77	30.20		7113.63	526.09	80.68	5.24	43.04	8.89	
30	45.72	31.48		7111.51	523.46	80.54	5.27	43.33	9.04	
Standard deviation					1.75	1.35	0.06	0.02	0.15	0.07
Average					7113.41	525.28	80.62	5.24	43.13	8.96

ตารางที่ ก.3 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 3 ด้วยเทคนิค PSO

Iteration	$\Delta V_{d,min}$		E_{train} (kWh)	E_{Sub} (kWh)	E_{waste} (kWh)	E_{loss} (kWh)	Energy saving (%)	Waste saving (%)	Loss saving (%)
	Inbound	Outbound							
1	46.13	35.87	7418.28	7157.56	524.59	81.16	4.65	43.21	8.34
2	45.88	35.41		7155.55	523.79	81.12	4.68	43.29	8.39
3	46.56	34.92		7157.16	525.84	81.20	4.66	43.07	8.30
4	46.35	35.02		7156.55	524.55	81.17	4.67	43.21	8.33
5	46.82	34.97		7158.30	525.82	81.23	4.64	43.07	8.27
6	46.11	35.00		7155.54	523.32	81.14	4.68	43.34	8.37
7	45.91	34.77		7154.19	523.71	81.11	4.70	43.30	8.40
8	46.63	35.10		7157.85	526.20	81.21	4.65	43.03	8.29
9	46.69	34.62		7156.97	525.88	81.21	4.66	43.07	8.29
10	45.71	35.28		7154.56	523.19	81.10	4.69	43.36	8.41
11	46.02	35.43		7156.16	524.03	81.14	4.67	43.27	8.37
12	46.78	35.91		7160.24	527.08	81.24	4.62	42.94	8.25
13	46.20	34.32		7154.31	524.26	81.14	4.70	43.24	8.36
14	46.70	34.91		7157.69	526.11	81.22	4.65	43.04	8.28
15	45.79	35.75		7155.93	524.77	81.12	4.67	43.19	8.39
16	46.51	35.39		7158.04	525.89	81.20	4.65	43.07	8.30
17	45.87	35.55		7155.83	524.44	81.12	4.68	43.22	8.39
18	46.21	34.35		7154.41	524.16	81.14	4.69	43.25	8.36
19	47.00	34.79		7158.59	526.96	81.25	4.64	42.95	8.24
20	46.00	35.08		7155.28	523.68	81.13	4.68	43.31	8.38
21	46.38	35.91		7158.65	526.34	81.19	4.64	43.02	8.31
22	46.51	35.39		7158.04	525.89	81.20	4.65	43.07	8.30
23	46.18	35.34		7156.61	524.07	81.16	4.67	43.26	8.35
24	46.95	35.67		7160.39	527.77	81.26	4.61	42.86	8.23
25	45.74	35.74		7155.70	524.20	81.11	4.68	43.25	8.40
26	47.00	34.69		7158.35	526.92	81.25	4.64	42.95	8.25
27	45.90	35.18		7155.11	524.16	81.12	4.69	43.25	8.39
28	46.90	35.03		7158.76	525.52	81.24	4.64	43.11	8.25
29	46.21	35.64		7157.39	525.56	81.17	4.65	43.10	8.34
30	46.86	34.93		7158.37	525.87	81.24	4.64	43.07	8.26
Standard deviation				1.69	1.24	0.05	0.02	0.13	0.06
Average				7156.94	525.15	81.18	4.66	43.15	8.33

ตารางที่ ก.4 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 4 ด้วยเทคนิค PSO

Iteration	$\Delta V_{d,min}$		E_{train} (kWh)	E_{Sub} (kWh)	E_{waste} (kWh)	E_{loss} (kWh)	Energy saving (%)	Waste saving (%)	Loss saving (%)
	Inbound	Outbound							
1	45.76	40.93	7418.28	7187.98	513.13	81.58	4.25	44.45	7.87
2	46.89	40.56		7191.53	514.89	81.72	4.20	44.26	7.72
3	46.72	40.13		7189.58	514.58	81.67	4.23	44.29	7.77
4	46.08	40.70		7188.63	513.03	81.62	4.24	44.46	7.83
5	45.80	40.62		7187.24	512.86	81.58	4.26	44.48	7.87
6	46.26	39.85		7186.95	512.40	81.61	4.26	44.53	7.84
7	46.82	40.24		7190.29	514.85	81.69	4.22	44.26	7.74
8	45.86	40.43		7186.92	512.32	81.58	4.26	44.54	7.87
9	46.85	40.75		7191.93	515.70	81.72	4.19	44.17	7.72
10	45.77	39.75		7184.64	510.44	81.55	4.29	44.74	7.91
11	46.22	40.07		7187.38	512.41	81.61	4.26	44.52	7.83
12	46.93	39.77		7189.44	513.92	81.69	4.23	44.36	7.75
13	46.62	39.85		7188.41	513.56	81.66	4.24	44.40	7.79
14	46.15	40.02		7186.96	511.43	81.60	4.26	44.63	7.84
15	45.75	39.29		7183.27	509.79	81.53	4.31	44.81	7.93
16	46.25	40.41		7188.48	513.83	81.63	4.24	44.37	7.81
17	46.05	39.83		7186.02	510.97	81.58	4.27	44.68	7.87
18	46.57	40.14		7189.00	514.29	81.66	4.23	44.32	7.78
19	45.91	39.06		7183.29	510.01	81.54	4.31	44.79	7.92
20	46.38	40.97		7190.66	515.25	81.67	4.21	44.22	7.77
21	45.79	40.86		7187.91	512.96	81.59	4.25	44.47	7.86
22	46.03	40.71		7188.46	512.92	81.62	4.24	44.47	7.83
23	46.28	40.32		7188.33	513.53	81.63	4.24	44.4	7.81
24	46.89	40.76		7192.12	515.62	81.72	4.19	44.18	7.71
25	46.52	40.75		7190.59	515.32	81.68	4.21	44.21	7.76
26	46.08	39.39		7184.92	510.32	81.57	4.29	44.75	7.88
27	46.41	39.35		7186.16	511.88	81.61	4.27	44.58	7.83
28	46.96	39.65		7189.22	514.09	81.69	4.23	44.34	7.75
29	46.31	39.85		7187.15	512.53	81.62	4.26	44.51	7.83
30	45.98	39.44		7184.65	510.38	81.56	4.29	44.75	7.89
Standard deviation				2.36	1.74	0.06	0.03	0.19	0.06
Average				7187.94	512.97	81.63	4.25	44.46	7.82

ตารางที่ ก.5 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 5 ด้วยเทคนิค PSO

Iteration	$\Delta V_{d,min}$		E_{train} (kWh)	E_{Sub} (kWh)	E_{waste} (kWh)	E_{loss} (kWh)	Energy saving (%)	Waste saving (%)	Loss saving (%)
	Inbound	Outbound							
1	45.93	45.12	7418.28	7212.28	495.51	82.02	3.92	46.35	7.37
2	46.51	44.57		7213.15	495.74	82.07	3.91	46.33	7.32
3	46.27	44.19		7211.09	494.33	82.02	3.94	46.48	7.37
4	46.08	45.61		7214.19	495.69	82.06	3.90	46.34	7.33
5	45.85	45.37		7212.62	495.83	82.02	3.92	46.32	7.37
6	46.08	45.18		7213.07	495.54	82.04	3.91	46.35	7.35
7	46.68	44.14		7212.63	495.73	82.07	3.92	46.33	7.32
8	46.25	45.65		7215.04	497.28	82.09	3.89	46.16	7.30
9	46.19	44.68		7212.18	495.15	82.04	3.93	46.39	7.36
10	45.79	44.25		7209.26	493.34	81.97	3.96	46.59	7.44
11	46.07	44.11		7210.03	493.28	81.99	3.95	46.60	7.40
12	46.09	45.58		7214.18	495.73	82.06	3.90	46.33	7.33
13	46.52	45.15		7214.81	497.85	82.10	3.89	46.10	7.29
14	46.31	44.13		7211.08	494.40	82.02	3.94	46.47	7.37
15	46.33	45.80		7215.75	497.68	82.10	3.88	46.12	7.28
16	45.80	44.72		7210.63	493.81	81.99	3.95	46.54	7.41
17	46.98	45.79		7218.40	500.00	82.18	3.84	45.87	7.19
18	46.94	44.17		7213.78	496.50	82.10	3.90	46.25	7.28
19	46.46	44.04		7211.44	495.43	82.04	3.93	46.36	7.35
20	46.68	44.92		7214.84	497.90	82.11	3.89	46.10	7.28
21	46.36	45.02		7213.80	496.69	82.07	3.90	46.23	7.32
22	46.49	45.42		7215.42	498.22	82.10	3.88	46.06	7.28
23	45.74	45.47		7212.42	495.23	82.01	3.92	46.38	7.38
24	45.78	45.30		7212.14	495.71	82.01	3.93	46.33	7.38
25	46.02	44.50		7210.93	493.33	82.01	3.94	46.59	7.39
26	46.99	45.86		7218.62	500.27	82.19	3.84	45.84	7.19
27	46.94	44.54		7214.83	497.08	82.12	3.89	46.18	7.26
28	46.58	45.62		7216.32	498.45	82.12	3.87	46.04	7.26
29	46.66	44.94		7214.81	498.27	82.10	3.89	46.06	7.28
30	46.08	44.78		7211.97	494.73	82.03	3.93	46.44	7.37
Standard deviation				2.26	1.85	0.05	0.03	0.20	0.06
Average				7213.39	496.16	82.06	3.91	46.28	7.33

ตารางที่ ก.6 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 1 ด้วยเทคนิค GA

Iteration	$\Delta V_{d,min}$		E_{train} (kWh)	E_{Sub} (kWh)	E_{waste} (kWh)	E_{loss} (kWh)	Energy saving (%)	Waste saving (%)	Loss saving (%)
	Inbound	Outbound							
1	45.76	28.56	7418.28	7080.84	535.49	80.24	5.67	42.03	9.38
2	45.76	27.34		7077.38	533.46	80.23	5.72	42.25	9.40
3	46.65	27.46		7081.67	536.23	80.34	5.66	41.95	9.27
4	46.89	26.85		7080.95	534.83	80.37	5.67	42.10	9.24
5	45.37	28.56		7079.12	533.38	80.18	5.70	42.25	9.45
6	47.84	27.91		7088.07	541.59	80.50	5.58	41.37	9.09
7	46.57	27.37		7081.06	535.97	80.33	5.67	41.97	9.28
8	46.33	28.34		7082.77	536.64	80.31	5.65	41.90	9.31
9	46.19	27.74		7080.48	535.25	80.29	5.68	42.05	9.33
10	46.76	28.05		7083.84	537.57	80.37	5.63	41.80	9.24
11	46.39	27.61		7080.97	535.23	80.31	5.67	42.05	9.30
12	46.15	28.72		7083.02	536.08	80.29	5.65	41.96	9.32
13	46.93	27.55		7083.15	536.94	80.38	5.64	41.87	9.22
14	46.84	27.60		7082.91	535.80	80.37	5.65	41.99	9.24
15	46.42	27.50		7080.78	535.26	80.32	5.68	42.05	9.30
16	46.51	27.61		7081.49	535.69	80.33	5.67	42.00	9.28
17	46.46	27.98		7082.33	537.62	80.33	5.65	41.80	9.29
18	46.59	28.27		7083.72	537.69	80.35	5.64	41.79	9.26
19	46.27	28.81		7083.80	537.01	80.31	5.64	41.86	9.31
20	46.50	28.96		7085.21	538.74	80.34	5.62	41.67	9.27
21	46.63	27.27		7081.03	536.04	80.34	5.67	41.97	9.27
22	46.23	28.15		7081.79	536.68	80.30	5.66	41.90	9.32
23	46.88	28.45		7085.49	538.04	80.39	5.61	41.75	9.22
24	45.89	27.83		7079.37	534.25	80.25	5.69	42.16	9.37
25	46.90	27.74		7083.57	536.46	80.38	5.64	41.92	9.22
26	46.90	27.78		7083.69	536.38	80.38	5.64	41.93	9.22
27	46.62	27.41		7081.39	535.94	80.34	5.67	41.98	9.27
28	46.07	27.45		7079.09	533.56	80.27	5.70	42.24	9.35
29	46.48	27.81		7081.93	536.74	80.33	5.66	41.89	9.29
30	46.54	27.57		7081.51	535.71	80.33	5.67	42.00	9.28
Standard deviation				2.14	1.65	0.06	0.03	0.18	0.07
Average				7082.08	536.21	80.33	5.66	41.95	9.29

ตารางที่ ก.7 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 2 ด้วยเทคนิค GA

Iteration	$\Delta V_{d,min}$		E_{train} (kWh)	E_{Sub} (kWh)	E_{waste} (kWh)	E_{loss} (kWh)	Energy saving (%)	Waste saving (%)	Loss saving (%)
	Inbound	Outbound							
1	45.84	32.13	7418.28	7112.92	524.02	80.55	5.25	43.27	9.03
2	46.32	31.55		7113.99	525.24	80.61	5.23	43.14	8.97
3	45.76	31.28		7111.37	523.79	80.54	5.27	43.29	9.05
4	47.31	30.57		7116.33	528.57	80.74	5.20	42.78	8.82
5	46.86	30.34		7114.22	525.90	80.68	5.23	43.06	8.89
6	45.70	30.22		7109.55	523.11	80.55	5.29	43.37	9.04
7	46.12	30.50		7111.57	523.51	80.60	5.27	43.32	8.98
8	46.64	30.35		7113.38	525.66	80.66	5.24	43.09	8.91
9	46.89	31.14		7115.63	526.34	80.69	5.21	43.02	8.88
10	46.07	31.66		7113.16	524.30	80.58	5.24	43.24	9.00
11	46.29	30.92		7112.94	525.15	80.62	5.25	43.15	8.96
12	46.77	31.11		7115.12	526.39	80.67	5.22	43.01	8.89
13	45.72	30.43		7109.87	522.88	80.54	5.29	43.39	9.04
14	45.72	31.89		7112.09	523.63	80.54	5.26	43.31	9.05
15	46.64	30.69		7113.94	526.15	80.66	5.23	43.04	8.91
16	46.82	30.58		7114.47	526.44	80.68	5.23	43.01	8.88
17	46.45	30.82		7113.41	525.44	80.64	5.24	43.11	8.94
18	46.25	30.64		7112.33	525.13	80.61	5.26	43.15	8.96
19	46.98	31.56		7116.60	527.35	80.70	5.20	42.91	8.87
20	45.80	30.46		7110.24	523.39	80.55	5.28	43.34	9.03
21	45.96	31.72		7112.80	524.24	80.57	5.25	43.24	9.01
22	46.01	31.73		7113.02	524.51	80.58	5.25	43.22	9.00
23	46.36	31.03		7113.39	525.16	80.62	5.24	43.14	8.95
24	46.43	30.65		7113.05	525.55	80.63	5.25	43.10	8.94
25	46.39	31.12		7113.64	525.53	80.63	5.24	43.11	8.95
26	46.33	31.78		7114.36	525.85	80.62	5.23	43.07	8.96
27	46.72	31.47		7115.46	526.52	80.67	5.21	43.00	8.90
28	46.36	31.12		7113.52	525.15	80.62	5.24	43.15	8.95
29	46.62	30.17		7112.99	525.87	80.66	5.25	43.07	8.91
30	46.93	30.85		7115.34	526.98	80.70	5.22	42.95	8.87
Standard deviation				1.73	1.34	0.06	0.02	0.14	0.06
Average				7113.36	525.26	80.62	5.24	43.14	8.95

ตารางที่ ก.8 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 3 ด้วยเทคนิค GA

Iteration	$\Delta V_{d,min}$		E_{train} (kWh)	E_{Sub} (kWh)	E_{waste} (kWh)	E_{loss} (kWh)	Energy saving (%)	Waste saving (%)	Loss saving (%)
	Inbound	Outbound							
1	46.71	35.33	7418.28	7158.69	526.40	81.22	4.64	43.01	8.27
2	46.12	34.90		7155.35	523.58	81.14	4.68	43.32	8.37
3	46.28	35.15		7156.57	525.27	81.17	4.67	43.13	8.34
4	45.82	34.92		7154.18	523.37	81.11	4.70	43.34	8.41
5	45.93	35.16		7155.18	523.97	81.12	4.68	43.27	8.39
6	46.30	34.76		7155.75	524.89	81.16	4.68	43.17	8.34
7	46.87	34.61		7157.66	525.62	81.23	4.65	43.10	8.27
8	46.66	34.95		7157.63	526.06	81.21	4.65	43.05	8.29
9	46.72	35.69		7159.53	526.94	81.23	4.63	42.95	8.26
10	46.92	35.46		7159.82	527.05	81.25	4.62	42.94	8.24
11	46.85	35.03		7158.56	525.60	81.24	4.64	43.10	8.26
12	46.70	35.36		7158.72	526.36	81.22	4.64	43.01	8.27
13	46.74	34.71		7157.38	526.15	81.22	4.66	43.04	8.28
14	45.72	34.27		7152.23	522.25	81.08	4.72	43.46	8.43
15	45.73	35.38		7154.87	523.03	81.10	4.69	43.38	8.41
16	46.79	34.57		7157.25	525.50	81.22	4.66	43.11	8.28
17	46.32	34.44		7155.07	524.21	81.16	4.69	43.25	8.35
18	46.03	35.71		7156.81	524.31	81.15	4.66	43.24	8.36
19	45.86	35.15		7154.88	523.79	81.12	4.69	43.29	8.40
20	46.84	34.41		7157.06	525.58	81.22	4.66	43.10	8.27
21	46.36	35.81		7158.36	526.00	81.19	4.64	43.05	8.31
22	46.60	34.66		7156.71	525.57	81.20	4.66	43.10	8.30
23	46.82	34.53		7157.27	525.45	81.22	4.66	43.11	8.27
24	46.88	35.40		7159.53	526.23	81.25	4.63	43.03	8.25
25	46.84	34.43		7157.11	525.53	81.22	4.66	43.10	8.27
26	46.17	35.76		7157.49	524.99	81.16	4.65	43.16	8.34
27	46.02	35.22		7155.68	523.99	81.14	4.68	43.27	8.37
28	46.95	35.60		7160.24	527.88	81.26	4.62	42.85	8.23
29	45.83	34.93		7154.25	523.33	81.11	4.70	43.34	8.40
30	46.06	35.61		7156.72	524.55	81.15	4.66	43.21	8.36
Standard deviation				1.89	1.32	0.05	0.02	0.14	0.06
Average				7156.89	525.12	81.18	4.66	43.15	8.32

ตารางที่ ก.9 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 4 ด้วยเทคนิค GA

Iteration	$\Delta V_{d,min}$		E_{train} (kWh)	E_{Sub} (kWh)	E_{waste} (kWh)	E_{loss} (kWh)	Energy saving (%)	Waste saving (%)	Loss saving (%)
	Inbound	Outbound							
1	45.98	40.15	7418.28	7186.60	512.09	81.58	4.27	44.56	7.87
2	45.94	40.20		7186.57	512.43	81.58	4.27	44.52	7.87
3	46.10	40.31		7187.55	512.15	81.60	4.25	44.55	7.85
4	45.87	39.54		7184.47	510.50	81.55	4.29	44.73	7.91
5	46.53	40.71		7190.51	515.14	81.68	4.21	44.23	7.76
6	46.97	40.50		7191.67	515.98	81.72	4.20	44.14	7.71
7	46.59	39.15		7186.32	512.29	81.63	4.27	44.54	7.82
8	45.91	39.25		7183.82	509.96	81.55	4.30	44.79	7.91
9	46.25	40.68		7189.28	514.18	81.64	4.23	44.33	7.80
10	45.76	39.24		7183.17	509.81	81.53	4.31	44.81	7.93
11	46.88	39.36		7188.09	512.67	81.67	4.25	44.50	7.77
12	45.76	39.11		7182.80	509.73	81.52	4.32	44.82	7.94
13	45.84	40.19		7186.14	512.24	81.57	4.27	44.54	7.88
14	46.57	40.38		7189.69	514.94	81.67	4.22	44.25	7.77
15	46.19	39.93		7186.90	512.43	81.61	4.26	44.52	7.84
16	46.61	39.51		7187.42	512.94	81.64	4.25	44.47	7.80
17	46.33	40.56		7189.25	513.69	81.65	4.23	44.39	7.80
18	46.55	40.00		7188.53	513.27	81.65	4.24	44.43	7.79
19	45.77	39.97		7185.24	510.96	81.55	4.28	44.68	7.90
20	46.45	39.12		7185.67	511.32	81.61	4.28	44.64	7.84
21	45.83	39.62		7184.53	510.58	81.55	4.29	44.72	7.91
22	46.97	39.06		7187.6	513.44	81.67	4.25	44.41	7.77
23	46.19	39.93		7186.9	512.43	81.61	4.26	44.52	7.84
24	46.85	39.76		7189.08	513.11	81.68	4.23	44.45	7.76
25	46.47	40.14		7188.59	514.21	81.65	4.24	44.33	7.79
26	46.04	40.95		7189.21	513.1	81.63	4.23	44.45	7.82
27	46.27	40.5		7188.82	513.84	81.64	4.24	44.37	7.81
28	45.98	39.21		7184	509.88	81.55	4.3	44.8	7.9
29	46.73	40.29		7190.07	515.01	81.69	4.22	44.24	7.75
30	45.8	40.62		7187.24	512.86	81.58	4.26	44.48	7.87
Standard deviation				2.27	1.69	0.05	0.03	0.18	0.06
Average				7187.19	512.57	81.62	4.26	44.51	7.83

ตารางที่ ก.10 ผลการหาส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กรณีที่ 5 ด้วยเทคนิค GA

Iteration	$\Delta V_{d,min}$		E_{train} (kWh)	E_{Sub} (kWh)	E_{waste} (kWh)	E_{loss} (kWh)	Energy saving (%)	Waste saving (%)	Loss saving (%)
	Inbound	Outbound							
1	46.13	45.10	7418.28	7213.07	495.42	82.05	3.91	46.36	7.35
2	46.32	44.87		7213.22	496.43	82.06	3.91	46.26	7.33
3	45.89	44.56		7210.55	493.32	81.99	3.95	46.59	7.41
4	45.90	45.38		7212.85	496.21	82.03	3.92	46.28	7.36
5	46.64	45.03		7214.97	497.81	82.11	3.89	46.11	7.28
6	46.36	44.28		7211.72	494.53	82.04	3.93	46.46	7.35
7	46.19	44.76		7212.40	495.96	82.04	3.92	46.31	7.35
8	46.58	45.94		7217.15	499.32	82.14	3.86	45.94	7.24
9	46.62	44.85		7214.40	497.53	82.10	3.90	46.14	7.29
10	46.58	45.23		7215.28	497.98	82.11	3.88	46.09	7.28
11	46.94	45.96		7218.67	500.50	82.18	3.84	45.81	7.19
12	45.86	44.61		7210.57	493.72	81.99	3.95	46.55	7.41
13	46.23	44.88		7212.88	496.37	82.05	3.92	46.26	7.34
14	46.51	44.90		7214.09	497.42	82.08	3.90	46.15	7.30
15	46.23	44.72		7212.43	495.00	82.04	3.92	46.41	7.35
16	46.09	45.02		7212.68	495.51	82.04	3.92	46.36	7.35
17	45.81	45.18		7211.94	495.47	82.01	3.93	46.36	7.39
18	45.76	44.21		7209.01	493.41	81.96	3.97	46.58	7.44
19	46.54	44.24		7212.34	495.48	82.06	3.92	46.36	7.33
20	46.33	44.75		7212.93	496.06	82.06	3.92	46.30	7.33
21	46.78	45.87		7217.79	499.21	82.16	3.85	45.95	7.22
22	46.59	44.20		7212.44	495.72	82.06	3.92	46.33	7.33
23	46.67	45.41		7216.13	498.68	82.13	3.87	46.01	7.25
24	45.99	45.33		7213.10	495.96	82.04	3.91	46.31	7.35
25	45.81	44.62		7210.39	493.87	81.98	3.95	46.53	7.41
26	45.91	44.70		7211.04	494.00	82.00	3.94	46.52	7.40
27	45.76	45.91		7213.65	496.49	82.04	3.91	46.25	7.36
28	46.61	45.69		7216.62	498.68	82.13	3.87	46.01	7.25
29	46.33	45.80		7215.75	497.68	82.10	3.88	46.12	7.28
30	45.84	44.00		7208.75	493.21	81.96	3.97	46.60	7.44
Standard deviation				2.45	1.94	0.06	0.03	0.21	0.06
Average				7213.29	496.23	82.06	3.91	46.28	7.33

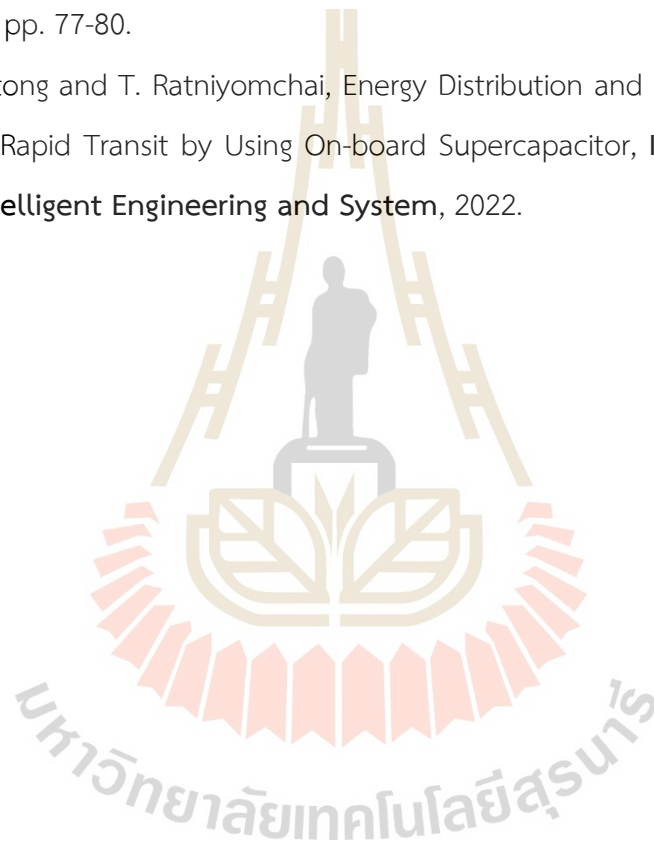
ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- K. Chatwongtong, T. Kulworawanichpong, and T. Ratniyomchai, Energy Saving with On-board Supercapacitors in MRT Purple Line, Bangkok, **Proceeding of International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)**, 2021, pp. 77-80.
- K. Chatwongtong and T. Ratniyomchai, Energy Distribution and Loss Mitigations in DC Mass Rapid Transit by Using On-board Supercapacitor, **International Journal of Intelligent Engineering and System**, 2022.



Energy Saving with On-board Supercapacitors in MRT Purple Line, Bangkok

Kittapon Chatwongtong
School of Electrical Engineering,
Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology,
Thailand
e-mail: game.kittapon@gmail.com

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

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

Abstract— This paper presents an on-board energy storage for reducing energy distribution from the substations and reducing energy loss in the conductor transmission lines of the mass rapid transit system by using supercapacitors as energy storage devices. The power distribution and the train movement of the MRT purple line in Bangkok, Thailand, which has 16 passenger stations, 10 substations feeding by 750 V DC power supplies through its third rail, and a total round distance of 20.94 km, are simulated and calculated in MATLAB. The total energy consumption of the MRT purple line services is 75.432 MWh per day. For this study, installing the on-board supercapacitors can effectively reduce the energy distribution by 22.10% and energy loss in multi-conductors by 73.91%.

Keywords— multi-train, multi-conductor, on-board energy storage, regenerative energy management, supercapacitors

I. INTRODUCTION

Nowadays, the mass rapid transit system or the MRT purple line in Bangkok, Thailand has a total passenger station of 16 stations (PP01-PP16) from Khlong Bang Phai to Tao Poon and feeding by 750 V DC power supplies through its third rail [1], where the train systems are an intermittent electrical load. In general, there are three operating modes of a train movement, including acceleration, constant speed, and deceleration. The energy is consumed by the train during acceleration or motoring mode, on the other hand, the energy is capable of return back the power terminal with the regenerative braking during the deceleration mode. Generally, there are many ways of regenerative energy management applied in the MRT system, for example, on-board supercapacitor that is able to store the regenerative braking energy and then supply the train during the acceleration mode, which presents the advantage of the energy loss reduction in the conductor's transmission system [2].

The study of the train movement with the model of the multi-trains running and the power flow calculation is applied in this study using the current injection method (CIM) [3], which is widely used in the railway systems to calculate the energy consumption, energy distribution, and energy loss in multi-conductors [4]. The algorithm of the previous methods applied with the and supercapacitor model are calculated by the MATLAB. The supercapacitors, which is often called as electro-chemical double-layer

capacitors (EDLCs) or ultra-capacitors, is currently discussed as a high-power storage device [5]. The supercapacitors are designed by realizing performance charge and discharge energy management.

The remainder of this paper will address the method of the calculation in II, consisting of the train movement calculation, power flow calculation, and supercapacitor model. The procedures and system parameters are in III. Finally, the simulation results and discussions, and conclusions are in IV and V, respectively.

II. METHODOLOGY

A. Train Movement Calculation

The force applied for the train movement can be described with the free body diagram as in Fig. 1.

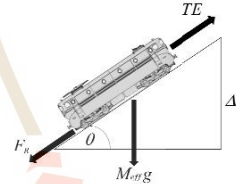


Fig. 1. Diagram of the train movement.

Forces acting on a train motion consist of the train traction force, F (N), the tractive effort, TE (N) and friction forces. The friction forces consist of the train resistance, F_R (N) and the gradient force F_{grad} (N) as in (1).

$$F = TE - F_R - F_{grad} \quad (1)$$

The movement of the train is caused by the frictions between the wheels, rails, and air resistance called the resistance of train movement or Davis equation [4] as follows:

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

Where, v is the train's speed (kph), A (kN), B (kNh), and C (kNh²/km²) are constants, referred as the Davis coefficients [4]. The Davis equation is developed for the vehicle's resistance calculation. This paper applies the Davis equation of the MRT purple line from JIS E 6002 Japan standard [1], which is expressed as follows:

$$F_R = (1.65 + 0.0247v)W_m + (0.78 + 0.0028v)W_t + 0.0078(n-1)v^2 \quad (3)$$

Where, W_m is the motor car mass (ton), W_t is the total mass (ton), and n is the car number of a train.

In general, the metro train line's gradient or slope is very small. The gradient force is generated by the slope is shown in (4) and (5).

$$F_{grad} = M_{eff} g \sin\theta \approx \frac{M_{eff} g \square h}{L} \quad (4)$$

$$M_{eff} = M_t(1 + \lambda_w) + M_l \quad (5)$$

Where, h is the height (m), L is the length (m), g is the earth's gravity (m/s^2), M_{eff} is the effective mass (ton), M_t is the tare mass (ton), λ_w is the passenger factor, and M_l is the passenger load (ton).

Essentially, the instantaneous distance and speed of the train have to be found and updated every iteration of the simulation as shown in (6) and (7).

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \alpha \Delta t \quad (6)$$

$$s(t + \Delta t) = s(t) + v(t + \Delta t) \Delta t + \frac{1}{2} \alpha \Delta t^2 \quad (7)$$

Where, $v(t)$ and $v(t + \Delta t)$ are the current and updated speeds (kph), $s(t)$ and $s(t + \Delta t)$ are the current and updated positions (km), α is the acceleration (m/s^2), t and Δt are the simulation time and time steps (s).

The power consumed by a train corresponding to the train moving includes the auxiliary power used for lighting systems, air conditioning, signal systems, etc. and the power used for driving which depends on the traction of the train and the instantaneous speed is shown in (8).

$$P_r = \frac{Fv}{\eta} + P_{aux} \quad (8)$$

Where, P_r is the train power consumption (W), η is the efficient, and P_{aux} is the auxiliary power (W).

From station to station, there are three operating modes of a train movement: acceleration mode, constant speed mode, and deceleration mode as shown in Fig. 2.

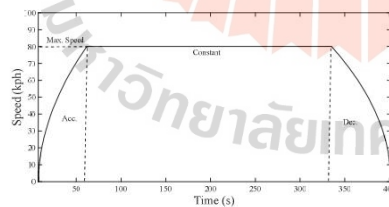


Fig. 2. Operating modes of a train movement.

The acceleration mode starts with the constant accelerating from the departure station. When the train reaches the limit speed, it turns into the constant speed until the braking mode before stopping at the arrival

station. The train's speed profile was designed under the condition of running time, dwell time, and distance between stations. The train power consumption of each mode can be expressed as follows:

$$P_r = \begin{cases} \frac{Fv}{\eta} + P_{aux}, & \alpha > 0 \\ P_{aux}, & \alpha = 0 \\ \frac{Fv}{\eta} + P_{aux}, & \alpha < 0 \end{cases} \quad (9)$$

B. Power Flow Calculation

In this paper, the current injection method (CIM) is used in the power flow calculation and taken into account the multi-conductor systems, which obtained substations voltage, trains voltage, power distribution for each substation, and energy losses in the system. A node analysis consists of rectifier substations and trains as the model shown in Fig. 3 and the solution is shown in (10) and (11).

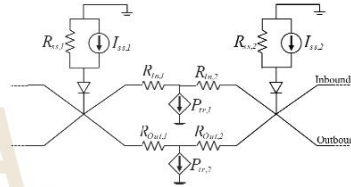


Fig. 3. DC traction system.

$$I_{s,k} - \frac{P_{tr,k}}{V_k} = V_k \sum_{i=1}^N G_{k,i} V_i \quad (10)$$

$$[I] = [G][V] \quad (11)$$

Where, $I_{s,k}$ is the short-circuit capacity (A) of the substation at bus k , V_k is the voltage (V) at bus k , $P_{tr,k}$ is the power consumption (W) of the train at bus k , $G_{k,i}$ is an element k,i of the bus conductance matrix, and R_{in} and R_{out} are the combined of conductor resistance and rail resistance (Ω/km). The bus conductance matrix G can be formulated as the bus admittance matrix Y [3], [4].

C. Supercapacitor Model

The supercapacitor has generally two operating modes: discharging mode and charging mode. The supercapacitor is discharging energy when the train is in the acceleration mode to support the train motoring and charging energy when the train is in the deceleration mode to store the regenerative braking.

The simplified model of the on-board supercapacitors is shown in Fig. 4. The power of the supercapacitor depends on the charging current, discharging current, and leakage current as presented in (12) with disregarded the internal resistance. The state of charge of supercapacitors at each time step is calculated in (13). In this paper, a supercapacitor was designed under the condition of maximum regenerative braking as a power charging, discharge time, and the amount of power used from one station to another [5], [6].

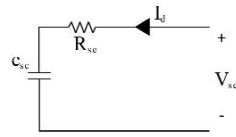


Fig. 4. Supercapacitor equivalent circuit.

$$I_d = \begin{cases} \frac{P_{tr}}{V_{sc}} & , P_{tr} < 0 \\ I_{leakage} & , 0 < P_{tr} \leq P_{aux} \\ \frac{P_{tr}}{V_{sc}} & , P_{tr} > P_{aux} \end{cases} \quad (12)$$

$$\%SOC(t+\Delta t) = \%SOC(t) + \frac{\Delta t}{C_{sc}} \int I_d dt * 100 \quad (13)$$

Where, I_d is the charging/discharging current (A), $I_{leakage}$ is the leakage current of supercapacitor (A), R_{sc} is the equivalent series resistance (Ω), $\%SOC$ is the state of charge (%), and C_{sc} is the capacity of supercapacitors (Ah).

III. PROCEDURES AND SYSTEM PARAMETERS

The procedure of the simulation in this paper starts from setting parameters and calculation of various values in the system by steps iteration shown in Fig. 5.

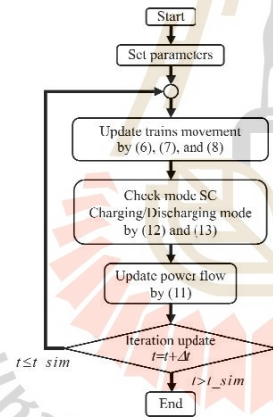


Fig. 5. Operating diagram of simulated system.

The simulation is performed with MATLAB to configuring parameters, calculating the train movement, checking the operating mode of the supercapacitor, performing the power flow calculation [3].

The train parameters of the MRT purple line, the station and substation parameters, and their location are presented in TABLE I - III [1], [7]. The supercapacitor parameters are also presented in TABLE IV obtained by the design of charging and discharging power drawn by the train movement. The tractive force and the braking force of the train

depends on the weight and the speed of the train, which characteristics are shown in Fig. 6. The gradient of the running routes of the MRT purple line is shown in Fig. 7.

TABLE I. TRAIN PARAMETERS

Parameters	Value	Unit
Acceleration	1.2	m/s ²
Deceleration	0.9	m/s ²
Max. Velocity	80	kph
Train mass	153	ton
Passenger mass	75	ton
Max. Tractive effort	228.8	kN
Max. Braking effort	168.8	kN
Power aux.	270	kW
Efficiency motor/inverter	0.86	-

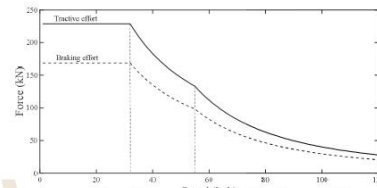


Fig. 6. Tractive effort and braking effort characteristics.

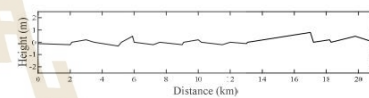


Fig. 7. Gradient profile MRT purple line.

TABLE II. STATION PARAMETERS

Code	Name	Station Position [km]	Substation Position [km]
PP01	Khlong Bang Phai	0.00	0.00
PP02	Talad Bang Yai	1.27	1.27
PP03	Sam Yaek Bang Yai	2.83	2.83
PP04	Bang Phlu	4.40	-
PP05	Bang Rak Yai	5.60	5.60
PP06	Bang Rak noi Tha It	6.85	-
PP07	Sai Ma	8.10	8.10
PP08	Phra Nang Klao Bridge	9.57	-
PP09	Yaek Nonthaburi 1	11.20	11.20
PP10	Bang Krasor	12.46	-
PP11	Nonthaburi Civic Center	13.36	13.36
PP12	Ministry of Public Health	15.15	-
PP13	Yaek Tiwanon	16.35	16.35
PP14	Wong Sawang	18.07	18.07
PP15	Bang Son	19.36	19.36
PP16	Tao Poon	20.94	-

TABLE III. SUBSTATION PARAMETERS

Parameters	Value	Unit
Short-circuit capacity	10	MW
No-load voltage	750	V
Contact resistance	0.007	Ω /km
Rail resistance	0.0175	Ω /km
Earth resistance	0.1	S/km

2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)
October 20-22, 2021, Nakhon Ratchasima, THAILAND

TABLE IV. SUPERCAPACITOR PARAMETERS

Parameters	Value	Unit
Mass	1.2	ton
Charge current	2000	A
Discharge current	2000	A
Energy storage	100	kWh
Rated voltage	750	V
Efficiency Charge/Discharge	0.9	-

IV. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSIONS

The MRT purple line starts the departure time from 5:30 a.m. to 0:00 a.m. with the total time service of 18.5 h per day and 20 trains in service which are performed in the simulation. The train would stop at the passenger station with a dwell time of 25 s. The headway of the peak time from 6:30 a.m. to 8:30 a.m. and 5:00 p.m. to 7:30 p.m. is 6 min and the other times of the off-peak time are 9.50 min [7].

The traction energy and regenerative energy are affected by the train's speed profile and the track gradient. The train's speed profile inbound and outbound directions of the MRT purple line within the speed limit with train positions are shown in Fig. 8. Inbound and outbound train's services are simulated by the multi-train simulation in MATLAB, which taken into account the conductor rail, running rail, and earth conductor, obtained the energy distribution by the substations and energy loss in conductors. The power consumed of the round-trip train service with the train positions can be shown in Fig. 9.

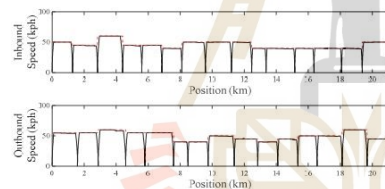


Fig. 8. Train's speed profiles.

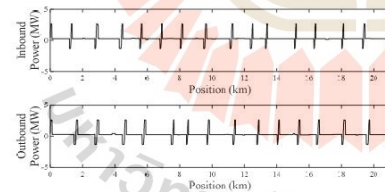


Fig. 9. Trains power consumption.

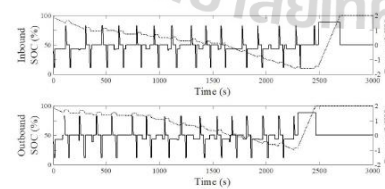


Fig. 10. Operation of supercapacitor.

Fig. 10 presents the power and SOC of supercapacitors with the time service. The SOC was starting from 100% and down to the lowest SOC of 10% and charging energy up to 100% at the terminal. Regarding a day service of the MRT purple line, the total energy of trains, substations, supercapacitors, charging energy of supercapacitors at the terminal, and losses of the system case study and based case in with and without the on-board supercapacitors are presented in TABLE V.

TABLE V. SIMULATION RESULTS

Energy	Base case [MWh]	Case study [MWh]
Trains	73.85	73.85
Substations	75.43	35.63
Supercapacitors	-	38.63
Recharge at terminal stations	-	23.13
Total losses	1.59	0.41

From TABLE V, it is obvious that the energy supplied by the substations are reduced by 52.76% which is supported by the on-board supercapacitors. However, supercapacitors need to be charged at the terminal substation, the energy consumed at substations can be saved by 22.10%. The total energy losses in conductors have been eventually reduced by 73.91%.

V. CONCLUSION

This paper presents the reduction of energy distribution and energy losses in the multi-conductor system in the MRT purple line Bangkok, Thailand by applied the on-board supercapacitors. As the results, it can be concluded that the energy consumption is saved by 22.10% and the energy loss reduction in the conductors is significance achieved by 73.91%. However, the on-board supercapacitor sizing and cost are not considered, it would be included in the further study.

REFERENCES

- [1] T. Chuchit. "Study and assessment of stray current in DC rapid transit system." Thesis, electrical engineering, suranaree university of technology, 2018.
- [2] Tosaphol R., Stuart H. and Pietro T. (2014). "Recent developments and application of energy storage devices in electrified railway." IET Electrical Systems in Transportation, 4(1), pp. 9-20.
- [3] T. Kulworawanchapong. "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.
- [4] K. Mongkoldee, U. Leeton and T. Kulworawanchapong "Single train movement modeling and simulation with rail potential consideration." Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, December 13-15, 2016.
- [5] Shery Dinglasan Fenol, Felicito S. Caluyo, Jhunlyn L. Lorenzo. "Simulation and modeling of charging and discharging of supercapacitor." International conference on circuit, system and simulation, 2017.
- [6] C. Jobsoongnern, T. Rattiyomchai, T. Kulworawanchapong. "Energy consumption study of rapid charging of catenary free light rail transit." Proceeding of the 2020 ICPEI conference on power, energy and innovation, Chiangmai, Thailand, October 14-16, 2020.
- [7] MRT Purple Line, <https://metro.bemple.co.th> [online]



Energy Distribution and Loss Mitigations in DC Mass Rapid Transit by Using On-board Supercapacitor

Kittapon Chatwongtong¹ Tosaphol Ratniyomchai^{1*}

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

* Corresponding author's Email: tosaphol@sut.ac.th

Abstract: In general, the train has consumed energy from the traction substation via the conductor during acceleration or motoring mode. This mode consumes most of the energy. However, during deceleration or braking mode, energy can be returned to the power terminal by regenerative braking management. This paper presents the energy loss reduction in the conductor transmission system and energy distribution mitigation from the traction substations by using the on-board supercapacitor, which is a storage device for storing regenerative braking energy. The results include the first case without a supercapacitor and the second case with supercapacitor operated on piece-wise linear state of charge (SOC) control. They are obtained by the single-train simulation on MATLAB and the power flow calculation by current injection method (CIM) on the peak time of the DC Mass Rapid Transit (MRT) Purple Line in Bangkok, Thailand. This research can effectively save energy distribution, energy loss and energy waste by approximately 3.5 %, 10 % and 20 % respectively.

Keywords: On-board energy storage, Piece-wise linear, Regenerative energy management, Single-train simulation, Supercapacitor.

Notation list

λ_w	is the passenger factor,	$I_{ss,j}$	is the short-circuit capacity of the traction substation at bus j ,
A, B, C	are the Davis coefficients,	$[I]$	is the vector of current in the system,
a	is the acceleration,	I_{sc}	is the current of supercapacitor,
E_{sub}	is the energy of traction substation,	$I_{sc,max}$	is the maximum current of supercapacitor,
E_{train}	is the train's consumption energy,	L	is the route's length,
E_{loss}	is the energy loss in conductor,	M_{eff}	is the train's mass effectiveness,
E_{waste}	is the energy waste,	M_r, M_l	are the train's mass and train's payload mass,
$E_{discharge}$	is the energy discharge of energy storage device,	Md, Mc	are the slope of discharge and charge,
E_{charge}	is the energy charge of energy storage device,	n	is the number of cars,
F	is the force action on the train,	NS	is the number of traction substations,
$F_{friction}$	is the train's friction force,	NT	is the simulation time with updating every 0.5 seconds,
F_R	is the train's resistance force between wheel, rail and air,	NP	is the number of the next passenger station,
F_{grad}	is the resistance force by gradient,	OF	is the objective function,
g	is the gravitational,	P_{train}	is the power consumed by the train,
$G_{k,ji}$	is the conductance matrix k at bus j to i ,	P_{sub}	is the power of traction substation,
$[G]$	is the matrix of conductor in the system,	P_{loss}	is the power loss,
Δh	is the difference of route elevation,	P_{sc}	is the power of supercapacitor,
		s	is the position train of round-trip service,
		SNP	is the position of passenger station number NP ,

Received: June 7, 2022. Revised: July 1, 2022.

391

SOC_{end} is the state of charge at the end of round trip,
 TE is the train's tractive effort,
 $t, \Delta t$ are the simulation time and time step,
 v is the speed of a train,
 V_{train} is the train's voltage,
 V_i is the voltage at bus i ,
 $|V|$ is the vector of voltage in the system,
 V_{sc} is the voltage of supercapacitor,
 ΔV is the voltage deviation between train and supercapacitor,
 $\Delta V_{d,min}$ is the minimum discharge voltage deviation,
 $\Delta V_{d,max}$ is the maximum discharge voltage deviation,
 $\Delta V_{c,min}$ is the minimum charge voltage deviation,
 $\Delta V_{c,max}$ is the maximum charge voltage deviation,
 $v_{limit,NP}$ is the speed operation limit of passenger station number NP ,
 W_m, W_t are the motor car mass and trailer car mass.

1. Introduction

The worldwide demand for public transportation is increasing steadily in modern-day. Particularly in Thailand, where there are plans to extend the existing public transit system [1]. Generally, the electric train has three operating modes consist of motoring or acceleration mode, constant speed mode, and braking or deceleration mode. The mass rapid transit is characterized by frequently motoring and braking, which results in high regeneration power. The most energy is consumed by the train motoring and the energy can be regenerated by the train braking. Though regeneration energy is a waste product that must be removed from the system. An on-board supercapacitor deployed on a train is a viable solution for storing the regenerative braking energy during deceleration mode and supplying energy back to the traction system during acceleration mode. [2-4]. Therefore, the main advantages are the saving of energy consumption, energy loss and energy waste from braking reductions. There is a lot of paper involved in the management of regenerative braking energy, for example, determining the optimal sizing of an on-board energy storage device with a focus on reducing CO₂ emissions or determining the optimal installation location of an energy storage device [5-6]. According to the results of the paper, the installation of wayside energy storage devices can reduce energy consumption. However, there is a limitation on power loss in transmission lines. Therefore, this paper focuses on the purpose of energy saving and loss minimization in MRT Purple Line in Bangkok, Thailand, by controlling an on-board supercapacitor to reuse the regenerative braking with a novel approach in applying the simulation model of the piece-wise linear SOC.

The train's movement is calculated using a single-train simulation, and the power flow is calculated by using the current injection method (CIM) calculated by MATLAB [7], which calculates the train voltage, current, and power using a model of the multi-conductor. The electrochemical double-layer capacitor (EDLCs), also known as supercapacitors, have negligible chemical reactions at the electrodes, offers very low internal resistance, and thus has a very high efficiency of around 95%, making it the most ideal for the train's power requirements both in accelerating and braking modes. The main advantage of a supercapacitor is faster charge/discharge than batteries, and higher efficiency [8-11]. Based on the stationary flywheel used in the New York City transportation with DC system and the technology for recharging and discharging energy storage, the goal of this regulation is to lower peak power demand in the power supply while simultaneously saving energy through regenerative braking. Technology has advanced significantly in recent years. On-board control state of charge (SOC) is becoming increasingly popular. On-board state of charge control for storage devices in DC systems has many ways of management [2, 12]. The notion of piece-wise linear state of charge control is investigated in this paper. It is a discharge of the current if the train voltage is lower than the energy storage device. If the train voltage is more, it is charged current. The variation of the charge and discharge current is slightly controlled by the linear equation. The charge and discharge area are developed from current regulation control method [13]. The five-zones piece-wise linear divide the working principle. There are two active energy storage zones and three non-active energy storage zones. There is a discrepancy in train voltage during operation. With an active slope, the current has been charging and discharging.

Consequently, this paper provides a technique for optimizing the best deviation of energy storage voltage for minimizing energy distribution coordination with considering the different voltages between train and energy storage. This problem was solved using the particle swarm optimization (PSO) approach. The initial energy can be any value, but the final energy storage must be full in 100% of SOC, and the voltage deviation must be in the device's lowest to maximum range.

In this paper, section 2 presents the methodology for calculation including train movement, power flow analysis and piece-wise linear state of charge control. Section 3 proposes the concept of particle swarm optimization and optimal energy distribution in a DC railway system, as well as the problem formulation.

Received: June 7, 2022. Revised: July 1, 2022.

392

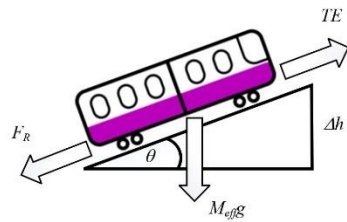


Figure. 1 Free-body diagram of the train movement

Section 4 describes the procedure of simulation and system parameters. Section 5 and 6 include the simulation results and conclusion, respectively.

2. Methodology

2.1 Train movement

Fig. 1 shows a free-body diagram of a train motion, which can be represented as the force acting on the train. The tractive effort and the friction forces operate on a train's movement, as in Eq. (1). As seen in the diagram, the friction forces are comprised of the train resistance and the gradient force as in Eq. (2).

$$F = TE - F_{friction} \quad (1)$$

$$F_{friction} = F_R + F_{grad} \quad (2)$$

The train resistance, commonly known as the Davis equation, is the friction that occurs between the wheel, rail, and air while the train moving as in Eq. (3). The Davis equation was created particularly for each train model, and it was utilized in Eq. (4) by the JIS E 6002 Japan standard [14].

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

$$F_R = (1.65 + 0.0247v(t))W_m + (0.78 + 0.0028v(t))W_t + 0.0078(n - 1)v(t)^2 \quad (4)$$

The gradient or slope of the metro rail line is frequently quite small, the force induced by the slope's grade is computed as in Eq. (5).

$$F_{grad} = M_{eff}g\sin\theta \approx \frac{M_{eff}g\Delta h}{L} \quad (5)$$

$$M_{eff} = M_t(1 + \lambda_w) + M_l \quad (6)$$

The movement of a train can be calculated and

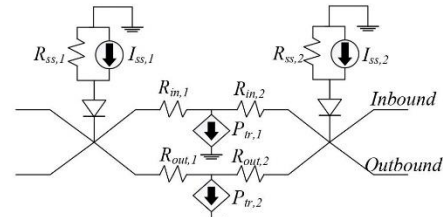


Figure. 2 DC distributed system

modified every time steps of the simulations as in Eqs. (7) and (8). The train has three operational modes throughout the route between passenger stations including motoring or acceleration mode, constant speed mode, and braking or deceleration mode. The train accelerates from the passenger station in constant acceleration. When the train gets the operation limited speed, the mode switches to constant speed until the train starts braking at the next passenger station.

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a\Delta t \quad (7)$$

$$s(t + \Delta t) = s(t) + v(t + \Delta t)\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 \quad (8)$$

The train's power is composed of auxiliary power for illuminating, conditioning systems, and communication, as well as traction power for driving the train, which is determined by traction force and instantaneous speed. The power of a train in deceleration or braking mode can return to storage in the on-board energy storage as expressed in Eq. (9). The train's speed profile includes the train's running duration, dwell time, and distance between passenger stations.

$$P_{train} = \begin{cases} \frac{Fv(t+\Delta t)}{\eta} + P_{aux} & , a > 0 \\ P_{aux} & , a = 0 \\ Fv(t + \Delta t)\eta + P_{aux} & , a < 0 \end{cases} \quad (9)$$

The power consumed by the train has been adjusted by on-board energy storage in order to calculate the energy traction substation has to supply as calculated in the following section.

2.2 Power flow calculation

The current injection method is generally regarded as a tool for solving electrical power networks in DC railways [1, 14, 15]. It is utilized in power flow calculations that is considered the multi-

Received: June 7, 2022. Revised: July 1, 2022.

393

conductor and single-train systems. The rectifier traction substation is modeled by Norton's equivalent circuit as shown in Fig. 2, which the solution is calculated in Eq. (10) and Eq. (11).

$$I_{ss,j} + \frac{P_{train}}{V_{train}} = \sum_{k=1}^{NS} G_{k,ji} V_i \quad (10)$$

$$[I] = [G][V] \quad (11)$$

The bus conductance matrix G in DC system can be used to express the bus admittance matrix Y in AC system. The matrix G consists of the resistance of conductors and rail.

The energy conservation law can describe the total energy in the based case as in Eq. (12), in which the braking power of the train is disposed of the waste energy expressed in Eq. (13). The distribution energy has some power supplied from on-board device in the case study calculated in Eq. (14). In this case some of the regenerative energy is capable to store in the on-board energy storage device as in Eq. (15). The waste energy will be reduced by stored in energy storage.

Based case: Without on-board energy storage,

$$\sum_{i=1}^{NS} E_{sub,i} = E_{train} + \sum_{i=1}^{NS} E_{loss,i} \quad (12)$$

$$E_{waste} = E_{train}, a < 0 \quad (13)$$

Case study: With on-board energy storage,

$$\sum_{i=1}^{NS} E_{sub,i} = (E_{train} - E_{discharge}) + \sum_{i=1}^{NS} E_{loss,i} \quad (14)$$

$$E_{waste} = E_{train} - E_{charge}, a < 0 \quad (15)$$

2.3 Piece-wise linear state of charge (SOC) control

The state of charge control in this paper, as a relationship between the voltage deviation of the on-

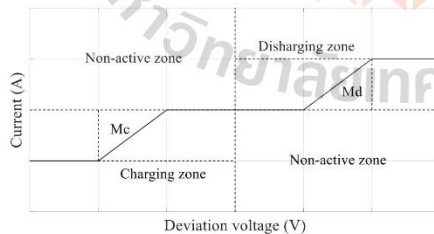


Figure. 3 The characteristic of the piece-wise linear state of charge control

board and the current of the energy storage shown in Fig. 3.

The difference between the train's voltage and energy storage voltage is the voltage deviation as in Eq. (16). A piece-wise linear function with five zones has this property. Active on-board energy storage is divided into two zones, whereas non-active energy storage is divided into three zones. The active zone is defined by the voltage deviation's minimum and maximum values. As a result, the on-board energy storage is activated when the voltage deviation is positive exceeding the minimum discharge voltage deviation. The on-board energy storage current increases linearly with slope Md larger value of voltage deviation until the device's maximum current is reached as in Eqs. (17-19). When the voltage deviation is negative and exceeding the minimum charge voltage deviation, the energy storage has been recharged. Until the device's maximum current is reached, the current increases linearly with slope Mc as shown in Eqs. (20-22). When the current is not in the above conditions, the on-board device will not work as in Eq. (23) [13].

$$\Delta V = V_{train} - V_{sc} \quad (16)$$

The characteristic can be described as follows.

Discharging zone: the current is positive, If $\Delta V \geq \Delta V_{d,min}$

$$I_{sc} = Md(\Delta V - \Delta V_{d,min}) \quad (17)$$

$$Md = \frac{I_{sc,max}}{(\Delta V_{d,min,max})} \quad (18)$$

else if $\Delta V \geq \Delta V_{d,max}$

$$I_{sc} = I_{sc,max} \quad (19)$$

Charging zone: the current is negative, If $\Delta V \leq \Delta V_{c,min}$

$$I_{sc} = Mc(\Delta V - \Delta V_{c,min}) \quad (20)$$

$$Mc = \frac{I_{sc,max}}{(\Delta V_{c,min,max})} \quad (21)$$

else if $\Delta V \leq \Delta V_{c,max}$

$$I_{sc} = I_{sc,max} \quad (22)$$

Non-activated zone: the current is zero, If $\Delta V \leq \Delta V_{c,min}$

Received: June 7, 2022. Revised: July 1, 2022.

394

$$I_{sc} = 0 \tag{23}$$

3. Problem formulation

3.1 Optimization problem

When the train leaves the passenger station, it must use a large amount of power from the traction substation powering it's to achieve the operating speed. The power supplied via the conductor rail to the train has some loss depending on the distance between the traction substation and the train. If the train is located far from the traction substation and uses power for accelerating speed, the traction substation is heavily burdened to supply power. This paper studies about reducing energy distribution from the traction substation by installing an on-board supercapacitor and operating by state of charge control with the piece-wise linear method. The objective function can be expressed as follows:

$$\text{Minimize: } OF = \sum_{i=1}^{NS} E_{sub,i} \tag{24}$$

Where,

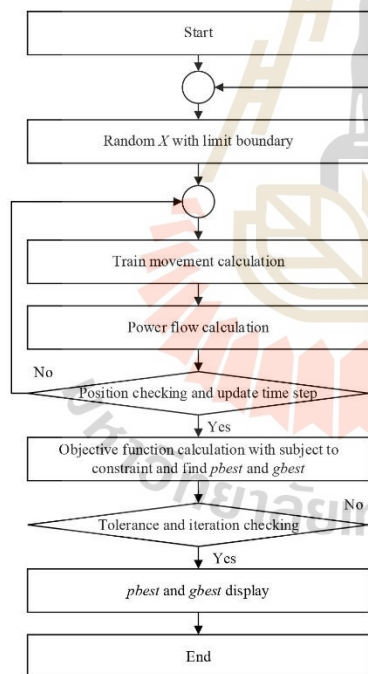


Figure. 4 Flow chart of PSO

$$\sum_{i=1}^{NS} E_{sub,i} = \sum_{dt=0.5}^{NT} \sum_{i=1}^{NS} (P_{sub,dt,i}) \tag{25}$$

$$\sum_{dt=0.5}^{NT} \sum_{i=1}^{NS} P_{sub,dt,i} = \sum_{dt=0.5}^{NT} (P_{train,dt} + P_{sc,dt}) + \sum_{i=1}^{NS} P_{loss,dt,i} \tag{26}$$

$$P_{sc} = I_{sc} V_{sc} \tag{27}$$

$$I_{sc} = \begin{cases} Mc(\Delta V - \Delta V_{c,min}) & , \Delta V_{c,min} < \Delta V < \Delta V_{c,max} \\ Md(\Delta V - \Delta V_{d,min}) & , \Delta V_{d,min} < \Delta V < \Delta V_{d,max} \\ 0 & , \Delta V_{c,min} < \Delta V < \Delta V_{d,min} \end{cases} \tag{28}$$

Subject to the constraint,

$$SOC_{end} = 100 \tag{29}$$

The coordination constraint,

$$0 < \Delta V d, max_{d,min} \tag{30}$$

The operation train constraint,

$$s \geq s_{NP} \tag{31}$$

$$v = v_{lim it, NP} \tag{32}$$

3.2 Particle swarm optimization technique

Particle swarm optimization (PSO) technique is a well-known method of optimization. One of the strategies for achieving results quickly is to use the work of particles in the dispersion to identify the best value [16-18]. The PSO approach is utilized in this paper to optimize the minimum discharge deviation voltage to manage the energy storage operation, which uses on-board energy storage to reduce the train's power consumption. The proposed technique computation is shown step by step in Fig. 4.

Step 1: Random initial position of the population matrix (X) within the limited boundary in Eq. (30) with 50 swarm size.

$$X = [\Delta V d, max_{d,min}] \tag{33}$$

Step 2: Calculate the train movement and power flow to achieve the power consumption, which the power consumption has been adjusted by power discharge from energy storage by substitute X from Eq. (33) in Eqs. (26-28).

Step 3: Repeat step 2 with an update time step every 0.5 seconds, checking the train's position using the constraint in Eq. (31).

Received: June 7, 2022. Revised: July 1, 2022.

395

Step 4: Solve the objective function from Eq. (24) subject to the constraint in Eqs. (29-32).

Step 5: Find the p_{best} that is the particle best and g_{best} is the global best of the objective function.

Step 6: Repeat steps 2-5 until the tolerance is less than 10^{-2} or the iteration reach to maximum.

The optimization approach is performed in MATLAB on the computer specification of Intel Core i5-10300H, NVIDIA GeForce GTX 1650 and Ram 8 GB DDR4 Bus 2933 MHz.

4. Procedures and system parameters

The case study of the Mass rapid transit Purple Line in Bangkok, Thailand was provided in this paper. With a total distance of 21 km between the first and last passenger stations, Khlong Bang Phai station and Tao Poon station, the line has a total passenger station of 16 and is powered by 750 V DC via its third rail [15, 16]. MATLAB was also used for simulation in this paper. The scenario of the simulation has been separated into two parts: the based case and the case study. MRT Purple Line in Bangkok, Thailand, has been used as a based case for the simulation. Regenerative power from train braking mode for a stop at a passenger station is waste power in the based case simulation without on-board energy storage. Some ways not listed will be used to dispose of such power. As a results as based case, the distribution of energy is calculated in Eq. (12). Besides, the regenerative energy is wasted during train braking expressed as in Eq. (13). In another case of case study,

Table 1. Traction substation parameter

Parameter	Value	Unit
short-circuit capacity	50	MW
no-load voltage	750	V
contact resistance	7.00	mΩ/km
rail resistance	17.50	mΩ/km
earth resistance	0.10	S/km

Table 2. Train parameter

Parameter	Value	Unit
Max. speed	80	km/h
Mass	153	ton
Payload mass	75	ton
Acceleration	1.20	m/s ²
Deceleration	0.90	m/s ²
Max. tractive effort	228.80	kN
Max. braking effort	168.80	kN
power auxiliary	270	kW
Eff. motor/inverter	0.86	-

Table 3. On-board supercapacitor parameter

Parameter	Value	Unit
Mass	2.13	ton
Max. voltage	765	V
Min. voltage	705	V
Max. current	1000	A
Min. current	0	A
Energy storage	7.95	kWh
Resistance	0.9	mΩ
Eff.	0.90	-

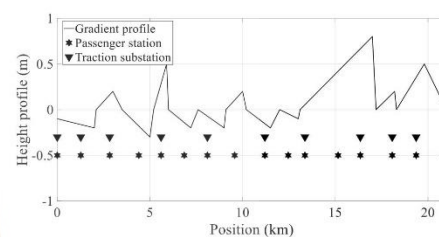


Figure. 5 Gradient profile

while the train is moving from the passenger station, the on-board equipment can supply power as following in Eq. (14). Consequently, the regenerative power is also capable of being stored in on-board energy storage, then the waste energy can be calculated in Eq. (15). The behaviour of the device in the case study is based on the piece-wise linear control described above.

Tables 1 and 2 shows the traction substation and the train parameters of the MRT Purple Line. Trains have supercapacitors installed on-board. To operate with the train, the connection configuration of the supercapacitor modules would be 15 in series and 10 in parallel. The on-board supercapacitor parameter is shown in Table 3. Fig. 5 depicts the station's position as well as the gradient of the running route [19].

5. Simulation results and discussions

The simulation result performs with a single-train simulation of MRT Purple Line in MATLAB. The train would make a 25-second stop at the passenger station. The train's speed profile is determined by the service timetable [19], which may be seen on the website. Each section of the transfer passenger to the next station takes around 2 minutes to complete. The only passenger stations with a maximum transfer duration of 4 minutes are those from Nonthaburi Civic Center station to the Ministry of Public Health station. The train's speed profile is set as shown in the Fig 6.

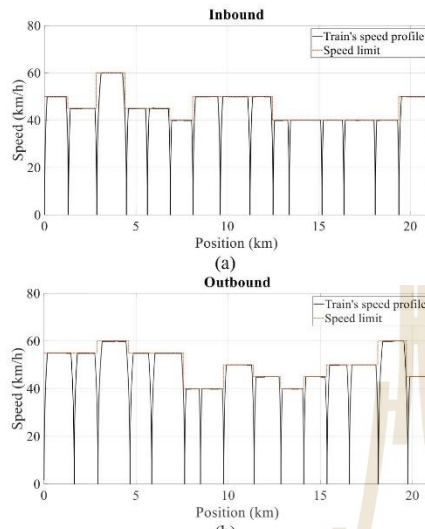


Figure 6. Train's speed profile, (a) Inbound, (b) Outbound

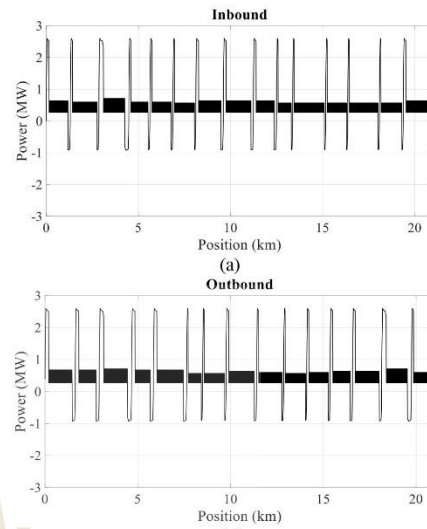


Figure 7. Train's power profile, (a) Inbound, (b) Outbound

The train started its traveling from the first passenger station at Khlong Bang Phai station to Tao Poon station on the inbound route. After that, the train will start traveling again from Tao Poon station back to Khlong Bang Phai station on the outbound route. Throughout the train journey, power is consumed from the traction substation only in the based case as shown in Fig. 7. Therefore, power has a high rate of use. In which in the study case, on-board energy storage is installed to reduce power consumption in travelling.

The piece-wise linear state of charge approach previously described is used to regulate the on-board energy storage performance. The voltage deviation's boundary shown in Table 4. The maximum and minimum deviations are determined using the voltage difference from Eq. (16). The maximum discharge value is obtained by lowering the minimum train voltage difference from the maximum on-board device voltage. The X is the minimum discharge voltage calculated from Eq. (33). The difference between the maximum train voltage and the lowest on-board device voltage is used to obtain the maximum charge value. The minimum deviation of the charge is set to zero. The on-board device's activity is immediate when the voltage difference occurs.

The constraint in Eq. (30) is to find the deviation of the discharge to discharge, based on the conditions

Table 4. Deviation voltage

Parameter	Value	Unit
Max. discharge voltage	91	V
Min. discharge voltage	X	V
Max. charge voltage	78	V
Min. charge voltage	0	V

Table 5. Best value from PSO

Case	X [V]	E_{sub} [kWh]
Initial SOC 100%	58.49	644.05
Initial SOC 70%	28.13	638.33
Initial SOC 50%	48.6	643.27
Initial SOC 0%	57.8	645.00

in Eq. (29). At the destination, the SOC must be full in 100 %. The PSO optimization in simulation is divided into four case studies based on suitability. They are divided into simulations of the initial SOC of 100 %, 70 %, 50 % and 0 %. From the simulation results, four different discharging deviation values are obtained as shown in Table 5.

The correlation can be seen in Fig. 8 through the SOC curve, which is based on the results collected. It can be shown that when calculated using the optimization approach, it performs better in the range of the SOC percentage of approximately 70 %. Because discharge may be done cautiously at 100 %

Received: June 7, 2022. Revised: July 1, 2022.

397

Table 6. Simulation results

Case	E_{train} [kWh]	E_{sub} [kWh]	Saving [%]	E_{loss} [kWh]	Saving [%]	E_{waste} [kWh]	Saving [%]
Based	661.16	665.64	-	4.48	-	85.34	-
Initial SOC 100%	661.16	648.29	2.61	4.24	5.57	77.67	8.99
Initial SOC 70%	661.16	642.40	3.49	4.07	9.21	68.81	19.37
Initial SOC 50%	661.16	647.49	2.73	4.22	5.93	72.61	14.92
Initial SOC 0%	661.16	649.28	2.46	4.28	4.55	71.43	16.30

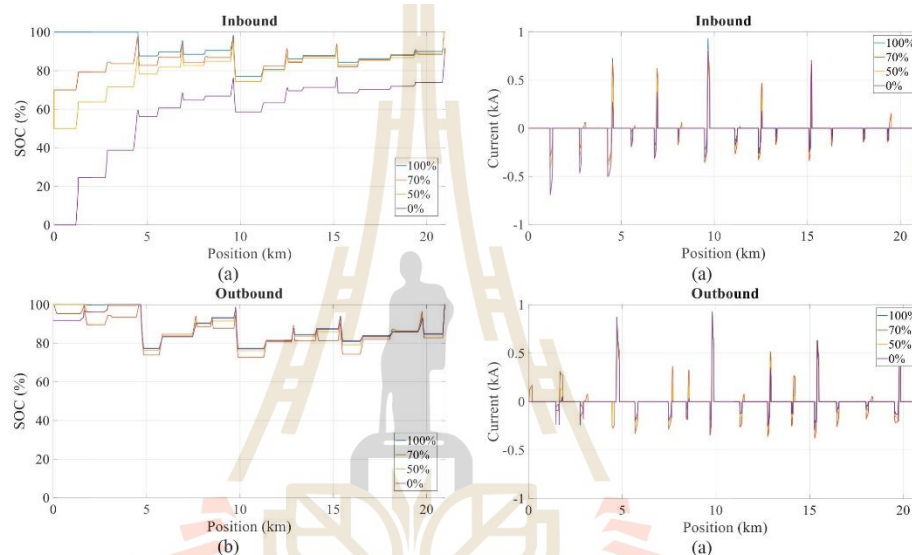


Figure 8. State of charge curve, (a) Inbound, (b) Outbound

Figure 9. Current of supercapacitor, (a) Inbound, (b) Outbound.

initial with the condition that the SOC endpoint must be full. Whereas, with 50 % and 0 % initial charge, it's essential to be fully charged at the destination, therefore, there's only a small amount of discharge along the way. Instead, the range of 70 % provides a very flexible range that may be fully charged at the destination during braking.

Fig. 9. depicts the thoughts and actions of the devices in each case. The discharge current is on the positive side. On the other hand, the charge current is the negative current. The results show that the train's location during the route is at the four, six, eight, ten, and twelve passenger stations, which are passenger stations without a traction substation established. Resulting in a significant voltage variation in the train depending on the usage characteristics, the discharge

and charge currents are relatively high.

According to the simulation results, total energy consumption by the train's is 661.16 kWh. As shown in Table 6. The energy of traction substation consists of energy feeding in a conductor to the train and energy loss in the conductor. In the case study, energy traction substations can be saved by 2.61 %, 3.49 %, 2.73 % and 2.46 %, respectively, while energy waste can be saved by 8.99 %, 19.37 %, 14.92 % and 16.30 %. At the same time, the energy loss generated in the conductor may be slightly reduced, in which case the initial SOC 70 % is the case with the largest 10 % reduction in energy loss.

6. Conclusion

This paper proposes the use of on-board

Received: June 7, 2022. Revised: July 1, 2022.

398

supercapacitors to mitigate energy distribution and losses in a multi-conductor system of the MRT Purple Line in Bangkok, Thailand. Piece-wise linear SOC control and optimal energy distribution by constraint SOC and deviation minimum discharge voltage of on-board supercapacitor is proposed in case study. As a result, the simulations in all of the presented cases show that in the case of a 70% initial SOC. The best energy traction substation reduction rate is approximately 3.5%, reducing energy loss by 10%. In addition, it can be recharged from braking energy to the device, reducing energy waste by up to 20%. However, the sizes of the supercapacitors used in the paper are solely chosen based on experience. If the right size is found, the better the results will be. Which will be solved in the further work.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

Author contributions

Conceptualization, K. Chatwongtong and T. Ratniyomchai; methodology, K. Chatwongtong and T. Ratniyomchai; software, K. Chatwongtong; validation, T. Ratniyomchai; formal analysis, K. Chatwongtong and T. Ratniyomchai; investigation, T. Ratniyomchai; writing—original draft preparation, K. Chatwongtong; writing—review and editing, T. Ratniyomchai; supervision, T. Ratniyomchai.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the financial to support this work and Research ID: 2536975 from (i) Suranaree University of Technology (SUT), (ii) Thailand Science Research and Innovation (TSRI), and (iii) National Science, Research and Innovation Fund (NSRF).

References

- [1] T. Kulworawanichpong, "Multi-train modelling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method", *Journal of Modern Transportation*, Vol. 23, No. 4, pp. 241-251, 2015.
- [2] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen, and P. Tricoli, "Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways", *Journal of IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 4, No. 1, pp. 9-20, 2014.
- [3] C. Sumpavakup, S. Suwannakijborihan, T. Ratniyomchai, and T. Kulworawanichpong, "Peak demand cutting strategy with an on-board energy storage system in mass rapid transit", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, Vol. 42, pp. 49-62, 2018.
- [4] L. Grigans and L. Latkovskis, "Study of control strategies for energy storage system on board of urban electric vehicles". In: *Proc. of 14th International Power Electronics and Motion Control Conf. EPE-PEMC*, Ohrid, Macedonia, pp. T9-34-T9-38, 2010.
- [5] P. V. Radu, A. Szelag, and M. Steczek, "On-board energy storage devices with supercapacitors for metro trains-case study analysis of application effectiveness", *Journals of Energies*, Vol. 12, No. 7, pp. 1-22, 2019.
- [6] V. A. Kleftakis and N. D. Hatzigiorgiou, "Optimal control of reversible substations and wayside storage devices for voltage stabilization and energy savings in metro railway networks", *IEEE Tran. on Transportation Electrification*, Vol. 5, No. 2, pp. 515-523, 2019.
- [7] C. Sumpavakup and T. Kulworawanichpong, "Multi-train movement simulation using MATLAB object-oriented programming", *Journal of Applied Mechanics and Materials*, Vol. 763, pp. 153-158, 2015.
- [8] D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Metro trains equipped onboard with supercapacitors: A control technique for energy saving", In: *Proc. of SPEEDAM 2010*, Pisa, Italy, pp. 750-756, 2010.
- [9] K. Zhao, X. Wang, Z. Yang, and X. You, "Study and simulation of on-board energy saving system with electric double layer capacitor of railway vehicle", In: *Proc. of 2010 International Con. on Computer Application and System Modelling (ICCASM 2010)*, Taiyuan, China, pp. V15-336-V15-339, 2010.
- [10] Gonzalez - Gil, A., Palacin, R. and Batty, P. "Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy", *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 75, pp. 374-388, 2013.
- [11] P. Sharma and T. S. Bhatti, "A review on electrochemical double-layer capacitors", *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 12, pp. 2901-2912, 2010.
- [12] RSSB, *Research Programme, Engineering, phase 2: OHL electrification gaps*, Energy storage systems for railway application, 2010.
- [13] T. Ratniyomchai, "Optimal design and control of stationary electrochemical double-layer capacitors for light railways", *Ph.D. Thesis, International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, Vol. 15, No. 5, 2022 DOI: 10.22266/ijies2022.1031.34

Received: June 7, 2022. Revised: July 1, 2022.

399

School of Engineering, The University of Birmingham, UK, 2016.

- [14] K. Chatwong, T. Kulworawanichpong, and T. Ratniyonchai, "Energy Saving with On-board Supercapacitors in MRT Purple Line, Bangkok", In: *Proc. of 2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, Nakhon Ratchasima, Thailand, pp. 77-80, 2021.
- [15] T. Chuchit. "Study and assessment of stray current in DC rapid transit system", *Ph.D. Thesis, School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand, 2018.*
- [16] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", In: *Proc. of ICNN'95-International Conf. on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, pp. 1942-1948, 1995.
- [17] T. F. Yu and C. H. Peng, "Application of an improved Particle Swarm Optimization to economic load dispatch in power plant", In: *Proc. of 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*, Chengdu, China, pp. V2-619 – V2-624, 2010.
- [18] Y. D. Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J. C. Hernandez, and R. G. Harley, "Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems", *IEEE Tran. on Evolutionary Computation*, Vol. 12, No. 2, pp. 171-195, 2008.
- [19] MRT Purple Line [online], Available: <https://metro.bemplc.co.th> [accessed 25 April 2022].

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายกฤษณ นัตรวงศ์ทอง เกิดเมื่อวันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2541 ที่อำเภอบึงสามพัน จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับ 2 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2562 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2563 โดยในขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้เป็นผู้สอนรายวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลงานตีพิมพ์ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ข



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี