

การวิเคราะห์ การจำลองผล และการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง  
สำหรับรถไฟฟ้าอัตโนมัติไร้คนขับ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2563

**ANALYSIS, SIMULATION AND DESIGN OF POWER  
SUPPLY SYSTEM FOR AUTOMATED PEOPLE MOVER**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Doctoral of Philosophy in Electrical Engineering**


**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2020**

การวิเคราะห์ การจำลองผล และการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง  
สำหรับรถไฟฟ้าอัตโนมัติไร้คนขับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.ชนัดชัย กุลสุวรรณิชพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.เกียรติ ชยะกุลศิริ)

กรรมการ



(ผศ. ดร.อุเทน ลีตน)

กรรมการ



(อ. ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จิระพงษ์ ศรีวิชัย : การวิเคราะห์ การจำลองผล และการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง  
สำหรับรถไฟฟ้าอัตโนมัติไร้คนขับ (ANALYSIS, SIMULATION AND DESIGN OF  
POWER SUPPLY SYSTEM FOR AUTOMATED PEOPLE MOVER)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุศลรวานิชพงษ์, 198 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้า  
อัตโนมัติไร้คนขับหรือรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (Automation People Mover : APM) โดยพัฒนาโปรแกรม  
จำลองผลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มจากการคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม  
ด้วยชุดคำสั่งโปรแกรมเมทแลป แล้วส่งค่ากำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าเอพีเอ็มใช้ขับเคลื่อนและตำแหน่ง  
ที่รถไฟฟ้าเอพีเอ็มเคลื่อนที่ไปทดสอบกับวงจรจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ถูกสร้างผ่าน  
ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับซิมมูลิงก์ใน โปรแกรมเมทแลป เพื่อคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า  
จากนั้นได้สร้างต้นแบบระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม โดยมีสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่มีหม้อแปลงหนึ่งเฟส  
ลดระดับแรงดัน 22 kV เป็น 56 V ป้อนผ่านระบบรางตัวนำที่ติดตั้งไปกับเส้นทางวิ่งเป็นระยะทาง  
200 m และรับกระแสไฟฟ้าจากระบบรางตัวนำด้วยตัวสัมผัสเคลื่อนที่ (Sliding Contact) เข้าสู่ระบบ  
ขับเคลื่อนไฟฟ้าของพาหนะแบบล้ออย่าง ทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็มขับเคลื่อน  
ทำงานในลักษณะเคลื่อนที่ไปและกลับด้วยความเร็วสูงสุด 23 km/h ผลการศึกษาพบว่า ระดับ  
แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด 41.753 V จากแรงดันไฟฟ้าปกติ 56.141 V และเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้า  
ตกสูงสุดเป็น 25.525 % ยืนยันผลของแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบจริงเทียบกับผลจำลอง  
ทางคอมพิวเตอร์พบว่า ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดและค่าเฉลี่ย  
เป็น 13 % และ 5.5 % ตามลำดับ ซึ่งถือว่าโปรแกรมจำลองผลที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องแม่นยำ  
ที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ยังได้เสนอแนวทางการแก้ปัญหาทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสม  
ซึ่งงานวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สามารถนำไปใช้ได้จริงในการออกแบบสร้างระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม  
ในอนาคตต่อไป

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา   
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 



JEERAPONG SRIVICHAI : ANALYSIS, SIMULATION AND DESIGN OF  
POWER SUPPLY SYSTEM FOR AUTOMATED PEOPLE MOVER.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THANATCHAI

KULWORAWANICHPONG, Ph.D. 198 PP.

TRACTION POWER SUPPLY/AUTOMATED PEOPLE MOVER/AUTOMATED  
GUIDEWAY TRANSIT/VOLTAGE DROP

The objective of this thesis is to present the design of the power supply system for an automated people mover (APM) and develop a program to simulate the APM system from calculating the performance and movement of APM, using the MATLAB script. The tractive power of APM and its position were sent to the electric propulsion simulation model using a set of power blocks in MATLAB Simulink for power flow calculation. A prototype of the APM system was constructed, which contains one traction substation with a single-phase transformer (stepping the voltage down from 22 kV to 56 V), a conductor rail system installed along the 200-metre running track, and the rubber-wheeled vehicle receiving electric power through a sliding contact. The prototype vehicle making a round trip at a maximum speed of 23 km/h was tested on the power supply system prototype for the APM. The study found that the minimum voltage level was 41.753 V from the normal voltage of 56.1471 V and the percentage of the maximum voltage drop was 25.525%. The voltage result was verified by comparing actual prototype test result with the computer simulation result. The simulation result had the maximum and mean tolerances of 13% and 5.5%, respectively, which is assumed that the simulation program developed has acceptable accuracy. In addition,

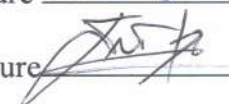
the study also proposed appropriate solutions to the resulting electrical problems.  
 This thesis work can be used in the future design and construction of the APM system.



School of Electrical Engineering

Academic year 2020

Student's Signature 

Advisor's Signature 

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลวรวานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์ รวมถึงได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจและเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและกำลังใจอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุรชัย วงษ์ฟูเกียรติ และรวมถึงบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ แลกเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ครู อาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้วิชาการด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และสนับสนุนทางการศึกษาต่อเนื่องอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบผลสำเร็จในชีวิตตลอดมา

จิระพงศ์ ศรีวิชัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
<b>2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2.1 ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม.....	4
2.2.2 ข้อมูลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มแต่ละบริษัทผู้ผลิต.....	7
2.3 สรุป.....	15
<b>3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>16</b>
3.1 บทนำ.....	16
3.2 ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม.....	16
3.2.1 ความเป็นมาของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม.....	16
3.2.2 องค์ประกอบของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มของต่างประเทศ .....	22
3.3.1	ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในประเทศฝรั่งเศส .....	22
3.3.2	ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในประเทศญี่ปุ่น .....	25
3.4	การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในประเทศไทย .....	30
3.4.1	โครงการพัฒนาท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ .....	30
3.4.2	โครงการระบบขนส่งมวลชนขนาดรองสายสีทอง .....	32
3.5	หลักการของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน .....	34
3.5.1	ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าทั่วโลก .....	35
3.5.2	กรอบโครงสร้างมาตรฐานด้านระบบไฟฟ้า .....	36
3.5.3	ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม .....	39
3.5.4	การหาระยะห่างระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน .....	40
3.6	การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน .....	41
3.7	ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า .....	43
3.7.1	หลักการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า .....	43
3.7.2	การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	58
3.8	สรุป .....	66
4	แบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม .....	67
4.1	บทนำ .....	67
4.2	แบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน .....	67
4.2.1	การวิเคราะห์เชิงเส้นของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้า .....	67
4.2.2	การวิเคราะห์ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับ .....	70
4.2.3	การหาผลเฉลยด้วยวิธีลำดับเชิงเส้น .....	77
4.3	การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า .....	79
4.3.1	แบบจำลองระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า .....	79
4.3.2	การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน .....	83
4.4	โปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม .....	85
4.4.1	ระบบทดสอบ .....	86



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2	เงื่อนไขระบบทดสอบ .....	86
4.4.3	การทำงานของโปรแกรมจำลองผล .....	87
4.4.4	วงจรจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง .....	88
4.4.5	วงจรจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ .....	93
4.5	ผลการจำลองและประเมินระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้า เอพีเอ็ม.....	98
4.5.1	ผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม .....	98
4.5.2	ผลจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง .....	99
4.5.3	ผลจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ .....	102
4.6	การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม.....	104
4.7	สรุป .....	106
5	การออกแบบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม .....	107
5.1	บทนำ.....	107
5.2	การออกแบบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าต้นแบบสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม .....	107
5.2.1	สมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม .....	108
5.2.2	สมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม.....	109
5.2.3	การออกแบบระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนต้นแบบ.....	115
5.3	ระบบรางตัวนำไฟฟ้า.....	120
5.4	การออกแบบการต่อลงดินของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	121
5.5	สรุป .....	122
6	การทดสอบและประเมินผล .....	123
6.1	บทนำ.....	123
6.2	การทดสอบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนให้กับรถไฟฟ้าตัวอย่าง.....	123
6.2.1	ระบบทดสอบ .....	123
6.2.2	ต้นแบบระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม .....	124
6.2.3	อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	126

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

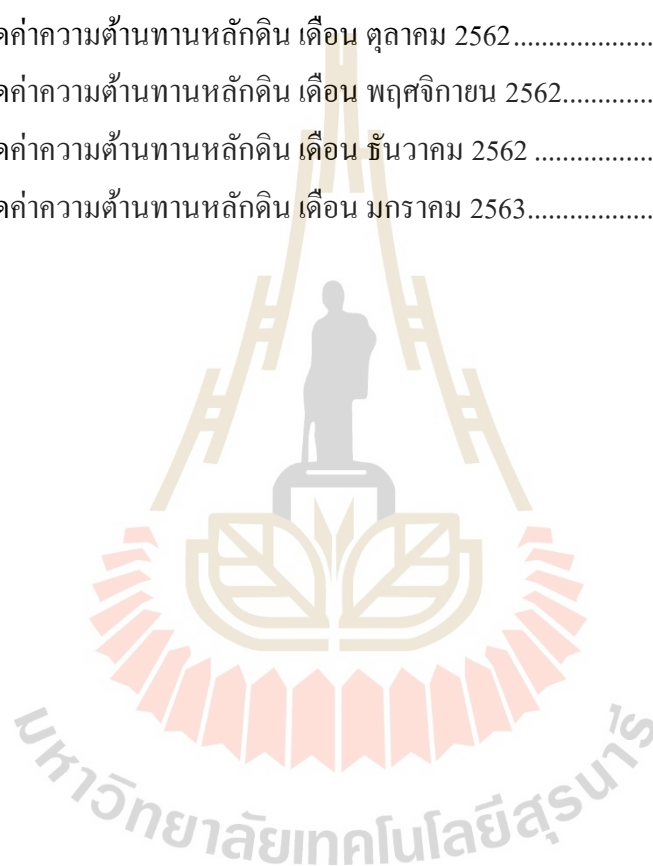
6.2.4	วิธีการทดสอบ.....	127
6.2.5	ข้อมูลจากการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า.....	127
6.2.6	ผลการบันทึกวัดค่าทางไฟฟ้า.....	129
6.3	ยืนยันผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าเทียบกับผลการทดสอบจริง.....	134
6.3.1	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม .....	134
6.3.2	ผลการจำลอง.....	139
6.3.3	ยืนยันการจำลองผลของแรงดันไฟฟ้าเทียบกับผลวัดจริง .....	142
6.4	แนวทางการแก้ปัญหาทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น .....	145
6.5	สรุป .....	146
7	สรุปและข้อเสนอแนะ .....	148
7.1	สรุป .....	148
7.2	ข้อเสนอแนะ .....	149
	รายการอ้างอิง .....	150
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. แบบโครงสร้างทางวิ่งของพาหนะ .....	152
	ภาคผนวก ข. ข้อมูลจำเพาะของรางตัวนำไฟฟ้า.....	159
	ภาคผนวก ค. แบบโครงสร้างและระบบขึ้นทางไฟฟ้า .....	166
	ภาคผนวก ง. ผลการทดสอบระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน.....	171
	ภาคผนวก จ. ผลการวัดค่าความต้านทานดิน .....	180
	ภาคผนวก ฉ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	187
	ประวัติผู้เขียน .....	198

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปข้อมูลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม .....8
2.2	การสำรวจระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม.....9
3.1	ข้อมูลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในประเทศไทยปัจจุบัน .....27
3.2	สถานีรับส่งผู้โดยสารของโครงการระบบขนส่งมวลชนขนาดรองสายสีทอง .....32
3.3	ระบบการป้อนไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าวิ่งตามระยะทางของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก .....36
3.4	กรอบโครงสร้างมาตรฐานระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน .....37
3.5	กรอบโครงสร้างมาตรฐานระบบรางตัวนำ.....38
4.1	เงื่อนไขระบบทดสอบ .....87
4.2	ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง .....89
4.3	ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ .....94
4.4	สรุปผลจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนทั้ง 2 ระบบ.....104
5.1	ข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคของรถไฟฟ้า.....109
5.2	พารามิเตอร์.....113
5.3	ข้อกำหนดของรถไฟฟ้าและการเคลื่อนที่ .....116
5.4	พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน.....120
6.1	ข้อมูลทางเทคนิคของรถไฟฟ้า .....125
6.2	รายละเอียดอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับใช้วัดและเก็บข้อมูลต่าง ๆ .....126
6.3	ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์.....137
6.4	ผลประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง .....143
ข.1	รายละเอียดของ Steel Copperhead Conductor Bar and Accessories .....162
ข.2	รายละเอียดของ Expansion Joint.....162
ข.3	รายละเอียดของ Rigid Joint.....163
ข.4	รายละเอียดของ Feeder Clamps .....163
ค.1	ข้อมูลทางเทคนิคของระบบขับเคลื่อนของพาหนะ .....169
ง.1	ผลของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ขณะเคลื่อนที่จากต้นทางไปยังปลายทาง .....172

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.2 ผลของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ขณะเคลื่อนที่จากปลายทางไปยังต้นทาง .....	174
ง.3 ผลของกำลังไฟฟ้า ขณะเคลื่อนที่จากต้นทางไปยังปลายทาง.....	176
ง.4 ผลของกำลังไฟฟ้า ขณะเคลื่อนที่จากปลายทางไปยังต้นทาง .....	178
จ.1 ผลการวัดค่าความต้านทานหลักดิน เดือน ตุลาคม 2562.....	182
จ.2 ผลการวัดค่าความต้านทานหลักดิน เดือน พฤศจิกายน 2562.....	183
จ.3 ผลการวัดค่าความต้านทานหลักดิน เดือน ธันวาคม 2562 .....	184
จ.4 ผลการวัดค่าความต้านทานหลักดิน เดือน มกราคม 2563.....	185



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะรถไฟฟ้าเอพีเอ็มของแต่ละผู้ผลิต ..... 7
3.1	ระบบรถรางไร้การหยุด ..... 17
3.2	ระบบคาร์เวย์อร์ ..... 17
3.3	ระบบรถไฟลอยฟ้า ..... 18
3.4	ตัวอย่างลักษณะตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ..... 19
3.5	การติดตั้งรางบังคับนำทางและรางตัวนำจ่ายไฟของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ..... 20
3.6	การควบคุมและติดต่อสื่อสาร ..... 21
3.7	ต้นแบบทางวิ่งทดสอบรถไฟฟ้าอัตโนมัติ VAL ในเมืองลิลล์ ฝรั่งเศส ..... 23
3.8	ทดสอบต้นแบบระบบรถไฟฟ้าอัตโนมัติ VAL และสถานี ณ เมืองลิลล์ ฝรั่งเศส ..... 23
3.9	โครงข่ายรถไฟฟ้าใต้ดินในเมืองลิลล์ ..... 24
3.10	ระบบบังคับนำทาง ..... 26
3.11	ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มบริการตามเส้นทางเดินรถต่าง ๆ ของประเทศญี่ปุ่น ..... 26
3.12	รถไฟฟ้าเอพีเอ็ม รุ่นแอร์เวล จากบริษัทซีเมนส์ ..... 30
3.13	แผนผังทางวิ่งระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ..... 31
3.14	แนวเส้นทาง โครงการและตำแหน่งของสถานี ..... 33
3.15	(ก) ระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสป้อนให้กับอิมพีแดนซ์ และ (ข) แผนภาพเฟสเซอร์ ..... 42
3.16	โครงสร้างการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า ..... 43
3.17	วงจรแปลงผันจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยไดโอด ..... 44
3.18	วงจรแปลงผันจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงด้วยไทรสเตอร์ ..... 46
3.19	วงจรแปลงแปลงผันไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์หยุดนำกระแสด้วยตัวเอง ..... 46
3.20	วงจรอินเวอร์เตอร์กำลัง ..... 47
3.21	วงจรสับไฟฟ้า ..... 47
3.22	วงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ ..... 48
3.23	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วยาน ..... 48
3.24	ย่านการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า ..... 50



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 การควบคุมขีดจำกัดกระแสไฟฟ้า .....	50
3.26 การควบคุมแรงบิดแบบวงรอบปิด .....	51
3.27 การควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิด.....	51
3.28 การควบคุมความเร็วรอบด้วยเฟสล็อกกลุ๊ป .....	52
3.29 การควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับ.....	52
3.30 ลักษณะสมบัติการให้ความร้อนและการเย็นตัวของมอเตอร์ .....	55
3.31 การขับโหลดรูปแบบต่าง ๆ ของมอเตอร์.....	56
3.32 กระแสโหลดของมอเตอร์.....	57
3.33 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	59
3.34 ลักษณะสมบัติการควบคุมแหล่งจ่ายปรับความถี่ได้.....	61
3.35 การควบคุมแหล่งจ่ายแบบปรับความถี่ได้.....	62
3.36 ช่วงการทำงานของ การควบคุมแหล่งจ่ายแบบปรับความถี่ได้ .....	63
3.37 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ .....	64
3.38 โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันรูปแบบต่าง ๆ.....	64
3.39 การเบรกสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันรูปแบบต่าง ๆ .....	66
4.1 แบบจำลองเชิงเส้นที่พิจารณาผลของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่รางตัวนำ.....	68
4.2 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบรถไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายสองด้าน .....	70
4.3 แบบจำลองหนึ่งเฟสสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับ.....	71
4.4 แบบจำลองสถานีจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับรถไฟฟ้า.....	72
4.5 แบบจำลองสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต่อหม้อแปลงหนึ่งเฟส .....	72
4.6 ระบบรางตัวนำจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียว .....	72
4.7 รางตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	75
4.8 วงจรเทียบเคียงระบบตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้า .....	76
4.9 แบบจำลองรถไฟฟ้ากระแสสลับ.....	77
4.10 ลักษณะสมบัติแรงจลน์รถไฟฟ้ากับเส้นโค้งแรงบิดและความเร็วรอบ .....	79

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า .....	80
4.12 แผนภาพการควบคุมความเร็วของขบวนรถไฟแบบฮิสเตอร์ซิส .....	84
4.13 แผนภาพการควบคุมความเร็วของขบวนรถไฟฟ้าแบบสัดส่วน .....	85
4.14 ผังระบบทดสอบ .....	86
4.15 ผังลำดับการทำงานของโปรแกรมจำลองผล.....	88
4.16 วงจรสมมุติระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม.....	88
4.17 วงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ และรูปคลื่น.....	90
4.18 วงจรจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงบนซิมมูลิงก์ของโปรแกรม แมทแลป .....	91
4.19 วงจรสมมุติระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน 3 เฟส สำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม .....	93
4.20 การจำลองผลของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ 3 เฟส .....	95
4.21 ระดับความชันของเส้นทางวิ่ง.....	99
4.22 ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม.....	99
4.23 ตำแหน่งจุดวัดทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง .....	100
4.24 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าและแรงจลน์ กรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง .....	100
4.25 เบอร์เซนต์แรงดันไฟฟ้ากรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง .....	101
4.26 กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย กรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสตรง .....	101
4.27 พลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนและพลังงานสูญเสีย กรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสตรง .....	101
4.28 ตำแหน่งจุดวัดทดสอบทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ .....	102
4.29 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าและแรงจลน์ กรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ .....	102
4.30 เบอร์เซนต์แรงดันไฟฟ้า กรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ .....	103
4.31 กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนและกำลังไฟฟ้าสูญเสียกรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสสลับ .....	103

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32	พลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนและพลังงานสูญเสีย กรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสสลับ ..... 104
4.33	ผลจำลองของระบบจ่ายไฟฟ้าทั้งสอง..... 105
5.1	ขั้นตอนการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังต้นแบบสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ..... 107
5.2	พื้นที่ทางวิ่งของระบบรถไฟฟ้า ..... 108
5.3	แนวการวางทางวิ่งของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ..... 109
5.4	ต้นแบบตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ..... 110
5.5	โครงสร้างระบบขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ..... 111
5.6	ผังเส้นเคเบิลของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ..... 117
5.7	ผังเส้นเคเบิลของระบบไฟฟ้าในตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ..... 117
5.8	ระยะความกว้างของรางตัวนำทั้งสองเส้นและระยะติดตั้งอุปกรณ์จับยึดรางตัวนำ ..... 121
5.9	แผนผังการต่อลงดินของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง ..... 122
5.10	การปักแท่งหลักดินแนวตั้งแบบ 3 หลัก ..... 122
6.1	ผังระบบทดสอบบนพื้นที่โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ..... 123
6.2	ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มที่สร้างขึ้น ..... 124
6.3	ผังระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเพื่อใช้ทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง ..... 125
6.4	ภาพการติดตั้งอุปกรณ์จีพีเอสและเครื่องวิเคราะห์ทางไฟฟ้าบนรถไฟฟ้าตัวอย่าง ..... 127
6.5	ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ..... 128
6.6	ระดับความชันของทางวิ่ง ..... 128
6.7	เส้นกราฟแรงดันและกระแสไฟฟ้า ขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ..... 129
6.8	แรงดันไฟฟ้าตกและเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าขณะทดสอบ ..... 131
6.9	ค่าความผิดพลาดฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ..... 132
6.10	กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า ..... 133
6.11	การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า ..... 134
6.12	วงจรสมมูลระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ..... 136
6.13	การสร้างแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มบนซิมูเลชันของโปรแกรมเมทแลป ..... 136

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.14 ลักษณะความเร็วและอัตราเร่ง.....	140
6.15 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าจากการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์.....	140
6.16 กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนจากการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์.....	141
6.17 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์.....	141
6.18 พลังงานไฟฟ้าจากการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์.....	142
6.19 เส้นกราฟเปรียบเทียบผลแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้กับผลการจำลอง.....	144
6.20 ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับก่อนปรับปรุง.....	145
6.21 ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับหลังปรับปรุง.....	146
ก.1 ทางวิ่งของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม.....	153
ก.2 สถานีผู้โดยสารและทางวิ่งของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม.....	153
ก.3 สถานีรับส่งผู้โดยสาร.....	154
ก.4 ศูนย์กลางระบบควบคุมและสถานีจ่ายไฟฟ้ากำลัง.....	154
ก.5 แบบวงจรไฟฟ้าของศูนย์กลางระบบควบคุม.....	155
ก.6 รูปภาพศูนย์กลางระบบควบคุมและสถานีจ่ายไฟฟ้ากำลัง.....	155
ก.7 รูปภาพสถานีรับส่งผู้โดยสารต้นทาง.....	156
ก.8 รูปภาพทางวิ่งนำทางและรางตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้า.....	156
ก.9 รูปภาพสถานีรับส่งผู้โดยสารปลายทาง.....	157
ก.10 รูปภาพระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง.....	157
ก.11 รูปภาพผู้ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง.....	158
ข.1 มิติของ Steel Copperhead Conductor Bar and Accessories.....	162
ข.2 มิติของ Expansion Joint.....	163
ข.3 มิติของ Rigid Joint.....	163
ข.4 มิติของ Feeder Clamps.....	163
ค.1 มิติของรถไฟฟ้าล้อยาง.....	167
ค.2 มิติของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า.....	167
ค.3 แผนภาพระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม.....	168

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.1 การวัดความต้านดินของแท่งหลักดิน .....	180
จ.2 เส้นทางการวัดความต้านทานหลักดิน .....	181





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ระบบขนส่งมวลชนโดยรถไฟฟ้า ถือเป็นทางเลือกสำคัญในเมืองขนาดใหญ่หลายเมืองทั่วโลก ที่นอกจากจะช่วยแก้ปัญหาการจราจรตามท้องถนนแล้ว ยังประหยัดทรัพยากรทั้งน้ำมันและเวลา ลดปัญหาหมอกควันทางอากาศ ก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งทางสังคมและเศรษฐกิจ ปัจจุบันระบบขนส่งมวลชนได้พัฒนาหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความจุผู้โดยสาร ระยะทางวิ่งให้บริการ และลักษณะทางเทคนิค หนึ่งในนั้นคือ ระบบรถไฟฟ้าอัตโนมัติไร้คนขับหรือรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (Automated People Mover : APM) บางครั้งอาจเรียกระบบรถไฟฟ้านำทางอัตโนมัติ (Automated Guideway Transit : AGT) เป็นระบบขนส่งมวลชนขนาดรองในการเคลื่อนย้ายผู้โดยสารไปยังระบบขนส่งทางหลักต่อไป ซึ่งระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มนี้เป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง มีจุดเด่นที่สามารถใช้งานร่วมกับระบบขนส่งอื่น ๆ ได้ (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2561) ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มจะทำงานภายใต้การควบคุมขบวนรถด้วยระบบคอมพิวเตอร์แบบอัตโนมัติทั้งหมด ตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็มจะรับไฟฟ้าขับเคลื่อนจากรางตัวนำกระแสไฟฟ้า ขับเคลื่อนบนเส้นทางบังคับเป็นลักษณะล้อวางบนพื้นคอนกรีตที่สร้างเป็นแนวให้ขบวนรถวิ่งไปตามทาง โดยจะให้บริการผู้โดยสารในพื้นที่ที่มีความต้องการในการเดินทางสูง ซึ่งจะทำหน้าที่รวบรวม และกระจายผู้โดยสารส่งต่อไปให้กับระบบขนส่งมวลชนสายหลักต่อไป

จากการนำเสนอการติดตั้งระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ที่ใช้งานแพร่หลายในท่าอากาศยานและเขตในเมืองประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก (Lea + Elliott, 2010) จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม มักเป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกกำหนดโดยการออกแบบของบริษัทผู้ผลิต ส่งผลให้ชิ้นส่วนอุปกรณ์ล้วนมีลักษณะเฉพาะรวมถึงรายละเอียดและคุณสมบัติต่าง ๆ ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ซึ่งอยู่ในช่วงที่พัฒนาเทคโนโลยีให้ทันสมัยตลอดเวลา แม้ว่าประเทศไทยไม่ได้เป็นเจ้าของเทคโนโลยีในการผลิตชิ้นส่วนหรือประกอบระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มดังกล่าว แต่ก็ได้ผลักดันระบบขนส่งมวลชนขนาดรองเพื่อให้บริการขนส่งผู้โดยสารสำหรับเชื่อมต่อเส้นทางรองไปยังเส้นทางหลักในเขตเมือง และท่าอากาศยานในประเทศ ดังจะเห็นได้จากโครงการนำร่อง 2 โครงการ คือ โครงการระบบขนส่งมวลชนขนาดรองสายสีทอง (สำนักงานจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร, 2560) และโครงการพัฒนาท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ (บริษัทท่าอากาศยานไทย, 2553) โดยโครงการทั้งสองนี้มีลักษณะ

เป็นระบบรถไฟฟ้าทางอัตโนมัติเต็มรูปแบบขับเคลื่อนด้วยล้อและวิ่งบนทางพื้นคอนกรีต ยกอร์คัฒใช้เป็นทางวิ่งเฉพาะ ซึ่งโครงการดังกล่าวอยู่ในขั้นตอนที่กำลังดำเนินการก่อสร้าง ส่งผลให้ งานด้านระบบรถไฟฟ้ามีบทบาทที่สำคัญในการวางแผนและการปฏิบัติกาาระบบรถไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม มีความแตกต่างจากระบบการจ่ายไฟฟ้าที่มีอยู่ของการไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษา และพัฒนาองค์ความรู้ ในส่วนของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน ความปลอดภัยทางไฟฟ้า การป้องกันทางไฟฟ้า และคุณภาพ ของระบบไฟฟ้า ซึ่งมีส่วนสัมพันธ์กับการควบคุมการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาโปรแกรมจำลองผลของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม
- 1.2.3 เพื่อสร้างต้นแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 พิจารณาแบบจำลองผลระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ ซิมมูลิงค์ของโปรแกรมแมทแลป
- 1.3.2 ยืนยันความถูกต้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรมแมทแลปซิมมูลิงค์
- 1.3.3 พิจารณาการสร้างระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับหนึ่งเฟสสำหรับรถไฟฟ้า เอพีเอ็ม 1 คัน เท่านั้น

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ที่ปลอดภัยและใช้งานได้ จำนวน 1 คัน
- 1.4.2 พัฒนาโปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มสำหรับวิเคราะห์และประเมินผล
- 1.4.3 ยืนยันผลเฉลยของแรงดันไฟฟ้าเทียบกับผลการวัดจริง
- 1.4.4 เสนอแนวทางการแก้ปัญหาทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสม

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม
- 1.5.2 ได้โปรแกรมจำลองผลของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

1.5.3 ได้ต้นแบบการสร้างระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม และแนวทางการแก้ปัญหาทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสม

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบไปด้วย 7 บท ในแต่ละบทมีรายละเอียดอย่างย่อดังต่อไปนี้  
 บทที่ 1 บทนำอธิบายความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการสำรวจสืบค้นจะใช้เป็นแนวทางเพื่อการประยุกต์และพัฒนาเข้ากั้งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบไปด้วย ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในรูปแบบการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์และงานออกแบบสร้างระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม และท้ายสุดได้สรุปข้อมูลจำเพาะของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มของแต่ละบริษัทผู้ผลิต

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มของต่างประเทศและในประเทศไทย หลักการของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนและระบบการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

บทที่ 4 นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ภายใต้การจำลองผลบนคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์และประเมินผล

บทที่ 5 นำเสนอการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ได้แก่ แนวการวางทางวิ่งของรถไฟฟ้า สมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม การออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง และการออกแบบระบบการต่อลงดินของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 6 นำเสนอการทดสอบและประเมินผลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ประกอบไปด้วย การทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับรถไฟฟ้า ยืนยันผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าเทียบกับผลการวัดจริง และเสนอแนวทางการแก้ปัญหาทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสม

บทที่ 7 นำเสนอบทสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวกมีอยู่ 5 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. แบบโครงสร้างและภาพประกอบระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ภาคผนวก ข. โครงสร้างรถไฟฟ้าและระบบขับเคลื่อน ภาคผนวก ค. ข้อมูลผลการทดสอบระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ภาคผนวก ง. ผลการวัดความต้านทานของหลักดิน และภาคผนวก จ. แสดงการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในขณะดำเนินการศึกษา

## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

จากที่ได้เกริ่นนำในบทที่ผ่านมา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์หลัก คือ ศึกษาวิธีการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าอัตโนมัติไร้คนขับ (Automated People Mover: APM) พัฒนาโปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม และสร้างต้นแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังป้อนให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่ผ่านมาในอดีต ผลการดำเนินงาน และข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณษณ์ักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยอาศัยฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะเป็นแนวทางสำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้

#### 2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มจัดได้ว่าเป็นประเภทของระบบขนส่งมวลชนขนาดรอง เพื่อใช้เป็นระบบเสริม (Feeder System) สนับสนุนให้กับระบบขนส่งมวลชนทางหลัก (Main System) เสริมการเข้าถึง และเป็นทางเลือกในการเดินทางที่ไม่ใช่พาหนะยานยนต์ มีปริมาณผู้โดยสารน้อยกว่าระบบขนส่งมวลชนทางหลัก ในหัวข้อนี้แนะนำเสนอปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม เพื่อทำให้เกิดการประมวลความรู้ที่ใช้ศึกษาและติดตามการพัฒนา ระบบขนส่งมวลชนนำทางอัตโนมัติ สามารถแสดงได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

##### 2.2.1 ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ ลักษณะตัวรถไฟฟ้ารางบั้งคับนำทาง ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังและการขับเคลื่อน การควบคุมและติดต่อสื่อสาร สถานีผู้โดยสาร และศูนย์ซ่อมบำรุง ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยจึงเริ่มศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม โดยปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ตามที่ผู้วิจัยได้ค้นคว้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยเริ่มต้นจากการจำลองผลเพื่อใช้ประเมินการออกแบบวางแผนระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม สามารถสรุปโดยย่อได้ดังนี้

George H. Williams. (1980) นำเสนอแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Fortran จำลองผลการจ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านรางบังคับนำทางบนเส้นทางวิ่ง เพื่อทำนายความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้าตก และกระแสฮาร์มอนิกส์ของระบบ โดยกำหนดพารามิเตอร์ของโปรแกรมจำลอง ได้แก่ คุณสมบัติระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า แนวเส้นทางวิ่งให้บริการ และสภาวะการทำงานของรถไฟฟ้าแต่ละคัน เป็นต้น แสดงผลด้วย ชุดตารางของผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าและกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง

Shunying, et al. (2019) ศึกษาการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับ รถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ในระยะแรกได้คำนวณการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้า และวิธีการจำลองผล ของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนให้กับรถไฟฟ้า เพื่อลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากการจ่ายไฟฟ้า ผ่านรางตัวนำ โดยทำการศึกษาแบบจำลองการหาความสูญเสียจากการจ่ายไฟฟ้าผ่านรางตัวนำ และใช้อัลกอริทึมหาค่าเหมาะสมที่สุด ด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) ที่มีการเปลี่ยนแปลง พลวัต ใช้หาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับตำแหน่งติดตั้งสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน การจำลองผลวิธี ที่นำเสนอได้ตำแหน่งติดตั้งเหมาะสมที่สุดของสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน และปรับปรุงการใช้พลังงาน ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Khemkladmuk B., Leeton U. and T. Kulworawanichpong (2018) ศึกษาการประหยัด พลังงานไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม โดยการหาค่าความเร็วเหมาะสมที่สุด กำหนดระยะทาง วิ่ง 500 m รับส่งผู้โดยสารระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี ใช้อัลกอริทึมหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วย GA และ PSO ผลจำลองกรณีความเร็วเหมาะสมที่สุดเป็น 40 km/h ส่งผลให้พลังงานมีค่า 0.16 kWh ซึ่งเป็นค่าที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด ด้วยระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง 650 V นอกจากนี้ ยังสามารถใช้กับระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับได้

Yi-Dar Lin and Antonio A. Trani (2000) ได้นำเสนอแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ไฮบริดจ์ (APMSIM) เพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะการทำงานของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ณ อาคาร ผู้โดยสารท่าอากาศยาน แบบจำลองระบบนี้จะช่วยให้วางแผนและนักออกแบบสามารถ (1) รูปแบบจำลองการเคลื่อนที่ไหวของผู้โดยสารและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (2) หาสมรรถนะของระบบจากช่วงการออกแบบพารามิเตอร์รถไฟฟ้า เช่น ความจุผู้โดยสาร เวลาหยุดแต่ละสถานี ช่วงห่างรถไฟฟ้าแต่ช่องจราจร และความเร็วของรถไฟฟ้า (3) ประเมินการใช้ พลังงานของรถไฟฟ้าบนพื้นฐานข้อจำกัดและลักษณะสมบัติของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

นอกจากนี้ได้นำเสนอ โครงการออกแบบสร้างระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มที่ผ่านมาดังนี้

โครงการของ Anagnostopoulos, G. (1981) นำเสนอการออกแบบระบบรถไฟฟ้า เอพีเอ็ม โดยลักษณะของรถไฟฟ้ามีขนาด 2.06 m × 12.69 m × 3.25 m (กว้าง × ยาว × สูง) จุผู้โดยสาร 124 คน เส้นทางวิ่งแบบคอนกรีตมีระยะทาง 12.7 km และสถานีผู้โดยสาร 17 สถานี ระยะห่างเฉลี่ย



ของแต่ละสถานี 0.85 km ทำงานที่ความเร็ว 60 km/h ระบบจ่ายไฟฟ้าจะใช้การแปลงไฟจากสถานีเรียงกระแสที่ระดับแรงดัน 750 V ป้อนให้กับรางตัวนำเพื่อจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้า ส่วนระบบไฟฟ้าสนับสนุนถูกเชื่อมต่อกับระบบ 3 เฟส ที่แรงดัน 20 kV 50 Hz ลดทอนแรงดันไฟฟ้าด้วยหม้อแปลง 3 เฟส 380/220 V 50 Hz เพื่อแจกจ่ายไปยังแต่ละสถานี นอกจากนี้สถานีจ่ายไฟฟ้าและระบบไฟส่องสว่าง ยังติดตั้งแบตเตอรี่เพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์ฉุกเฉินที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 110 V, 48 V และ 24 V ตามลำดับ

Hirozuki, et al (2003) ได้รายงานเกี่ยวกับระบบรถไฟไฟฟ้าเอทีเอ็มที่ติดตั้งในประเทศสิงคโปร์ ที่มีลักษณะของตัวรถไฟฟ้าขนาด 2.06 m × 11.80 m × 3.6 m (กว้าง × ยาว × สูง) มีเส้นทางวิ่งสองเส้นทาง โดยเส้นทางของสาย Seng Kang มีระยะทางวิ่ง 10.69 km สถานีผู้โดยสาร 14 สถานี และเส้นทางของสาย Punggol มีระยะทาง 9.47 km สถานีผู้โดยสาร 15 สถานี จุผู้โดยสารได้ 105 คน ทำงานความเร็วสูงสุด 80 km/h ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนถูกออกแบบมาเพื่อรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แรงดัน 22 kV 50 Hz ที่สถานีไฟฟ้าย่อย โดยรับจากสถานีไฟฟ้าหลักจ่ายแรงดัน 22 kV ไปแต่ละสถานีโดยตรง ในแต่ละสถานีจะถูกลดทอนจากแรงดัน 22 kV เป็น 400/230 VAC ด้วยหม้อแปลงกำลังเพื่อจ่ายไฟฟ้าไปยังสิ่งอำนวยความสะดวกของสถานี มีการติดตั้งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับศูนย์กลางรถไฟฟ้า แต่ละสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีวงจรเรียงกระแสที่ระดับแรงดันกระแสตรง 750 V ป้อนให้กับรางตัวนำไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้ระบบขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้าใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีพิกัด 82 kW จำนวน 2 ยูนิต

Raney, and Young (2005) นำเสนอระบบรถไฟไฟฟ้าเอทีเอ็ม ตัวรถไฟฟ้ามีลักษณะขนาด 2.07 m × 4.75 m × 2.71 m (กว้าง × ยาว × สูง) น้ำหนัก 3,900 kg ด้วยความเร็วสูงสุด 48 km/h รับส่งผู้โดยสาร 5 สถานีบนเส้นทางในใจกลางเมืองของมอร์แกนทาวน์ รัฐเวสต์เวอร์จิเนีย สหรัฐอเมริกา ออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง ด้วยหม้อแปลงขับเคลื่อน 3 เฟส 23 kV ความถี่ 60 Hz ลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้า 574 V 3 เฟส ต่อแบบเคลด้า จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านรางตัวนำ 3 เส้นที่ติดตั้งไปกับรางบังคับนำทาง รับกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบขับเคลื่อนของรถไฟไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าสนับสนุน จากหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 480/277 V

Sekita T, and Oda Y. (2007) นำเสนอระบบรถไฟไฟฟ้าเอทีเอ็มที่มีลักษณะตัวรถไฟฟ้าขนาด 2.70 m × 9.80 m × 3.5 m (กว้าง × ยาว × สูง) มีน้ำหนัก 13,000 kg จุผู้โดยสาร 76 คน โดยโครงการเฟสแรกมีเส้นทางวิ่งระยะทาง 550 m รับส่งผู้โดยสาร 2 สถานี ด้วยความเร็ว 62 km/h รูปแบบการจ่ายไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส 600 V 50Hz ป้อนให้กับรางตัวนำ 3 เส้น ระบบขับเคลื่อนของรถไฟไฟฟ้าใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่พิกัด 110 kW

Toshio, H., Kazutaka S., and Arata, Y. (2009) นำเสนอระบบรถไฟไฟฟ้าเอทีเอ็มติดตั้งใช้งานในท่าอากาศยานนานาชาติ Miani โดยมีลักษณะตัวรถไฟฟ้าขนาด 2.60 m × 11.70 m × 3.70 m

(กว้าง×ยาว×สูง) มีน้ำหนัก 16,800 kg จุผู้โดยสารได้ 93 คน มีระยะทางวิ่งยาว 1.12 km รับส่งผู้โดยสาร 3 สถานี ทำงานด้วยความเร็วสูงสุด 80 km/h ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังจะใช้การแปลงไฟฟ้าจากสถานีเรียงกระแสที่ระดับแรงดัน 750 V ป้อนให้กับรางตัวนำเพื่อจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าที่ใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

### 2.2.2 ข้อมูลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มแต่ละบริษัทผู้ผลิต

ระบบขนส่งมวลชนขนาดรองเป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งใช้งานร่วมกับระบบอื่น ๆ ได้ หนึ่งในระบบขนส่งมวลชนขนาดรอง นั่นคือ ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ซึ่งเป็นที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน ถูกนำเสนอข้อมูลในตารางที่ 2.1 ซึ่งการออกแบบระบบเป็นกรรมสิทธิ์ของแต่ละบริษัทผู้ผลิต เช่น ลักษณะของตัวรถไฟฟ้า ความจุผู้โดยสาร ลักษณะสมบัติของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า การเลือกระบบส่งจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับหรือกระแสตรง และแนวเส้นทางวิ่งให้บริการ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ลักษณะรถไฟฟ้าเอพีเอ็มของแต่ละผู้ผลิต

(Lea + Elliott, Inc.,2008)

จากรูปที่ 2.1 นำเสนอรูปแบบลักษณะของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ซึ่งขึ้นอยู่กับารออกแบบของผู้ผลิตแต่ละบริษัท และจากการสำรวจระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ส่วนใหญ่ถูกใช้งานขนส่งผู้โดยสารในพื้นที่ท่าอากาศยานของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สรุปข้อมูลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (Lea + Elliott, Inc., 2008)

Component	Typical Characteristics
Dimensions (m)	Width: 2.1 to 3.2, Length: 8.5 to 17.6, Height: 2.9 to 3.9
Passenger capacity (person)	34 to 155
Maximum operating speed (km/h)	40 to 100
Consist sizes	1 to 4 vehicles per train
Minimum horizontal turning radius (m)	22 to 70
Empty vehicle weight (kg)	7,300 to 24,000 on two bogies
Power source	Conductor rail
Suspension	Rubber tires or steel wheels
<b>Sample suppliers/Applications</b>	
I. Bombardier CX-100 and Innovia	
- Madrid, Kuala Lumpur, San Francisco, Seattle, Dallas/Fort Worth, numerous other airports.	
II. Bombardier ART Mk II	
- New York, Vancouver, Kuala Lumpur. Future systems: Yongin, South Korea; Taipei, Taiwan.	
III. Mitsubishi Crystal Mover	
- Singapore Changi, Singapore Sengkang/Punggol lines. Future airport systems: Miami, Dulles, Dubai.	
IV. Siemens VAL 206 28 256 and 258	
- Chicago, Lille (2lines), Toulouse (2lines), Rennes, France, Turin and Italy.	
V. Japanese Standard Technology	
- Kobe (2lines), Osaka Kansai, Yokohama, Tokyo and Taipei.	
VI. Ansaldo-Breda Metro	
- Copenhagen.	
VII. Schwager Davis UniTrak	
- Indianapolis, Waikoloa, HI, Primm and NV	

ตารางที่ 2.2 การสำรวจระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

City	Country	Airport	Transit System	Network length	Station	Traction system
United States	Atlanta, Georgia	Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport	ALT SkyTrain,	2.4 km	3	3-phase 600 VAC 50 Hz
		Dallas/Fort Worth International Airport	Airtrans APM	7.9 km	N/A	750 VDC
	Las Vegas, Nevada	McCarran International Airport	McCarran APM	1.85 km	4	3-phase 600 VAC 50 Hz
	Miami, Florida	Miami International Airport	MIA Mover	0.3 km	2	3-phase 480 VAC 50 Hz
	Orlando	Orlando International Airport	Orlando International Airport People Mover	2.4 km	2	3-phase 600 VAC 50 Hz

ตารางที่ 2.2 การสำรวจระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (ต่อ)

City	Country	Airport	Transit System	Network length	Station	Traction system
United States	Sacramento, California	Sacramento International Airport	SMF APM	0.41 km	2	3-phase 600 VAC 50 Hz
	San Francisco	San Francisco International Airport	Air Train	4.5 km	6	3-phase 600 VAC 50 Hz
Jamaica		New York–John F. Kennedy International Airport	Air Train	13 km	10	750 VDC Landside conveyance, connects 10 elevated stations and links all terminals with two branches that interface with New York’s regional transit systems
Seattle/ Tacoma, Washington		Seattle-Tacoma International Airport	Satellite Transit System	2.7 km	6	3-phase 600 VAC 50 Hz

ตารางที่ 2.2 การสำรวจระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (ต่อ)

City	Country	Airport	Transit System	Network length	Station	Traction system
United States	Tampa, Florida	Tampa International Airport	Tampa International Airport (Air Side System)	1.2 km	5	3-phase 600 VAC 50 Hz
			Tampa International Airport (Land Side System)	1 km	N/A	3-phase 480 VAC 50 Hz
			Washington Dulles International Airport	Aero Train	6.08 km	4
France	Paris	Charles de Gaulle Airport	CDGVAL	3.5 km	5 (1 <sup>st</sup> line) 3 (2 <sup>nd</sup> line)	750 VDC
			Orly Airport	Orly VAL	7.3 km	3
Germany	Frankfurt	Frankfurt Airport	Sky Line	1.6 km	3	3-phase 600 VAC 50 Hz
Italy	Rome	Rome Leonardo da Vinci Fiumicino Airport	Sky Bridge	0.6 km	2	3-phase 600 VAC 50 Hz



ตารางที่ 2.2 การสำรวจระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (ต่อ)

City	Country	Airport	Transit System	Network length	Station	Traction system
Spain	Madrid	Adolfo Suarez Madrid – Barajas Airport	Madrid Barajas Airport	2.7 km	2	3-phase 600 VAC 50 Hz
United Kingdom	London	London Gatwick Airport	Shuttle Transit	1.21 km	2	3-phase 600 VAC
		London Heathrow Airport	Terminal 5 Transit	0.68 km	3	3-phase 600 VAC 50 Hz
China	Beijing	Beijing Capital International Airport	Terminal 5 People Mover	2.08 km	3	3-phase 600 VAC 50 Hz
		Landside conveyance, connects Beijing’s urban center with the international airport’s Terminals 2 & 3		28.1 km	N/A	750 VDC
Hong Kong	Hong Kong	Hong Kong International Airport	Hong Kong International Airport APM	2.78 km	5	750 VDC

ตารางที่ 2.2 การสำรวจระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (ต่อ)

City	Country	Airport	Transit System	Network length	Station	Traction system
Indonesia	Jakarta	Soekarno-Hatta International Airport	Soekarno-Hatta Airport Sky train	3.05 km	4	750 VDC
Japan	Tokyo	Narita International Airport	Narita Airport Terminal Shuttle System	0.27 km	2	3-phase 480 VAC 50 Hz
	Osaka	Kansai International Airport	Wing Shuttle	2.2 km	6	3-phase 600 VAC 50 Hz
Malaysia	Kuala Lumpur	Kuala Lumpur International Airport	KLIA Aero train	1.3 km	2	3-phase 600 VAC 50Hz
Singapore	Changi	Singapore Changi Airport	Changi Airport Sky train	6.4 km	7	750 VDC

ตารางที่ 2.2 การสำรวจระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (ต่อ)

City	Country	Airport	Transit System	Network length	Station	Traction system
Thailand	Bangkok	Suvarnabhumi Airport	Suvarnabhumi Airport APM (Under Construction)	1 km	2	750 VDC
Taiwan	Taipei	Taiwan Taoyuan International Airport	Sky train	1.3 km	2	3-phase 600 VAC 50Hz
United Arab Emirates	Dubai	Dubai International Airport	Dubai International Airport APM	Terminal 1 APM : 1.5 km	4	3-phase 600 VAC 50Hz
				Terminal 3 APM : 5.2 km	4	750 VDC

ที่มา : Transportation Research Board (2010)



จากการสำรวจข้อมูลระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็มให้บริการรับส่งผู้โดยสารในท่าอากาศยานนานาชาติของประเทศต่าง ๆ ซึ่งสรุปในตารางที่ 2.2 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางวิ่งกับระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนพบว่า ระยะทางวิ่งน้อยกว่า 3 km จะใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 50 Hz แรงดัน 600 VAC และระยะทางวิ่งมากกว่า 3 km จะใช้ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แรงดัน 750 VDC

### 2.3 สรุป

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นซึ่งเป็นผลงานทวิชาการที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ถือเป็นพื้นฐานและองค์ความรู้ที่สำคัญต่อผู้วิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และการพัฒนาระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น



## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบไปด้วย 4 หัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ ระบบรถไฟฟ้าเอทีเอ็ม การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าเอทีเอ็มของต่างประเทศ การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าเอทีเอ็มของประเทศไทย หลักการของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน และการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่กล่าวมาจะใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ดังมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2 ระบบรถไฟฟ้าเอทีเอ็ม

ระบบรถไฟฟ้านำทางอัตโนมัติไร้คนขับ (Automatic People Mover : APM) หรือรถไฟฟ้าเอทีเอ็มเป็นระบบขนส่งผู้โดยสารที่มีความจุน้อย มีลักษณะโดดเด่นคือ ไม่มีคนขับ ดำเนินการภายใต้การควบคุมอัตโนมัติเต็มรูปแบบด้วยคอมพิวเตอร์ ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าผ่านรางตัวนำ ขบวนรถส่วนใหญ่จะใช้ล้อวางวิ่งตามเส้นทางบังคับ (Guideway) ควบคุมทิศทางตามระยะทางที่กำหนด โดยทั่วไปจะเรียกระบบนี้ว่า “ระบบรถไฟฟ้าเอทีเอ็ม” ซึ่งจะให้บริการขนส่งผู้โดยสารในบริเวณพื้นที่ขนาดเล็ก เช่น ท่าอากาศยานและเขตในเมือง เป็นต้น (Wikipedia, 2019)

##### 3.2.1 ความเป็นมาของระบบรถไฟฟ้าเอทีเอ็ม

เริ่มจากระบบรรางไร้การหยุด (Never-stop-railway) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นรถไฟฟ้าขบวนแรกี่ทำงานด้วยระบบขนส่งแบบอัตโนมัติ (Wikipedia, 2019) ถูกสร้างขึ้นและนำมาแสดงในนิทรรศการที่จัดขึ้นในเวมบลีย์ เมืองลอนดอน ประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ. 1924 โดยรถไฟฟ้าขบวนนี้ขับเคลื่อนด้วยรางแบบเกลียวสกรูที่หมุนอยู่ตลอดเวลา จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้รถไฟฟ้าไม่สามารถหยุดได้แต่สามารถเพิ่ม-ลดความเร็ว ด้วยการปรับความบิดของเกลียวของสกรูที่จุดต่าง ๆ ได้



รูปที่ 3.1 ระบบรถรางไร้การหยุด (ที่มา: <http://www.gettyimages.co.uk>)

ปี ค.ศ.1949 บริษัทสติเฟนส์-อดัมสัน แมนูแฟคเจอร์ริง (Stephens-Adamson Manufacturing Company) และบริษัท กู๊ดเยียร์ (The Goodyear Tire & Rubber Company) ได้ร่วมกันพัฒนาระบบขนส่งแบบอัตโนมัติ 3 ระบบ ได้แก่ ระบบทางเลื่อนแบบราบ (speed walk) ระบบทางเลื่อนแบบเอียง (Speed ramp) และระบบคาร์เวเยอร์ (Carveyor) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 มีลักษณะเป็นห้องขนาดเล็กๆ โดยสามารถได้ 8-10 ที่นั่งจะเคลื่อนที่บนสายพานลำเลียงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง



รูปที่ 3.2 ระบบคาร์เวเยอร์ (ที่มา : <http://www.tzb-info.cz>)

ปี ค.ศ.1964 บริษัทเวสติ้งเฮาส์อิเล็กทริก (Westinghouse Electric Corporation) ได้งบประมาณสนับสนุนจากภาครัฐให้ทำการพัฒนาระบบรถไฟฟ้า (Skybus South Park APM



demonstration project) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นรถไฟฟ้าที่ทำงานด้วยระบบขนส่งแบบอัตโนมัติที่เมืองพิตส์เบิร์ก ประเทศอเมริกา และทำการทดลองขนส่งผู้โดยสาร หลังจากนั้น 7 ปี ระบบนี้ได้ถูกพัฒนาและติดตั้งใช้งานที่ทำอากาศยานนานาชาติแทมปา (Tampa international airport) ซึ่งเป็นท่าอากาศยานแห่งแรกที่ใช้ระบบขนส่งแบบนำทางอัตโนมัติ



รูปที่ 3.3 ระบบรถไฟฟ้าลอยฟ้า (ที่มา: <http://www.pittsburghtransit.org/skybus.html>)

ตั้งแต่ปลายทศวรรษที่ 1960 เป็นต้นมา ระบบรถไฟฟ้านำทางอัตโนมัติเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจจากทั่วโลก เนื่องจากปัญหาการจราจรติดขัดตามท้องถนน และมลพิษที่เพิ่มขึ้นจากการใช้รถจึงมีหลายประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ประเทศแถบยุโรป ญี่ปุ่น แคนาดา และอเมริกา ได้เริ่มพัฒนาระบบขนส่งผู้โดยสารนำทางอัตโนมัติของแต่ละประเทศให้มีการทำงานที่มีประสิทธิภาพในขณะที่พยายามลดต้นทุนที่ใช้ในการสร้างให้ต่ำลง และต่อ ยอดเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน

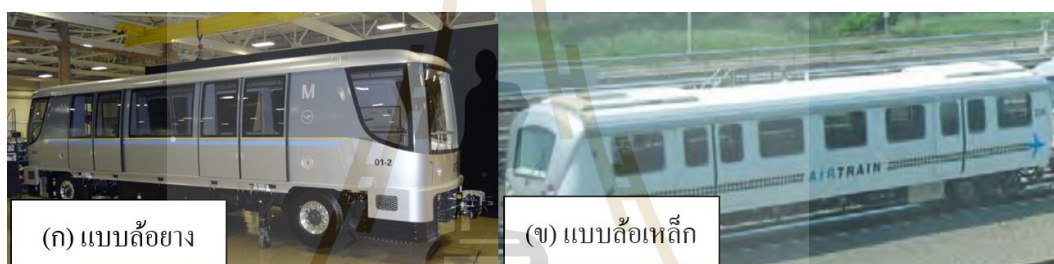
### 3.2.2 องค์ประกอบของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มพื้นฐานถูกอธิบายจากส่วนประกอบหรือระบบย่อย และจากลักษณะระบบ ดังต่อไปนี้ (Rongdang, 2017)

#### 1. ส่วนประกอบของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ประกอบด้วยระบบปฏิบัติการและอุปกรณ์อำนวยความสะดวก โดยระบบปฏิบัติการประกอบด้วย ระบบอุปกรณ์ย่อยที่จำเป็นต่อการทำงานของระบบ ส่วนสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ได้แก่ ตึกอาคาร ห้องพัก และเส้นทางนำ หรือเครื่องอุปกรณ์สนับสนุนการปฏิบัติการทางกายภาพ มีส่วนประกอบหลัก ๆ คือ

- ลักษณะตัวรถไฟฟ้า (APM Vehicle) ในระบบนี้โดยทั่วไปจะมีความยาวของตู้โดยสาร 10-12 m และกว้าง 3 m สามารถจุผู้โดยสารได้ 50-80 คนต่อตู้โดยสาร ซึ่งมีรูปแบบการเคลื่อนที่ 4 แบบ ได้แก่ แบบล้อยาง (Rubber Tires) เป็นรูปแบบที่ใช้ล้อยางร่วมกับทางวิ่งคอนกรีต ทำให้มีราคาถูกและไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวนจึงมักนำมาใช้ในเขตเมือง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 แบบล้อโลหะ (Steel Wheels) เป็นรูปแบบที่ใช้ล้อโลหะร่วมกับรางวิ่ง โลหะจะสามารถวิ่งได้ด้วยความเร็วสูงกว่าล้อยาง แต่เกิดเสียงดังจากการเสียดสีกันระหว่างล้อกับราง และแบบแรงยกของอากาศ (Air Levitation) เป็นรูปแบบที่ใช้หลักการแรงดันอากาศที่ปล่อยออกมาจากรถไฟฟ้าเพื่อยกรถไฟให้ลอยขึ้นจากรางวิ่งเล็กน้อยขณะเคลื่อนที่ ทำให้สามารถวิ่งได้อย่างรวดเร็วและเงียบ เนื่องจากไม่มีแรงเสียดทาน นอกจากนี้ยังมีแบบแรงยกของแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Levitation) ซึ่งจะมีการทำงานแบบเดียวกับแบบแรงยกของอากาศ แต่ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าแทนอากาศ

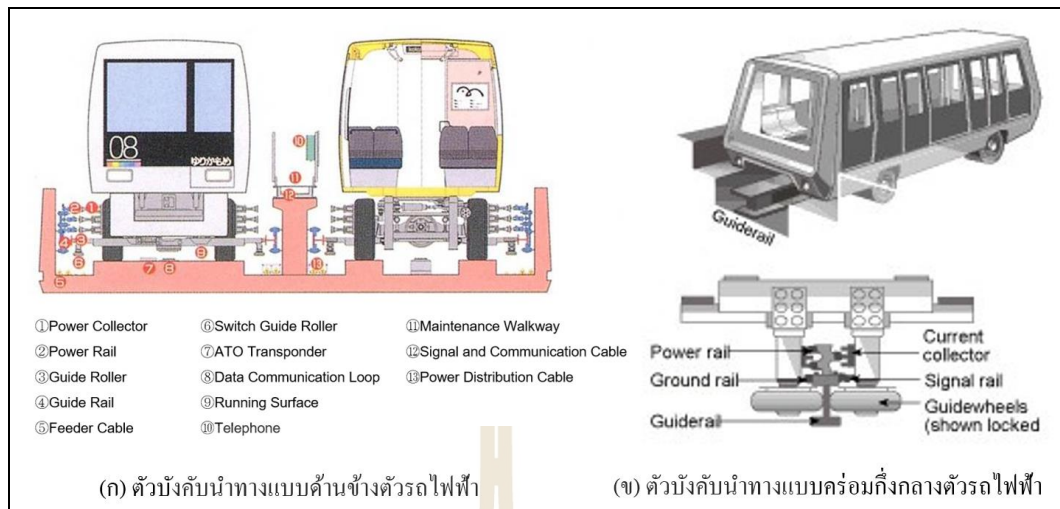


รูปที่ 3.4 ตัวอย่างลักษณะตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (ที่มา: <http://media3.marketwire.com>)

- รางบังคับนำทาง (Guideway) ทำหน้าที่ควบคุมบังคับทิศทางของขบวนรถไฟฟ้าตามแนวเส้นทางที่กำหนด มีรูปแบบการติดตั้งรางบังคับนำทางใช้งานสองรูปแบบ คือ (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2561)

(1) ติดตั้งบริเวณด้านข้างของตัวรถไฟฟ้า (Side Guide) อาจเป็นทางด้านซ้ายหรือทางด้านขวาของรถไฟฟ้า โดยติดตั้งรางบังคับนำทางและรางตัวนำจ่ายไฟบริเวณด้านข้างของทางวิ่งรถ มีความกว้างเฉพาะส่วนของทางวิ่งรถประมาณ 1.85 m และความกว้างของทางวิ่งรวมรางตัวนำจ่ายไฟกับรางบังคับนำทางประมาณ 3.2 m ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก)

(2) ติดตั้งอยู่บริเวณกึ่งกลางของตัวรถไฟฟ้า (Central Guide) โดยจะติดตั้งรางบังคับนำทางและรางตัวนำจ่ายไฟบริเวณกึ่งกลางของตัวรถไฟฟ้า โดยมีความกว้างของทางวิ่งรถประมาณ 3.2 m



รูปที่ 3.5 การติดตั้งรางบังคับนำทางและรางตัวนำจ่ายไฟของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม  
 (ที่มา: <http://pghbridges.com>)

- ระบบ ไฟฟ้ากำลังและการขับเคลื่อน (System Power and Propulsion) ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังจะประกอบด้วย (1) ระบบไฟฟ้าใช้ขับเคลื่อนรถและจ่ายให้อุปกรณ์บนรถ โดยจะรับมาจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับจากหม้อแปลงขับเคลื่อนที่อยู่ตามสถานีไฟฟ้ารายทาง (2) ระบบไฟฟ้าสำหรับศูนย์ควบคุมการเดินรถและระบบไฟฟ้าสำรอง (3) ระบบไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ของระบบควบคุมและสนับสนุนการเดินรถ (4) ระบบไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ในศูนย์ซ่อมบำรุงและเครื่องมือต่าง ๆ และ (5) ระบบสายดินเพื่อความปลอดภัยของบุคคล ส่วนระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าของรถจะขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ภายในตัวรถ อาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้า 750-1,300 V หรือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แรงดันไฟฟ้า 480-600 V

- การควบคุมและติดต่อสื่อสาร (Control and Communications) ระบบนี้มีการใช้ระบบควบคุมรถอัตโนมัติ Automatic Train Control (ATC) เข้ามาช่วยในการทำงานเหมือนรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ โดยทั่วไปในการควบคุมรถไฟฟ้าจะมีเครือข่ายการสื่อสารเพื่อตรวจสอบและสั่งการรถไฟฟ้า ซึ่งมีศูนย์ควบคุมระบบ (Central Control Facility) เป็นฝ่ายดูแลทั้งหมด ดังรูปที่ 3.6 นอกจากนี้ศูนย์ควบคุมระบบยังมีการดูแลเกี่ยวกับระบบรักษาความปลอดภัยภายในสถานีอื่น เช่น วิทยุสื่อสาร โทรศัพท์ฉุกเฉิน กล้องวงจรปิด ระบบเปิด-ปิดประตูชานชาลาอัตโนมัติ เป็นต้น โดยจำนวนเจ้าหน้าที่ควบคุมระบบและอุปกรณ์ควบคุมระบบจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มที่ใช้



รูปที่ 3.6 การควบคุมและติดต่อสื่อสาร (ที่มา: <https://www.japan.go.jp>)

- สถานีผู้โดยสาร (Stations) มีที่ตั้งอยู่ตามเส้นทางวิ่งของรถไฟไฟฟ้าเพื่อให้ผู้โดยสารสามารถใช้บริการอย่างสะดวกสบาย โดยสถานีจะมีการติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวก เช่น ประตูชานชาลาอัตโนมัติ ป้ายข้อมูลต่าง ๆ เป็นต้น เพื่อความสะดวกสบายและความปลอดภัยของผู้โดยสาร นอกจากนี้ที่สถานียังมีเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนระบบรถไฟไฟฟ้าเอพีเอ็มให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุง (Maintenance and Storage Facility) เป็นสถานที่สำหรับการบำรุงรักษา เก็บเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการซ่อมบำรุง ทำความสะอาดขบวนรถไฟ และจัดเก็บขบวนรถไฟ นอกจากนี้ยังเป็นที่ตั้งของสำนักงานฝ่ายบริหาร โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของระบบรถไฟไฟฟ้าเอพีเอ็มระบบหนึ่งจะมีผู้รับผิดชอบดูแลเพียงเจ้าของเทคโนโลยีรายเดียว ยกเว้นประเทศญี่ปุ่นที่สามารถใช้องค์ประกอบจากหลายหน่วยงานร่วมกันได้

## 2. ระบบการขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติ

ส่วนนี้อธิบายรูปแบบการเดินรถไฟไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ โดยขบวนรถไฟไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ จากสถานีหนึ่งไปยังอีกสถานีหนึ่งวิ่งด้วยความเร็วที่กำหนดไว้ เมื่อรถไฟวิ่งออกจากชานชาลา ระบบป้องกันอัตโนมัติจะควบคุมกำลังงานขับเคลื่อน รวมทั้งใช้ห้ามล้อเพื่อชลอรถและให้รถจอดตรงจุดที่กำหนดไว้ ณ สถานีถัดไป นอกจากนี้ยังเปิดปิดประตูรถโดยอัตโนมัติ เมื่อรถไฟเข้าจอดที่ชานชาลาแล้วระบบควบคุมเวลาอัตโนมัติจะควบคุมเวลาที่รถวิ่งและเวลาจอด เพื่อให้รถทำเวลาได้ตรงตามตารางเวลาการเดินรถ



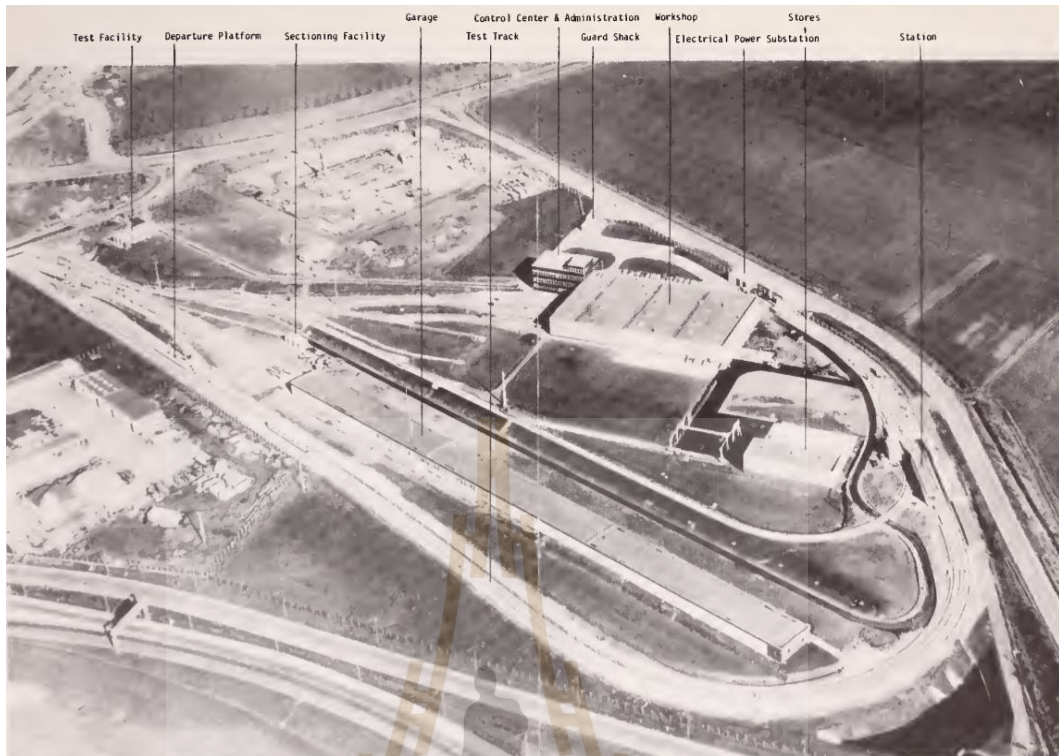
### 3.3 การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มของต่างประเทศ

ยุโรปและญี่ปุ่นได้พัฒนาระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (APM or AGT) เช่นเดียวกับสหรัฐอเมริกา ในปลายทศวรรษที่ 1960 มีแนวคิดพื้นฐานเพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านการจ้างพนักงานด้วยการทำงานแบบระบบอัตโนมัติทั้งหมด ส่งเสริมการเดินทางที่รวดเร็วและความสะดวกสบายของผู้โดยสาร ขณะเดินทาง (Horst, G. and Hermann, Z. 1980) ปัจจุบันระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มถูกใช้งานแพร่หลายในเขตเมืองและท่าอากาศยานในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก

#### 3.3.1 ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในประเทศฝรั่งเศส

ในปี ค.ศ.1970 สำนักงานสาธารณะเพื่อการพัฒนาในภาคตะวันออกของเมืองลิลล์ (EPALE) ภายใต้รัฐบาลประเทศฝรั่งเศส และหน่วยงานพัฒนาชุมชนท้องถิ่นของเมืองลิลล์ พิจารณาข้อกำหนดสำหรับช่วงทางระยะไกลระหว่างสองขบวนรถวิ่งตามกันบนทางเส้นทางเดียวกันที่มีความสามารถรองรับผู้โดยสารประมาณ 6,000 คนต่อชั่วโมงต่อช่องจราจร ด้วยความถี่การให้บริการและอัตราที่สูงเพื่อรองรับผู้โดยสาร หลังจากการเปิดตัวของ EPALÉ ได้ออกข้อเสนอหลังจากออกแบบการแข่งขัน กรมขนส่งระบบ MATRA ได้ถูกเลือกในเดือน กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ.1972 ในฐานะระบบการจัดการและพัฒนาระบบคำสั่งการควบคุมโดยความร่วมมือระหว่างบริษัทอุตสาหกรรมอุปกรณ์การขนส่ง หรือ CIMT และบริษัท TCO Traction CEM-Oerlikon ซึ่งรับผิดชอบการพัฒนาขบวนรถและระบบขับเคลื่อน ตามลำดับ MATRA ชนะการแข่งขันระบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบขนาดกลางขับเคลื่อนด้วยล้อแบบ เป็นการค้าเนินการครั้งแรกของระบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบในสภาพแวดล้อมของเมืองในประเทศฝรั่งเศส

ระยะแรกของการพัฒนาระบบรถไฟฟ้าอัตโนมัติ หรือ VAL : Véhicule Automatique Léger (Automatic Light Vehicle) ใช้ระยะเวลา 4 ปี (ตั้งแต่ปี ค.ศ.1971-1975) ซึ่งประกอบไปด้วยการก่อสร้างและดำเนินการทดสอบวนรอบ 1.7 km ในเมืองลิลล์ โดยมีหนึ่งสถานี ชุดกลีบรถสองชุด ศูนย์ควบคุมและสั่งการ สถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน และโรงซ่อมบำรุงรักษา ดังแสดงในรูปที่ 3.7 การทดสอบโดยรถไฟฟ้าอัตโนมัติต้นแบบสองคันดำเนินการจนถึงเดือน มิถุนายน ปี ค.ศ. 1975 ตามด้วยการทดสอบความทนทานในระยะทาง 30,000 km ถูกบันทึกไว้ในรถแต่ละคัน ขั้นตอนการพัฒนานี้ใช้งบประมาณ 45 ล้านดอลลาร์ฝรั่งเศส ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากรัฐบาลฝรั่งเศส ดังรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นถึงการทดสอบรถไฟฟ้าอัตโนมัติ VAL ต้นแบบและสถานีที่ทางวิ่งทดสอบในขณะเดียวกัน Communauté Urbaine de Lille (CUDL) ได้พัฒนาและได้ปรับการบริการขนส่งมวลชน จากการผสมผสานของ Lille-Roubaix-Tourcoing โครงการจัดทำข้อกำหนดสำหรับเครือข่ายแบบลากจูงโดยทางวิ่ง 4 เส้นทางเดินรถ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ทางวิ่งเส้นทางเดินแรก ถูกขยายออกไปจากเมืองลิลล์ไปถึง 12.7 km การจราจรสูงสุดสายทางวิ่งนี้คาดว่าจะอยู่ประมาณ 4,000 และ 7,000 คนต่อชั่วโมงต่อช่องทาง

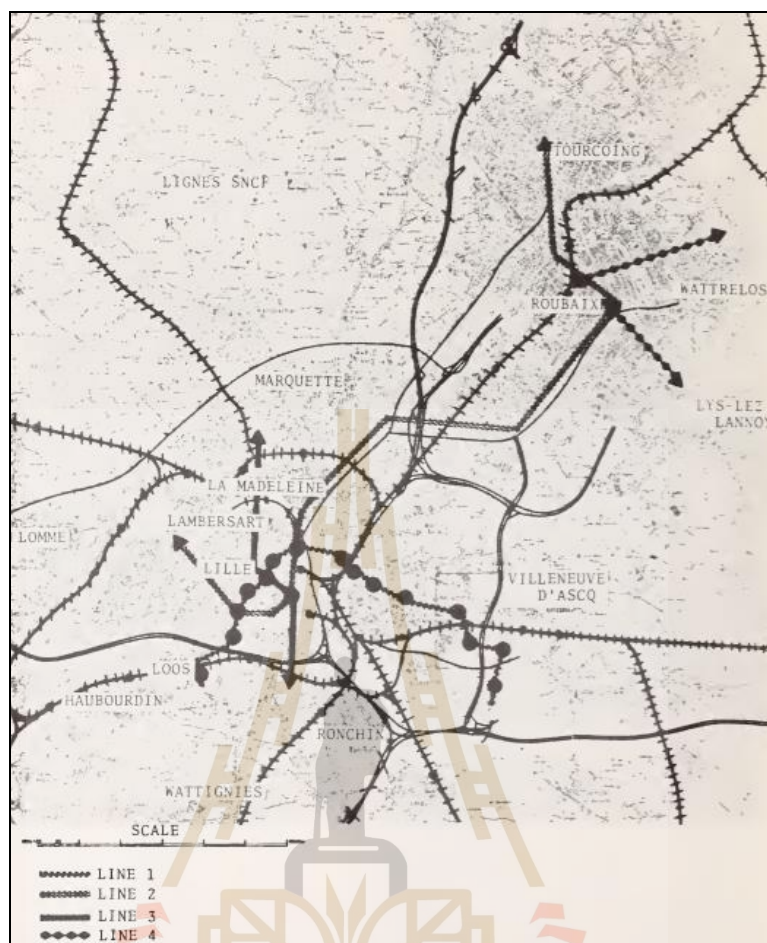


รูปที่ 3.7 ต้นแบบทางวิ่งทดสอบรถไฟฟ้าอัตโนมัติ VAL ในเมืองลีลล์ ฝรั่งเศส  
(ที่มา: Anagnostopoulos, G., 1981)



รูปที่ 3.8 ทดสอบต้นแบบระบบรถไฟฟ้าอัตโนมัติ VAL และสถานี ณ เมืองลีลล์ ฝรั่งเศส  
(ที่มา: Anagnostopoulos, G., 1981)





รูปที่ 3.9 โครงข่ายรถไฟฟ้าใต้ดินในเมืองลิลล์ (ที่มา: Anagnostopoulos, G., 1981)

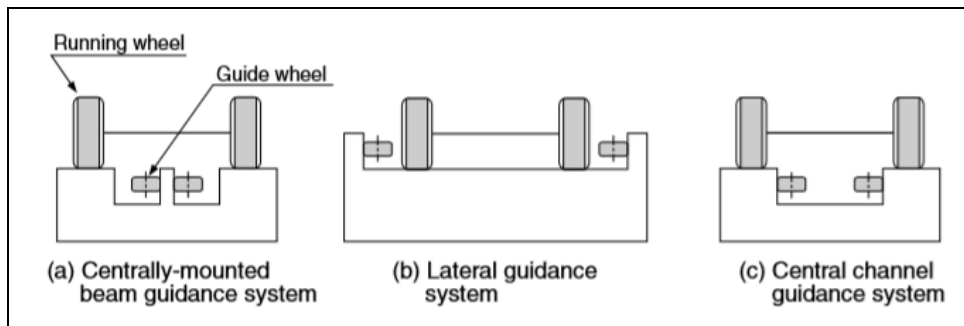
ก่อนหน้านี้อัตโนมัตินี้รถไฟฟ้าอัตโนมัติ VAL จำนวน 2 คัน จากการผลิตทั้งหมด 38 คัน ถูกส่งมอบในเดือน กรกฎาคม ปี ค.ศ. 1979 รถไฟฟ้า 2 คันแรกนี้ถูกใช้เพื่อการพัฒนาทางวิศวกรรม โดยการทดสอบส่วนประกอบและระบบย่อยทั้งหมดเสร็จสิ้นสมบูรณ์ ในขณะนั้นระบบรถไฟฟ้าอัตโนมัติ VAL อยู่ระหว่างการทดสอบระดับของระบบเพื่อให้แน่ใจว่าการบูรณาการระบบทั้งหมด การดัดแปลงใด ๆ ที่เกิดจากการทดสอบเหล่านี้จะถูกรวมอยู่ในรถไฟฟ้าการผลิตในอนาคต การทดสอบคุณสมบัติของระบบนั้นจะคล้ายระบบของอากาศยาน ซึ่งจะดำเนินการผลิตรถไฟฟ้า 4 คัน ในเดือนตุลาคม ปี ค.ศ. 1981 การดำเนินการจะเริ่มต้นในส่วนแรกของเส้นทางมี 4 สถานี ในเดือนมกราคม ปี ค.ศ. 1982 และขยายเป็น 13 สถานี ในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 1983 ซึ่งการดำเนินการทั้งหมด 17 สถานี จะเริ่มในเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 1983 รถไฟฟ้า VAL Lille เป็นระบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบของระบบขนส่งมวลชนในเมืองถูกออกแบบมาเพื่อขนส่งผู้โดยสารระหว่างเมืองใหม่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของเมืองลิลล์และศูนย์การแพทย์ประจำภูมิภาคระบบขนส่งมวลชน

ทางอัตโนมัติ นี้จะทำงานบนพื้นที่ยกระดับ และในอุโมงค์บนทางวิ่งคอนกรีตนำทางแบบสองช่องทางที่มีความยาว 12.7 km กำหนดค่าของระบบแบบ พูช-พูล ลูป (Push-Pull Loop) ระหว่างสถานีออนไลน์ 17 สถานี

การศึกษาดำเนินการโดย MATRA ภายใต้การกำกับดูแลของ CUDL และที่ปรึกษาเพื่อตรวจสอบแนวคิดของรถไฟฟ้าอัตโนมัติ VAL และฮาร์ดแวร์นั้นเหมาะสมกับโครงหรือไม่ การศึกษานี้ชี้ให้เห็นได้ว่าด้วยการดัดแปลงระบบรถไฟฟ้า VAL เป็นการแก้ปัญหาที่ทำงานได้ การศึกษาทางเศรษฐศาสตร์โดยแผนกวิศวกรรมของ RATP เมื่อเปรียบเทียบระบบรถไฟฟ้า VAL กับระบบรถไฟฟ้าใต้ดินปกติ แสดงให้เห็นว่าระบบรถไฟฟ้าอัตโนมัติ VAL ให้การประหยัด 15% ในการลงทุน และประหยัด 30% สำหรับต้นทุนการดำเนินงาน

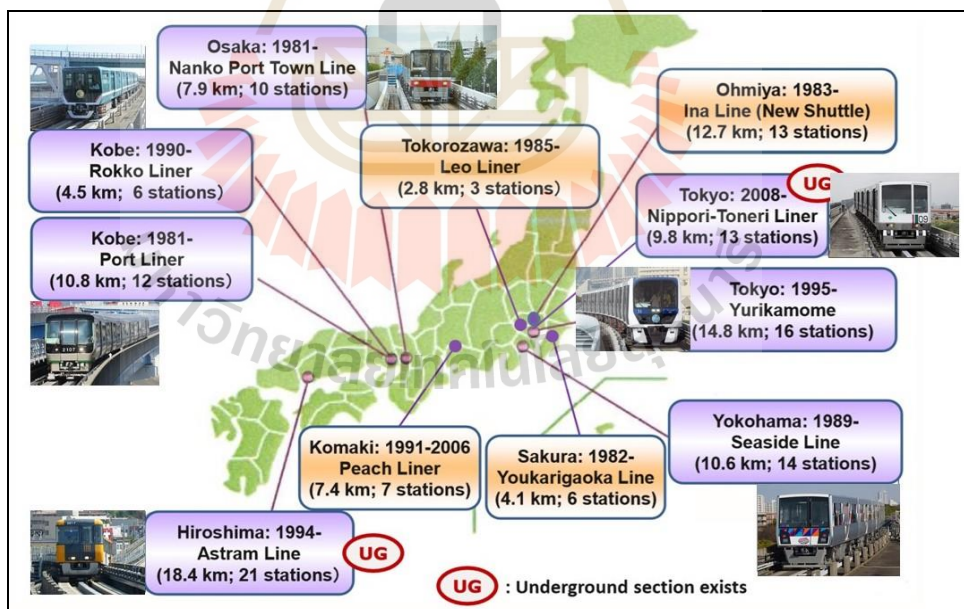
### 3.3.2 ระบบรถไฟฟ้าเอทีเอ็มในประเทศญี่ปุ่น

การวิจัยและพัฒนา ระบบรถไฟฟ้าเอทีเอ็มครั้งแรก ได้เริ่มขึ้นในสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ.1970 และส่งผลให้การใช้งานจริงในทศวรรษเดียวกัน ต่อมาเทคโนโลยีของระบบขนส่งมวลชนนำทางอัตโนมัติได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย เช่น ใจกลางเมือง และท่าอากาศยานนานาชาติ เป็นต้น ระบบขนส่งมวลชนนำทางอัตโนมัติได้รับการพัฒนาในยุโรปเช่นกัน โดยเฉพาะสหราชอาณาจักร ฝรั่งเศส และเยอรมัน การวิจัยระบบขนส่งมวลชนนำทางอัตโนมัติของประเทศญี่ปุ่น เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1968 โดยการพัฒนาของ Computer Controlled Vehicle (CVS) แล้วเสร็จในปี ค.ศ. 1976 ระบบรถไฟฟ้าอัตโนมัติในญี่ปุ่นในขณะนั้นมี 4-6 คัน มีที่นั่งผู้โดยสารในรถ 60-70 ที่นั่งต่อคัน ครั้งแรกนั้นระบบดังกล่าวได้เปิดให้บริการบนทางยกระดับของเส้นทางเดินรถเกาะพอร์ต (Port Liner) ในปี ค.ศ.1981 ระหว่างเมืองโกเบกับเมืองโอซากา กระทรวงคมนาคมของญี่ปุ่นในขณะนั้นได้กำหนดการสร้างระบบขนส่งมวลชนนำทางอัตโนมัติในปี ค.ศ.1983 และมาตรฐานทางเทคนิคเพื่อนำมาใช้ โครงสร้างของระบบมีข้อกำหนดขั้นพื้นฐานสามารถสรุปได้ดังนี้ แนวคิดพื้นฐาน มีที่นั่งผู้โดยสาร 75 ที่นั่งต่อคัน และไม่มีคนขับบนรถ ส่วนข้อกำหนดพื้นฐานอื่น ๆ ได้แก่ ตัวบังคับนำทางด้านข้าง ระบบไฟฟ้ากระแสตรง 750 V ระยะห่างล้อเลื่อน 2,400 mm × 3,300 mm (กว้าง × สูง) น้ำหนักรวมไม่เกิน 18 ตัน ระยะห่างทางวิ่ง 3,000 mm × 3,500 mm (กว้าง × สูง) ช่องว่างชุดบังคับทิศทางด้านข้าง 2,900 mm และน้ำหนักกดเพลลา 9 ตัน ข้อมูลจำเพาะระบุเป็นด้านข้างและระบบนำทางแวนอนเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นมาตรฐานในอนาคต กำหนดให้ระบบบังคับนำทางมี 3 แบบ ได้แก่ ระบบบังคับนำทางคร่อมบริเวณกึ่งกลางทางวิ่ง ระบบบังคับนำทางด้านข้างทางวิ่ง และระบบบังคับนำทางบริเวณช่องกลางทางวิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ระบบบังคับนำทาง (ที่มา: Akira Nehashi, 2001)

จากตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการพัฒนาระบบขนส่งมวลชนในเมืองที่มุ่งเน้นไปทางระบบการขับเคลื่อนด้วยตัวเอง ภายใต้ชื่อระบบขนส่งมวลชนแบบใหม่ (Automated People Mover : APM) แต่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในชื่อของ ระบบขนส่งผู้โดยสารนำทางอัตโนมัติ (Automated Guideway Transit : AGT) ซึ่งระบบดังกล่าวให้บริการตามสายต่าง ๆ ในประเทศญี่ปุ่นดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มบริการตามเส้นทางเดินรถต่าง ๆ ของประเทศญี่ปุ่น (ที่มา: <http://www.jtpa.or.jp>)

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลระบบรถไฟฟ้ายูเอเอ็มในประเทศไทย

	<b>Yamaman Co., Ltd.</b> Yukarigaoka Line	<b>Saitama Shintoshi Kotsu Co., Ltd.</b> Ina Line	<b>Seibu Railway Co., Ltd.</b> Yamaguchi Line	<b>Kobe Shinkotsu Co., Ltd.</b>		<b>Hiroshima Kosoku Kotsu Co., Ltd.</b> Astram Line	<b>Yokohama Shintoshi Kotsu Co., Ltd.</b> Kanazawa Seaside Line	<b>Tokadai Shin Kotsu Co., Ltd.</b> Tokadai Line	<b>Osaka Municipal Government</b> Nanko Port Town Line	<b>Yurikamome Co., Ltd.</b> Rinkai Line
Terminal stations	Yukarigaoka -Yukarigaoka (loop)	Omiya - Uchijuku	Seibu Yuenchi - Kyujo-mae	Sannomiya - Naka Koen	Sumiyoshi - Marine Park	Hon-dori - Koiki Koen	Shin Sugita - Kanazawa Hakkei	Komaki - Tokadai Higashi	Suminoe Koen - Naka Futo	Shimbashi - Ariake
Line length (km)	4.1	12.6	2.8	6.4	4.5	18.4	10.8	7.4	6.6	11.9
Number of stations	6	13	3	9	6	21	14	7	8	12
Average distance between stations (m)	683	980	1,400	800	1,125	920	815	1,230	940	1,000
Single/double tracked	Single; loop	Maruyama - Uchijuku, single Omiya - Uchijuku, double	Single	Sannomiya -Naka Koen, double Other track, single	Double	Double	Double	Double	Double	Double
Guidance system	Centrally - mounted beam	Lateral guidance rails	Lateral guidance rails	Lateral guidance rails	Lateral guidance rails	Lateral guidance rails	Lateral guidance rails	Centrally-mounted beam	Lateral guidance rails	Lateral guidance rails

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลระบบรถไฟฟ้ายูเอเอ็มในประเทศไทย (ต่อ)

	<b>Yamaman Co., Ltd.</b> Yukarigaoka Line	<b>Saitama Shintoshi Kotsu Co., Ltd.</b> Ina Line	<b>Seibu Railway Co., Ltd.</b> Yamaguchi Line	<b>Kobe Shinkotsu Co., Ltd.</b>		<b>Hiroshima</b> <b>Kosoku Kotsu Co., Ltd.</b> Astram Line	<b>Yokohama Shintoshi Kotsu Co., Ltd.</b> Kanazawa Seaside Line	<b>Tokadai Shin Kotsu Co., Ltd.</b> Tokadai Line	<b>Osaka Municipal Government</b> Nanko Port Town Line	<b>Yurikamome Co., Ltd.</b> Rinkai Line
				Port Island Line	Rokko Island Line					
Switching system	Mobile track horizontal rotary system	Mobile horizontal guidance plates	Mobile guidance plates	Sink-and-float system	Mobile horizontal guidance plates	Mobile horizontal guidance plates	Mobile guidance plates	Horizontal rotary system	Mobile horizontal guidance plates	Mobile guidance plates
Operations	ATS; one driver	ATC; one driver	ATS; one driver	ATO; unmanned	ATO; unmanned	One driver	ATC; one driver	ATC; one driver	ATO; unmanned	ATO; unmanned
Electrical system	750 Vdc	3 phase 600Vac	750 Vdc	3 phase 600Vac	3 phase 600Vac	750 Vdc	750 Vdc	750 Vdc	3 phase 600Vac	3 phase 600Vac
Minimum curve radius	40	25	60	30	60	30	30	100	70	45
Max. gradient (per mill)	45	59	50	50	58	45	40	60	25	50
Opened	1982	1983	1985	1981	1990	1994	1989	1991	1981	1995
Capacity (people/h)	1,630	3,480	-	3,840	972	5,720	4,320	965	4,428	7,200



ตารางที่ 3.1 ข้อมูลระบบรถไฟฟ้าเอฟอีเอ็มในประเทศไทย (ต่อ)

	<b>Yamaman Co., Ltd.</b> Yukarigaoka Line	<b>Saitama Shintoshin Kotsu Co., Ltd.</b> Ina Line	<b>Seibu Railway Co., Ltd.</b> Yamaguchi Line	<b>Kobe Shinkotsu Co., Ltd.</b> Port Island Line Rokko Island Line		<b>Hiroshima</b> <b>Kosoku Kotsu Co., Ltd.</b> Astram Line	<b>Yokohama Shintoshin Kotsu Co., Ltd.</b> Kanazawa Seaside Line	<b>Tokadai Shin Kotsu Co., Ltd.</b> Tokadai Line	<b>Osaka Municipal Government</b> Nanko Port Town Line	<b>Yurikamome Co., Ltd.</b> Rinkai Line
Capacity (people/h)	1,630	3,480	-	3,840	972	5,720	4,320	965	4,428	7,200
Schedule speed (km/h)	24	31	25	22	27	30	26	30	27	31
Max. speed (km/h)	50	60	50	60	63	60	60	55	60	60
Time interval (minutes)	8	16	-	3.20	4	3	5	12	2.45	3.5-4, morning & evening rush hours
Seating (one train)	215	375 (6-car train)	302	450	228	286	360	193	297	352

ที่มา: Akira Nehashi , 2001



### 3.4 การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในประเทศไทย

ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มถูกพัฒนาขึ้นในประเทศไทย ปัจจุบันอยู่ในขั้นตอนการก่อสร้าง ซึ่งมีการใช้งานรับส่งผู้โดยสารในพื้นที่ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิโดยโครงการพัฒนาท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ และรับส่งผู้โดยสารในเขตเมืองโดยโครงการระบบขนส่งมวลชนขนาดรองสายสีทอง มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.4.1 โครงการพัฒนาท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มใช้งานในพื้นที่ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิดำเนินการโดย บมจ. อินเทอร์เน็ต คอมมิวนิเคชั่น บริษัทเรอริงจังก์จำกัด บริษัทไทยอิงเกอร์เทคโนโลยีจำกัด และบริษัทวิวเท็กซ์จำกัด เป็นผู้ชนะการประมูลและติดตั้งระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม เมื่อวันที่ 20 พฤศจิกายน 2560 นำเข้าโดยบริษัทซีเมนส์ เป็นรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม รุ่นแอร์เวล (Airval) ดังรูปที่ 3.12 เส้นทางของระบบขนส่งผู้โดยสารในเฟส 2 ของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ มีระยะทางวิ่ง 1 km รับส่งผู้โดยสาร 2 สถานี คือ สถานีอาคารผู้โดยสารกับสถานีอาคารเทียบเครื่องบินรองหลังที่ 1 เป็นระบบทางวิ่ง 4 รางคู่ขนาน ใช้รถ 12 คัน 6 ขบวน ขบวนละ 2 ตู้ สามารถขนส่งผู้โดยสารได้มากถึง 3,590 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง และวิ่งให้บริการตลอด 24 ชั่วโมง 7 วันต่อสัปดาห์ ใช้ระบบบังคับนำทางและรางตัวนำจ่ายไฟครอบคลุมบริเวณกึ่งกลางทางวิ่ง (Central Rail-Guide) มีความถี่ในการวิ่งให้บริการสูง สามารถทำความเร็วได้อย่างรวดเร็ว และมีระยะเบรคสั้น ใช้ล้อยางซึ่งจะยึดเกาะได้ดีในพื้นที่ลาดเอียง และให้เสียงที่เงียบกว่าเมื่อเข้าโค้ง โดยบริษัทซีเมนส์จะส่งมอบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มแบบ 2 ตู้จำนวน 6 ขบวน ผลิตจากโรงงานของซีเมนส์ที่กรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย พร้อมด้วยระบบอัตโนมัติสัญญาณ (CBTC) เป็นระบบการทำงานอัตโนมัติทั้งหมด พัฒนาขึ้นมาจากประเทศฝรั่งเศส โดยระบบทดสอบทั้งหมดจะทำได้ในปี พ.ศ. 2563



รูปที่ 3.12 รถไฟฟ้าเอพีเอ็ม รุ่นแอร์เวล จากบริษัทซีเมนส์ (ที่มา: <http://matemnews.com>)

การขยายท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ในแผนระยะยาวของการพัฒนาท่าอากาศยานแห่งนี้ ได้วางแบบไว้ในกรอบใหญ่ถึงความสามารถในการขยายการรองรับผู้โดยสารได้สูงสุดถึง 120 ล้านคนต่อปี ดังนั้นการเดินหน้าลงทุนในเฟส 2 จะนำไปสู่การขยายพัฒนาต่อเนื่องในเฟสต่อไปที่จะเกิดขึ้น ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิในเฟสแรก ที่กำลังใช้งานกันอยู่ ถูกจัดว่าเป็นโครงการพัฒนาทางด้านทิศเหนือของท่าอากาศยาน รองรับผู้โดยสารได้ 45 ล้านคนต่อปี แต่ปัจจุบันมีผู้โดยสารใช้บริการ 55.6 ล้านคน เกินขีดความสามารถในการรองรับของสนามบินไปร่วม 10 ล้านคนต่อปี ขณะที่เฟส 2 ดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 เพิ่งมาเดินหน้าในรัฐบาลชุดนี้ จากกระบวนการศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม EIA และปัญหาการเมืองของไทย แผนพัฒนาในเฟส 2 จะขยายการรองรับผู้โดยสารเพิ่มเป็น 60 ล้านคนต่อปี เป็นการพัฒนาพื้นที่ฝั่งทิศตะวันออกของท่าอากาศยานที่งานก่อสร้างหลักใน 5 เรื่องที่จะเกิดขึ้นในอาคารเทียบเครื่องบินรอง หลังที่ 1 จะเป็นอาคารเดี่ยวระดับ 6 ชั้น มีพื้นที่ใช้สอยประมาณ 216,000 m<sup>2</sup> รองรับจำนวนผู้โดยสารจำนวน 15 ล้านคนต่อปี ลานจอดอากาศยานเทียบเครื่องบินรอง หลังที่ 1 ประกอบด้วยลานจอดเครื่องบินประชิดอาคารเทียบเครื่องบินรองหลังที่ 1 ซึ่งรองรับอากาศยานได้ 28 ลำ มีระบบขนส่งมวลชนนำทางอัตโนมัติจากเฟส 1มายังอาคารเทียบเครื่องบินรองหลังที่ 1 (เฟส 2) ระยะทาง 800 m และส่วนต่อขยายอุโมงค์ทางด้านทิศใต้ ที่ต้องเผื่อไว้อีก 800 m ซึ่งประกอบไปด้วย ศูนย์ซ่อมบำรุงระบบรถไฟฟ้าที่ปลายทางอุโมงค์ และสถานี ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอาคารผู้โดยสารหลังเดิม รวมถึงระบบสายพานลำเลียงกระเป๋าความเร็วสูงระหว่างอาคาร ดังรูปที่ 3.13 (โครงการพัฒนาท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ, 2553)



รูปที่ 3.13 แผนผังทางวิ่งระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ  
(ที่มา: <https://www.plus.co.th>)

### 3.4.2 โครงการระบบขนส่งมวลชนขนาดรองสายสีทอง

เป็นโครงการระบบขนส่งมวลชนรองบนพื้นที่ฝั่งธนบุรี เพื่อเชื่อมต่อการเดินทางบนถนนเจริญนครและเป็นการเชื่อมต่อเข้ากับศูนย์การค้าไอคอนสยามดำเนินการโดยกรุงเทพมหานครและบริษัทกรุงเทพธนาคม จำกัด ในรูปแบบระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม และมีแนวเส้นทางเริ่มต้นจากสถานีต้นทางของโครงการใกล้กับสถานีกรุงธนบุรี ของรถไฟฟ้าบีทีเอสสายสีลมไปตามแนวถนนเจริญนคร ผ่านศูนย์การค้าไอคอนสยาม สำนักงานเขตคลองสาน สิ้นสุดในระยะแรกที่บริเวณแยกสมเด็จพระยา-ประชาธิปไตย รวมระยะทาง 5.7 km คาดว่าจะมีผู้โดยสาร 50,000 เที่ยวต่อวันเมื่อเปิดทำการ ปัจจุบัน (พ.ศ. 2560) มีระยะทางในระยะแรก 1.7 km เริ่มก่อสร้างในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 และคาดว่าจะแล้วเสร็จปลายปี พ.ศ. 2562 (สำนักการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร, 2560)

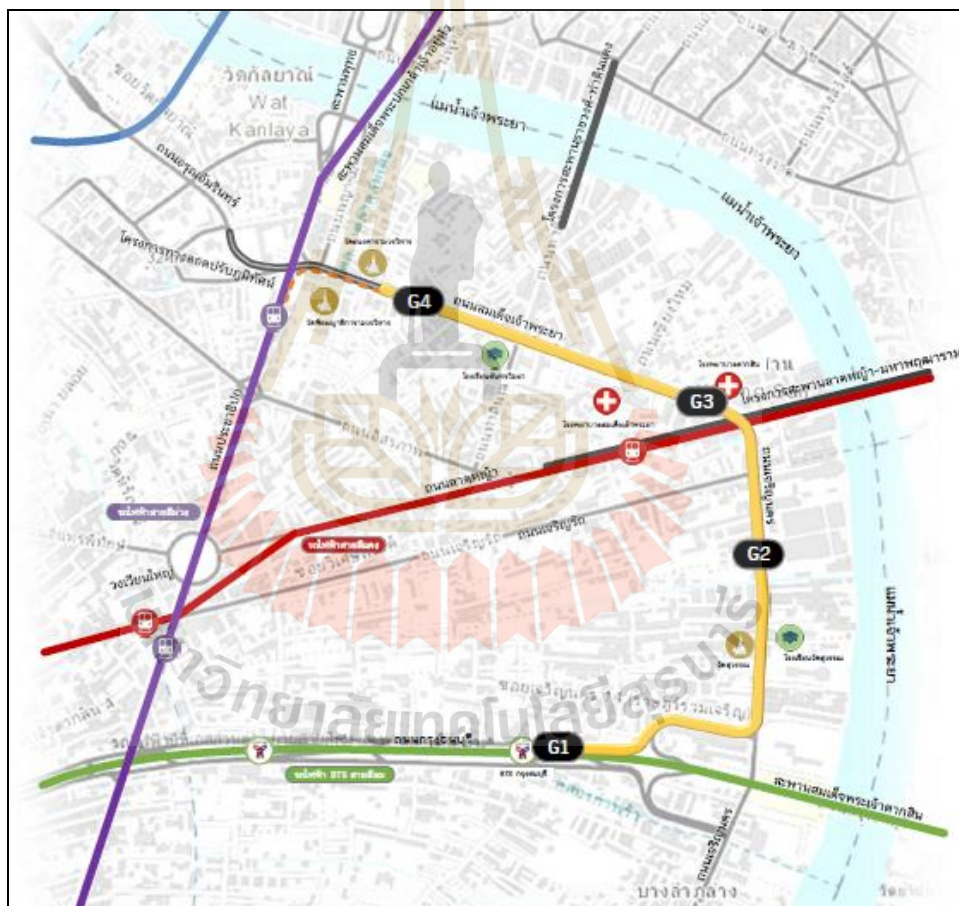
1. รูปแบบทั่วไปของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม โดยแบ่งแนวทางการออกแบบและศึกษาปริมาณความต้องการการเดินทางออกเป็น 2 แนวเส้นทาง ได้แก่ เส้นทางช่วงถนนกรุงธนบุรี-ถนนสมเด็จพระเจ้าอยุธยา และเส้นทางช่วงถนนกรุงธนบุรี-ถนนเจริญนครตัดถนนมหาสวรรค์ แนวเส้นทางของการศึกษาทางของทั้งสองเลือกเริ่มต้นถนนกรุงธนบุรีจากบริเวณสถานีกรุงธนบุรีรถไฟฟ้าสายสีเขียวเป็นเส้นทางยกระดับตลอดแนวเส้นทาง โดยในรายงานจะกล่าวถึงโครงการในช่วงที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สถานีรับส่งผู้โดยสารของโครงการระบบขนส่งมวลชนขนาดรองสายสีทอง

ชื่อสถานี	ตำแหน่ง (km)	ระยะทางระหว่างสถานี (km)
กรุงธนบุรี (G1)	0 + 000	0.00
เจริญนคร (G2)	1 + 149	1.149
คลองสาน (G3)	1 + 681	0.532
ประชาธิปไตย (G4)	2 + 630	0.949

การวางแผนในทางราบ จะเป็นไปตามแนวถนนกรุงธนบุรี และเลี้ยวเข้าสู่ถนนเจริญนคร โดยมีข้อกำหนดให้รัศมีในการเข้าโค้งไม่น้อยกว่า 50 m จากนั้นจึงเลี้ยวเข้าสู่ถนนสมเด็จพระเจ้าอยุธยา การวางแผนในแนวตั้ง มีระดับความชัน (Gradient) สูงสุด 6% การวางแผน สามารถทำความเร็วสูงสุด 80 km/h ซึ่งเป็นเงื่อนไขการจำกัดความเร็วอย่างถาวรอันเนื่องมาจากข้อจำกัดการวางแผนของทางวิ่ง องศาของจุดสับราง ทางเข้าจุด Dead End Track เป็นต้น จำนวนสถานีทั้งหมด 4 สถานี รวมสถานีต้นทางและปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยสถานีทั้งหมดเป็นแบบ

โครงสร้างยกระดับและมีการจัดวางชุดกลับรถ (Switching) สำหรับการทำการให้บริการแบบตัดช่วง การเดินรถแบบไปกลับบนทางวิ่งเดียว และการเดินรถแบบสองทิศทาง ซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่ด้านข้างชานชาลาเช่นกัน ความยาวชานชาลาจะเป็นมาตรฐานที่ 90 m ขบวนรถประกอบด้วยจำนวน 2 ตู้ ทำการต่อพ่วงแบบกึ่งถาวรเข้าด้วยกันซึ่งเป็นผู้สำหรับหัวขับเคลื่อน (Driving Car) ทั้ง 2 ตู้เพื่อการวิ่งรถ 2 ทิศทางในรางเดียว และการนำขบวนรถที่เสียออกให้พ้นทางวิ่งและเพื่อในการสับหลักภายในโรงจอดและซ่อมบำรุง ในแต่ละตู้จะออกแบบให้มีประตูโดยสาร 2 บานทั้ง 2 ด้านซึ่งจะมีขนาดกว้างเพียงพอสำหรับกรณีอพยพ ผู้โดยสารเต็มความจุของรถไฟฟ้า (6 คน/ตารางเมตร) ออกไปยังชานชาลาที่สถานีภายใน 45 วินาที



รูปที่ 3.14 แนวเส้นทางโครงการและตำแหน่งของสถานี  
(สำนักงานจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร, 2560)



2. ความจุขบวนรถไฟไฟฟ้า ในเบื้องต้นใช้ข้อมูลของรถไฟไฟฟ้า AGT ขนาดเล็กที่มีความจุของผู้โดยสาร 80 คน/ตู้

3. รูปแบบของโครงการเป็นรถไฟไฟฟ้าเอพีเอ็ม รุ่น Innovia APM 300 จากบริษัท บอมบาร์ดิเอร์ จำนวน 2 ขบวน ขบวนละ 3 คัน มีทางวิ่งให้บริการ ยกกระดานความสูง 14-17 m ตลอดทั้งโครงการ มีรางตัวนำจ่ายไฟขนานไปกับรางนำทางวิ่งเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่รถไฟไฟฟ้า ตัวรถเป็นรถปรับอากาศขนาด 3.6 m × 12 m × 3.7 m (กว้าง×ยาว×สูง) ความจุผู้โดยสาร 103 คนต่อคัน (309 คนต่อขบวน) ต่อพ่วงได้ 3 คันต่อขบวน ใช้ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง 750 V จ่ายให้ระบบขับเคลื่อนของรถไฟไฟฟ้า สามารถรองรับผู้โดยสารได้ 4,300 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง ใช้ระบบอาณัติสัญญาณเดินรถด้วยระบบอัตโนมัติจากศูนย์ควบคุมการเดินรถที่สถานีกรุงธนบุรี และใช้ระบบเก็บค่าโดยสารอัตโนมัติ

4. รูปแบบของทางยกระดับ โดยโครงสร้างทางวิ่งจะเลือกใช้คานกล่องคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (Box Girder) รองรับทางวิ่งรถไฟไฟฟ้าสองทิศทาง รูปแบบของสถานี เป็นลักษณะโครงสร้างยกระดับเหนือพื้นผิวถนนรองรับด้วยเสาคอนกรีตตรงเกาะกลางถนน มีลักษณะโครงเฟรม สำหรับสถานี G1 โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุง จะมีลักษณะเสาเดี่ยว ส่วนสถานี G2, G3 และ G4 โครงสร้างสถานีประกอบด้วย 4 ส่วน คือ ชั้นจำหน่ายตั๋วโดยสาร โครงสร้างคานทางวิ่งชานชาลา และโครงสร้างหลังคา เนื่องจากลักษณะโครงสร้างสถานีมีลักษณะคล้ายอาคารยกระดับเหนือพื้นถนน ดังนั้นการก่อสร้างจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะส่งผลกระทบต่ออาคารระหว่างอาคารก่อสร้างให้มากที่สุด ซึ่งโครงสร้างสถานีทั่วไปที่เหมาะสมควรมีระยะเสาห่าง 15-30 m แต่อาจจะมีบางสถานีที่ต้องมีระยะเสาที่ห่างมากขึ้นถึง 34 m เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ก่อสร้าง

5. รูปแบบของโรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุง กิจกรรมภายในประกอบด้วย การจอดพักขบวนรถไฟไฟฟ้า การซ่อมบำรุงและเปลี่ยนอุปกรณ์ปรับอากาศ การทำความสะอาดภายนอกและภายใน การล้างและขัดเคลือบสีรถไฟฟ้า การเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง และการเปลี่ยนล้อยาง

### 3.5 หลักการของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน

โครงสร้างของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง ประกอบด้วยส่วนของโครงสร้างที่ติดตั้งอยู่กับที่ คือ สถานีจ่ายไฟฟ้ากำลัง (Electric Power Substation) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงลงมาในระดับที่เหมาะสม จากนั้นจึงถูกนำส่งเข้าระบบการป้อนเข้าสู่ตัวนำไฟฟ้า (Conductor Feeding System) โดยมีส่วนรับไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งอยู่บนรถไฟไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่รวบรวมกระแสไฟฟ้าจากตัวนำป้อนเข้ามายังรถไฟไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ เรียกอุปกรณ์นี้ว่า “ตัวรวบรวมกระแสไฟฟ้า (Current Collector)” ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ใช้ อาจเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงหรือระบบไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการออกแบบระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนเพื่อใช้งาน (ธนดชัย, 2560)

ส่วนระบบการป้อนกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้า คือ ระบบการใช้รางตัวนำ (Conductor Rail) มีข้อดีในเรื่องของผลกระทบต่อด้านมลพิษทางสายตา โดยไม่มีโครงสร้างของระบบป้อนกระแสไฟฟ้า รุ่งรังอยู่เหนือรางรถไฟไฟฟ้า แต่มีข้อจำกัดขณะใช้งานและด้านความปลอดภัยทางไฟฟ้า ระบบนี้จึงมักใช้กับรถไฟไฟฟ้าใต้ดินหรือระบบขนส่งมวลชนที่อยู่ในเมือง ในส่วนของระบบสายส่งเหนือศีรษะ จะมีโครงสร้างของระบบป้อนกระแสไฟฟ้าที่รุ่งรังอยู่เหนือรางรถไฟไฟฟ้า มักใช้กับระบบรถไฟไฟฟ้าทางไกล หรือรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงซึ่งต้องติดตั้งระบบไฟฟ้าที่ใช้แรงดันสูง

### 3.5.1 ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟไฟฟ้าทั่วโลก

ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ป้อนให้ตามประเภทของรถไฟไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า ประกอบด้วยเทคโนโลยีการแปลงพลังงานที่สถานีไฟฟ้าย่อยวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับ รวมถึงโครงสร้างการป้อนไฟฟ้าส่งผ่านสายตัวนำ ดังตารางที่ 3.3 นำเสนอระบบการป้อนไฟฟ้าที่แตกต่างกันทั่วโลกและระยะทางวิ่งของรถไฟไฟฟ้า เริ่มต้นจากระบบการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงได้โดยตรงและควบคุมความเร็วได้ง่าย ในขณะที่การจ่ายระดับแรงดัน 3 kV นั้นถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศทั่วโลก แต่รถไฟบางแห่งของประเทศญี่ปุ่นใช้ระดับแรงดัน 1.5 kV นอกจากนี้ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ความถี่ 16.66 Hz และ 25 Hz การใช้ความถี่ต่ำนี้เพื่อลดแรงดันตกเหนี่ยวนำในสายจ่าย และไม่ก่อเกิดการอาร์คที่ตัวคอมมิวเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า ระบบดังกล่าวนี้ถูกนำมาใช้กันหลายประเทศรวมถึงออสเตรเลียและเยอรมนี จากนั้นมีการพัฒนาระบบจ่ายไฟฟ้า 25 kV ความถี่ 50 Hz ได้รับความนิยมใช้งานแพร่หลายทั่วโลกจนถึงปัจจุบัน และระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แรงดัน 600 V ที่มีการควบคุมความเร็วด้วยการแปลงพลังงานใช้สำหรับระบบขนส่งมวลชนในเมืองของประเทศญี่ปุ่นและในยุโรป (Yasu, O. Yoshifumi, M. and Hiroki, N. 1998)



ตารางที่ 3.3 ระบบการป้อนไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าวิ่งตามระยะทางของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก

System type	Japan*		World (Japan included)				
	km	%	km	%	Main Countries		
DC (kV)	< 1.5	915	5.31	5,106	2.16	Germany, Switzerland, UK, and USA	
	1.5-3	10,484	60.92	22,138	9.38	Australia, France, Netherlands, and Spain	
	3 or more	-	-	78,276	33.19	Italy, Poland, Russia, Spain, and South Africa	
1-phase AC (kV)	50-60 Hz	< 20	-	-	245	0.10	France and USA
		20	3,741	21.74	3,741	1.58	-
		25	2,037	11.83	84,376	35.78	China, India, France, Romania, and Russia
		50	-	-	1,173	0.49	Canada, South Africa, and USA
	25 Hz	11- 13	-	-	1,469	0.62	Austria, Norway, and USA
	16.66 Hz	11	-	-	120	0.05	Switzerland
		15	-	-	35,461	15.03	Germany, Sweden, and Switzerland
3-phase AC	30	0.17	43	0.01	Switzerland and France		
Unaware	-	-	3,668	1.55	France and Kazakhstan		
Total	17,207	100	235,816	100			

**Notes:** \* Statistics include Japanese subways and AGTs

ที่มา: Yasu, O. Yoshifumi, M. and Hiroki, N. 1998

### 3.5.2 กรอบโครงสร้างมาตรฐานด้านระบบไฟฟ้า

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจรได้รายงานเกี่ยวกับกรอบโครงสร้างมาตรฐานของระบบไฟฟ้าโดยแยกออกเป็นระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนและระบบบรรจตัวนำ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 กรอบโครงสร้างมาตรฐานระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน

ระดับมาตรฐาน (Classification)	รายละเอียด (Details)
กฎหมาย (Law) ข้อกำหนด (Regulations)	<p>ข้อกำหนดพื้นฐานทางกฎหมายเพื่อการบังคับใช้มาตรฐานทางเทคนิค</p> <p>แนะนำการทำงาน ส่วนประกอบที่จำเป็นเพื่อการออกแบบและอุปกรณ์ที่สำคัญของระบบไฟฟ้ากำลัง</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- แบบชนิดทางไฟฟ้า: แบบชนิดของระบบการจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน</li> <li>- แรงดัน: แรงดันที่กำหนดของสายจ่ายสัมผัส</li> <li>- ความถี่: ความถี่ที่ระบุ</li> <li>- โครงแบบระบบจ่ายไฟฟ้า: สถานีไฟฟ้าย่อย (แบบชนิด, สถานที่ตั้ง)</li> <li>- การแบ่งส่วนเฟส</li> <li>- การป้องกันและการฉนวน: ระยะปลอดภัยทางไฟฟ้า</li> <li>- การต่อลงดิน: โครงแบบและแบบชนิด</li> <li>- หม้อแปลงไฟฟ้า: ชนิดหม้อแปลงหลัก สมรรถนะหม้อแปลง</li> <li>- สวิตช์เกียร์: เซอร์กิตเบรกเกอร์</li> <li>- ระบบเฝ้าตรวจและควบคุมระยะไกล: ส่วนกลาง</li> <li>- โครงข่ายจำหน่าย: โครงแบบ</li> </ul>
มาตรฐานทางเทคนิค (Technical standards)	<p>เกณฑ์การออกแบบอย่างน้อยประกอบไปด้วย</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- แบบชนิดทางไฟฟ้า</li> <li>- แรงดัน</li> <li>- ความถี่</li> <li>- โครงแบบระบบการจ่ายไฟฟ้า</li> <li>- การป้องกันและการฉนวน</li> <li>- การต่อลงดิน</li> <li>- คุณภาพทางไฟฟ้า</li> <li>- หม้อแปลงไฟฟ้า</li> <li>- สวิตช์เกียร์</li> <li>- ระบบเฝ้าตรวจและควบคุมระยะไกล</li> <li>- โครงข่ายจำหน่าย</li> </ul>

ที่มา: สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, มปป.

ตารางที่ 3.5 กรอบโครงสร้างมาตรฐานระบบรางตัวนำ

ระดับมาตรฐาน (Classification)	รายละเอียด (Details)
ข้อกำหนด (Regulations)	<p>เรื่องที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยง อย่างน้อยประกอบด้วย</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- สภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ อื่น ๆ</li> <li>- ลักษณะทางกล/ทางไฟฟ้า</li> <li>- ข้อพิจารณาการออกแบบระบบรางตัวนำสำหรับรถไฟฟ้า</li> <li>- ความเร็วสูงสุด</li> <li>- ขนาดแรงดันไฟฟ้า</li> </ul> <p>ข้อกำหนดของระบบรางตัวนำ อย่างน้อยประกอบด้วย</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- แบบชนิดของรางตัวนำ</li> <li>- ความสามารถในการรับกระแสไฟฟ้าของระบบรางตัวนำ</li> <li>- การคำนวณของจุดจับยึดรางตัวนำ</li> <li>- จุดรับกระแสไฟฟ้าเข้าสู่รถไฟฟ้า</li> </ul>
มาตรฐานทางเทคนิค (Technical standards)	<p>เกณฑ์การออกแบบอย่างน้อยประกอบไปด้วย เรื่องทั่วไปและการเชื่อมโยง</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- สภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ อื่น ๆ</li> <li>- ความเร็วสูงสุด</li> <li>- ขนาดแรงดันไฟฟ้า</li> <li>- ความถี่ทางไฟฟ้า</li> </ul> <p>ข้อกำหนดของระบบรางตัวนำ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ความสามารถในการรับกระแสไฟฟ้าของระบบรางตัวนำ</li> <li>- การคำนวณส่วนสัมผัสของระบบรางตัวนำ</li> <li>- การประสานคำนวณ</li> <li>- สวิตช์ในสถานีไฟฟ้าย่อย</li> <li>- การป้องกันแรงดันเกิน</li> <li>- ระยะห่างทางด้านข้าง</li> <li>- การบำรุงรักษาระบบรางตัวนำ</li> </ul>

ตารางที่ 3.5 กรอบโครงสร้างมาตรฐานระบบรางตัวนำ (ต่อ)

ระดับมาตรฐาน (Classification)	รายละเอียด (Details)
	ข้อกำหนดของส่วนประกอบของระบบรางตัวนำ
	- การจับของรางตัวนำ
	- แผ่นป้องกัน
	- ฉนวน
	- การเลือกอุปกรณ์ประกอบ
	- การจับยึดอุปกรณ์ประกอบ
	- รางนำไฟฟ้า
	- การฉนวนของอุปกรณ์ประกอบ

ที่มา : สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, มปป.

จากตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 แสดงกรอบโครงสร้างมาตรฐานระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนและระบบรางตัวนำสำหรับรถไฟฟ้าราง มีระดับมาตรฐานประกอบด้วย กฎหมาย ข้อกำหนด และมาตรฐานทางเทคนิค

### 3.5.3 ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าเอทีเอ็ม

ระบบรถไฟฟ้าเอทีเอ็มจัดเป็นประเภทของระบบขนส่งมวลชนขนาดรองทำหน้าที่เป็นระบบเสริมให้กับระบบขนส่งมวลชนหลัก ส่งเสริมการเข้าถึง และเป็นทางเลือกในการเดินทางมีความจุผู้โดยสารน้อยกว่าระบบขนส่งมวลชนหลัก (สำนักงานการจราจรและขนส่งกรุงเทพมหานคร, 2560) สำหรับรูปแบบของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอทีเอ็ม โดยทั่วไปมีการใช้งาน 2 ระบบ คือระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 50 Hz แรงดัน 480 V หรือ 600 V และระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน 600 V หรือ 750 V (Lea+Elliott, 2008) อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของระบบ จากรายงานของ Transportation Research Board (2010) กล่าวถึงข้อกำหนดของสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าเอทีเอ็ม จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณ ขนาดกำลังไฟฟ้า สถานี สิ่งอำนวยความสะดวก/พื้นที่ความต้องการ ปัจจัยที่สำคัญ คือ ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหรือกระแสตรง เนื่องจากขนาดและความยาวของเส้นทางวิ่งมีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามระบบรถไฟฟ้าเอทีเอ็ม มีการเปลี่ยนไปใช้ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นหลัก ส่วนระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับโดยทั่วไปจะใช้กับระบบรถไฟฟ้าเอทีเอ็มขนาดเล็ก เช่น รถไฟฟ้าเอทีเอ็มรับส่งผู้โดยสารระยะทางสั้น ข้อได้เปรียบของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับคือขนาดของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีพื้นที่เล็กกว่าสถานีไฟฟ้าของระบบกระแสตรง ซึ่งสถานีไฟฟ้าของ

ระบบกระแสตรงจำเป็นต้องใช้พื้นที่อำนวยความสะดวกเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องมียางจราจรเรียงกระแส และสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าตามรางตัวนำไปกับทางวิ่งที่ยาวกว่า ซึ่งมีการสูญเสียแรงดันตกต่อหน่วยความยาวของทางวิ่งน้อยกว่า เมื่อเทียบกับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจำเป็นต้องมีสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่มีระยะห่างกันแต่ละสถานี 609.6 m หรือน้อยกว่านั้น เนื่องจากผลของแรงดันไฟฟ้าตก จึงจำเป็นต้องมีสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่เพิ่มตามตำแหน่งการวางแนว เช่นเดียวกับการเพิ่มจำนวนจุดป้อนไปยังเส้นทางวิ่งของรถไฟฟ้า ส่วนระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านรางตัวนำที่ยาวกว่า โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 1,524 m ระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน อย่างไรก็ตามสถานีไฟฟ้าระบบกระแสตรง จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่มากและขนาดใหญ่ ระยะห่างระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีผลให้จำนวนสถานีไฟฟ้าน้อยกว่า และมักจะเทียบกับการประหยัดค่าใช้จ่ายอย่างมีนัยสำคัญ โดยทั่วไประบบจ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับรถไฟฟ้าเอทีเอ็มจะมีพิกัดตั้งแต่ 500 kVA จนถึง 1,500 kVA ซึ่งพิกัดกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย รวมถึงความยาวของเส้นทางวิ่งของระบบรถไฟฟ้า (ขนาดของรถไฟฟ้าเอทีเอ็ม จำนวนรถต่อขบวน หรืออื่น ๆ) และปริมาณความจุของผู้โดยสาร

### 3.5.4 การหาระยะห่างระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน

ระยะห่างระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น พิกัดหม้อแปลงกำลัง ขนาดสายจ่ายตัวนำ ภาระสูงสุดของระบบรถไฟฟ้า หรือรูปแบบการจัดวางจ่ายกำลังไฟฟ้า เป็นต้น การออกแบบวงจรถจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้า โดยไม่พิจารณาการติดตั้งอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ อาจพิจารณาตามพิกัดแรงดันทำงานและรูปแบบการจัดวาง โดยให้กรณีของการจัดวางแบบจ่ายด้านเดียวระยะห่างระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนพิจารณาได้โดยใช้ความสัมพันธ์ 1,000 V/km ดังสมการที่ 3.1 ในกรณีของการจัดวางแบบจ่ายสองด้านสามารถเพิ่มระยะทางการวางสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้โดยเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ในอัตราส่วน 2,000 V/km ดังสมการที่ 3.2 สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับให้  $kc$  เท่ากับ 1.0 อย่างไรก็ตาม ด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรง สายจ่ายไฟฟ้าไม่มีองค์ประกอบค่าความเหนี่ยวนำ ปกติจะมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานของสายไฟฟ้าประมาณ 2-3 เท่า ในกรณีของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงสามารถเพิ่มระยะห่างได้ 2-3 เท่า ดังนั้นในกรณีระบบไฟฟ้ากระแสตรงให้  $kc$  เท่ากับ 2.0-3.0 (ชนิดชั้ย, 2560)

$$FD = kc \times \frac{V_{rated}}{1000} \quad (3.1)$$

$$FD = kc \times \frac{V_{rated}}{500} \quad (3.2)$$

โดยที่  $FD$  คือ ระยะห่างของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า, (km)  
 $V_{rated}$  คือ ค่าพิกัดแรงดันทำงาน, (V)

### 3.6 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน

ในเรื่องของระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า และแรงดันที่ตกคร่อมโหลดมีความแตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากแรงดันไฟฟ้าตกที่สายส่งไฟฟ้า เนื่องจากพารามิเตอร์ของความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ โดยให้แรงดันไฟฟ้าปลายทาง แทนด้วย  $V_r$  และแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าต้นทางแทนด้วย  $V_s$  จะสามารถหาแรงดันไฟฟ้าตก เป็น  $V_s - V_r$  ซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันปลายทางที่รับ โดยเรียกว่า “การควบคุมแรงดันไฟฟ้า” สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3 (Kassu, 2017)

$$\% \text{ voltage regulation} = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100 \quad (3.3)$$

แรงดันไฟฟ้าสามารถกำหนดเป็นการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่โหลดรับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด การลดลงของแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทานของตัวป้อนที่มีกระแสไหลตามที่แสดงในรูปที่ 3.13 (ก) หากแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายจะเทียบเคียงด้วยวงจรสมมูลเทวินิน การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ( $V_R$ ) จะคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$V_R = \frac{|\vec{E} - \vec{V}|}{|\vec{V}|} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\vec{V}$  คือ เฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลด และ  $\vec{E}$  คือ เฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแหล่งจ่าย ในรูปที่ 3.3 แสดงแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสไหล และแรงดันไฟฟ้าตก เนื่องจากป้อนให้โหลด ถูกกำหนดโดย

$$\Delta V = \vec{E} - \vec{V} = Z_s \vec{I}_L \quad (3.5)$$

โดยที่อิมพีแดนซ์  $Z_s = R_s + jX_s$  จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าปรากฏที่โหลดกับแรงดันและกระแสไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังนี้



$$\bar{S}_L = \bar{V}I_L^* = P_L + jQ_L \tag{3.6}$$

กระแสไหลคหาได้จาก

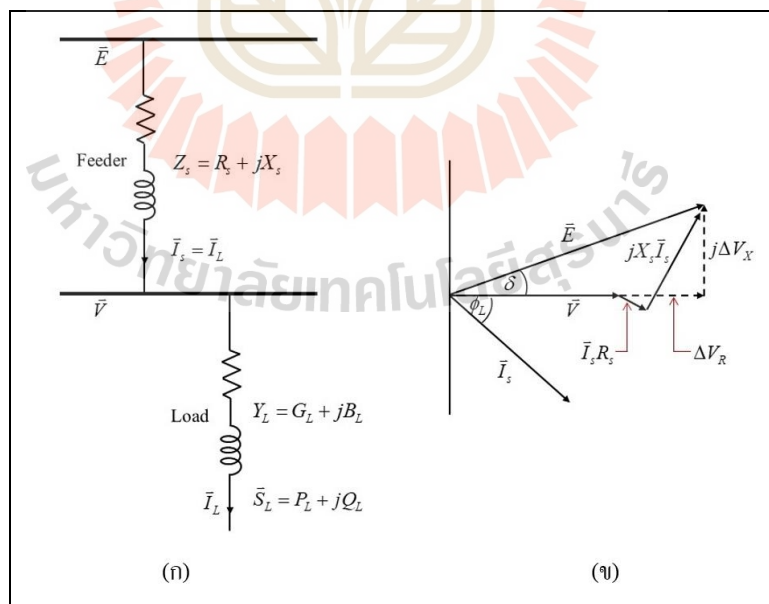
$$I_L = \frac{P_L - jQ_L}{V} \tag{3.7}$$

แทน  $I_L$  จากสมการที่ 3.7 ลงในสมการที่ 3.5 นั่นคือ

$$\Delta V = \bar{E} - \bar{V} = (R_s + jX_s) \left( \frac{P_L - jQ_L}{V} \right) \tag{3.8}$$

$$\Delta V = \frac{R_s P_L + X_s Q_L}{V} + j \frac{X_s P_L - R_s Q_L}{V} \tag{3.9}$$

$$\Delta V = \Delta V_R + j\Delta V_X \tag{3.10}$$



รูปที่ 3.15 (ก) ระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสป้อนให้กับอิมพีแดนซ์ และ (ข) แผนภาพเฟสเซอร์

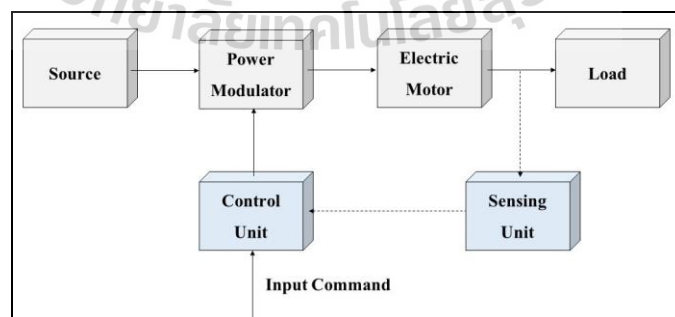
ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่แหล่งจ่ายจึงมีองค์ประกอบสองส่วน คือ เฟสและแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.15 (ก) แรงดันตกคร่อมโหลดที่บัส ( $\bar{V}$ ) ขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย ขนาดและมุมเฟสของกระแสโหลด ซึ่งกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ( $\Delta V_x$ ) ขึ้นอยู่กับการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าต้านกลับของโหลด และอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย ดังแผนภาพเฟสเซอร์ในรูปที่ 3.15 (ข)

### 3.7 ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

การขับเคลื่อนที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลสำหรับการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า ซึ่งในหัวข้อนี้จะนำเสนอพื้นฐานการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าและเทคโนโลยีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้า โดยมีรายละเอียด ดังนี้

#### 3.7.1 หลักการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

การขับเคลื่อนทางไฟฟ้า ดังแผนภาพในรูปที่ 3.16 โหลดทางกลของรถไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของแรงบิดที่สัมพันธ์กับความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า ผลลัพธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบจะได้กำลังงานทางกลที่ใช้เพื่อการเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการแปลงผันกำลังงานไฟฟ้า การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าอาจใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับ ซึ่งขึ้นอยู่กับที่การออกแบบระบบ เพื่อให้ควบคุมลักษณะสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ จะต้องใช้อุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าให้สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ขับเคลื่อน นอกจากนี้ในช่วงการทำงานในสถานะชั่วคราว เช่น การเริ่มเดินเครื่อง การเบรก หรือกลับทิศทางการหมุน เป็นต้น



รูปที่ 3.16 โครงสร้างการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

อุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้าทำหน้าที่จำกัดกระแสของมอเตอร์ไม่ให้เกินค่าที่กำหนด องค์ประกอบที่สำคัญสองส่วน คือ ส่วนตรวจจับสัญญาณป้อนกลับ (Sensing Unit) ทำหน้าที่ตรวจวัดการทำงานของมอเตอร์โดยจะเป็นความเร็วรอบ อัตราเร่งเชิงมุม หรือตำแหน่งการหมุนทางกล เป็นต้น เพื่อใช้ป้อนกลับไปยังชุดควบคุม (Control Unit) สำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์แปลงผันกำลังงานให้ทำงานได้ตามเป้าหมาย การขับเคลื่อนทางไฟฟ้าได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน จุดเด่นที่สำคัญประกอบด้วย

1. รูปแบบการขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น ด้วยพัฒนาการของเทคโนโลยี สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ได้แก่ ไดโอดกำลัง ทรานซิสเตอร์กำลัง ทรานซิสเตอร์กำลัง จีทีโอหรือไอจีบีที (IGBT) เป็นต้น สามารถควบคุมความเร็วรอบ แรงบิด การเริ่มเดินเครื่อง การเบรก และการกลับทางหมุนได้ รวมถึงการควบคุมการทำงานที่เหมาะสมกับลักษณะของงานและการขับเคลื่อนสมรรถนะสูง

2. มีช่วงการควบคุมความเร็วรอบ แรงบิดและกำลังงานที่กว้าง

3. มอเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูง กำลังงานสูญเสียในสภาวะไร้อโหลดต่ำ มีความสามารถทำงานโหลดเกินในช่วงเวลาสั้นได้ อายุการใช้งานยาวนานและการบำรุงรักษาต่ำกว่าตัวต้นกำลังรูปแบบอื่น ๆ

4. สามารถนำมาปรับใช้ในสภาพแวดล้อมการทำงานต่าง ๆ ได้ เช่น ในสถานที่ไวไฟเสี่ยงต่อการระเบิด สถานที่ที่มีแก๊สไวไฟ การทำงานใต้น้ำหรือจมน้ำของไหลบางชนิด และอื่น ๆ

5. ทำงานได้ครบทั้งสี่ฤดูกาล

6. ไม่มีช่วงเวลาอุ่นเครื่อง หรือรอรอบการทำงาน มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถทำงานและจ่ายโหลดได้เต็มพิกัดได้ทันที หลังจากเริ่มเดินเครื่อง

7. ใช้พลังงานไฟฟ้าที่เปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นได้ง่าย มีประสิทธิภาพสูงและประหยัด ด้วยจุดเด่นดังกล่าวทำให้ในปัจจุบัน การขับเคลื่อนที่ใช้ตัวต้นกำลังรูปแบบอื่น ๆ นิยมใช้การเปลี่ยนรูปพลังงานมาเป็นไฟฟ้าแล้วเลือกใช้การขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับทำงาน

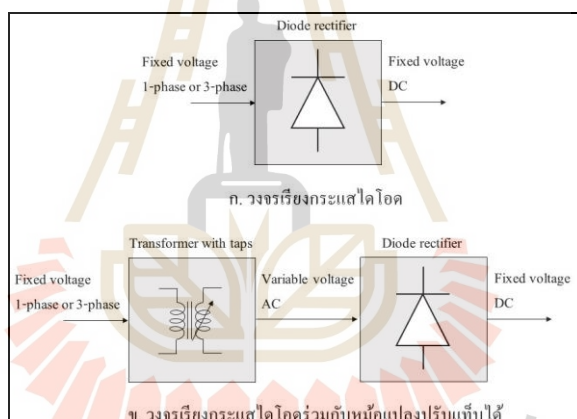
องค์ประกอบหลักของการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า คือ มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้อาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หรือมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในอดีตการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโค่นัสจะเป็นแบบความเร็วคงที่เท่านั้น การขับเคลื่อนแบบแปรเปลี่ยนความเร็วมีราคาสูงเกินไปและบางช่วงความเร็วจะให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ต่ำ ซึ่งการขับเคลื่อนแบบแปรเปลี่ยนความเร็วรอบมักใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นหลัก แต่การพัฒนาเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมาทำให้การขับเคลื่อนแบบแปรเปลี่ยนความเร็วนำมาใช้ได้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโค่นัสในปัจจุบัน ถึงแม้ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับทั้งสองแบบจะมีความซับซ้อนกว่าและมีราคาแพง หากพิจารณาถึงต้นทุนของมอเตอร์ การบำรุงรักษา น้ำหนัก

และขนาดของมอเตอร์แล้วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับจึงมีข้อได้เปรียบอย่างมากในประเด็นเหล่านี้ ราคาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกประมาณ 1 ใน 3 ของราคามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีพิกัดเท่ากัน นอกจากนี้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกไม่ต้องการ การบำรุงรักษา มีพิกัดกำลังงาน ความเร็วรอบและแรงบิดที่สูงกว่าด้วย ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้าเชิง โคน์สชนิดแม่เหล็กถาวรที่มีพิกัดกำลังต่อน้ำหนักที่ดีกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก แต่ปัญหาที่สำคัญของมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรอยู่ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่สูงมาก ทำให้งานขับเคลื่อนขนาดใหญ่มีต้นทุนที่สูง ต้องรอเทคโนโลยีในยุคถัดไปเพื่อให้ราคาลดต่ำกว่านี้ ด้วยปัจจัยต่าง ๆ ทำให้ในปัจจุบันรถไฟฟ้าได้นำการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมาใช้ทดแทนมอเตอร์กระแสตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 1. องค์ประกอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจำแนกการแบ่งประเภทวงจรออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

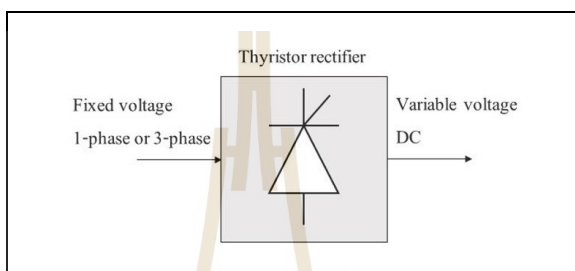


รูปที่ 3.17 วงจรแปลงผันจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยไดโอด

(1) วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลัง (Power Converter) ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง (AC-DC Converter หรือ Rectifier) แหล่งจ่ายที่ใช้อาจเป็นไฟฟ้า 1 เฟส หรือ 3 เฟส ปกติมีขนาดแรงดันและความถี่คงที่ ในกรณีที่ใช่วงจรเรียงกระแสไดโอดจะได้แรงดันกระแสตรงด้านเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงค่าไม่ได้ เรียกว่า “วงจรเรียงกระแสชนิดไม่ถูกควบคุม” ดังรูปที่ 3.5 (ก) การควบคุมค่าแรงดันด้านกระแสตรง อาจใช้การปรับเปลี่ยนแรงดันทางด้านกระแสสลับด้วยการปรับเทียบหม้อแปลงเข้าช่วย ดังรูปที่ 3.5 (ข) การปรับเทียบนี้จะทำได้ไม่ต่อเนื่องแรงดันด้านกระแสตรงจะเปลี่ยนได้ไม่ต่อเนื่องเช่นกัน โดยค่าแรงดันกระแสตรงจะสัมพันธ์กับการปรับเทียบของหม้อแปลงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันกระแสตรงของวงจรเรียงกระแสแบบต่อเนื่อง

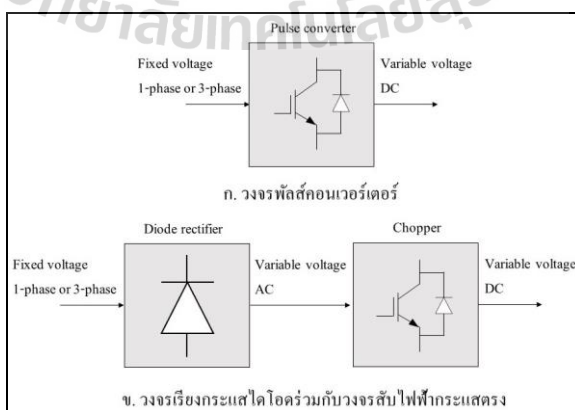
ต้องรอเทคโนโลยีไทรสเตอร์เพื่อสร้างวงจรเรียงกระแสแบบควบคุมเฟส ซึ่งมีทั้งชนิดการทำงานแบบทวิภาค และแบบเอกภาค ดังแสดงในรูปที่ 3.17

การควบคุมวงจรเรียงกระแสที่ใช้อุปกรณ์หยุดเรียงกระแสด้วยตัวเอง (Self-Commutated Device) เช่น ทรานซิสเตอร์กำลัง จีทีโอ หรือไอจีบีที ทำให้เกิดวงจรเรียงกระแสที่ทำงานได้แบบจตุภาคหรืออาจใช้โครงสร้างของวงจรที่ใช้วงจรเรียงกระแสชนิดไม่ถูกควบคุมเพื่อสร้างแรงดันกระแสตรงคงที่ จากนั้นใช้วงจรสับไฟฟ้ากระแสตรงควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.18



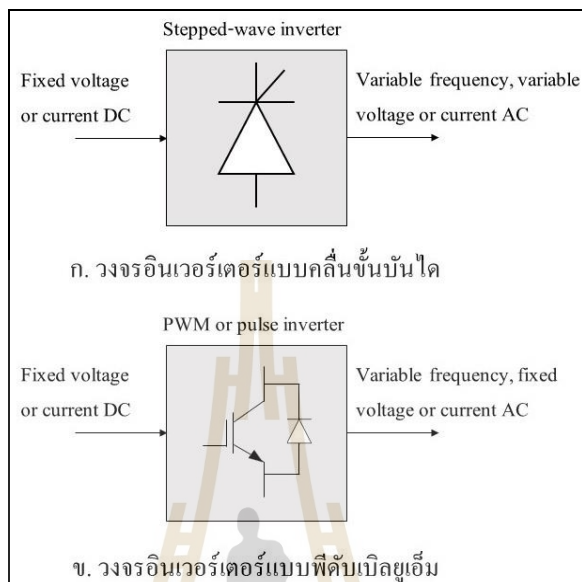
รูปที่ 3.18 วงจรแปลงผันจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงด้วยไทรสเตอร์

(2) วงจรอินเวอร์เตอร์กำลัง (Power Inverter) ทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกระแสสลับ (DC-AC converter หรือ Inverter) แบ่งตามเทคโนโลยีการสวิตช์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ คือ อินเวอร์เตอร์แบบคลื่นขั้นบันได (Stepped-Wave Inverter) ด้วยเทคโนโลยีไทรสเตอร์ สำหรับขับเคลื่อนแบบเปลี่ยนความถี่ได้ และอินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีเอ็ม (PWM Inverter) ด้วยเทคโนโลยีอุปกรณ์หยุดนำกระแสด้วยตัวเอง เช่น IGBT หรือ GTO เป็นต้น



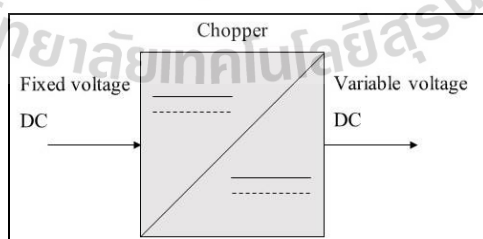
รูปที่ 3.19 วงจรแปลงแปลงผันไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์หยุดนำกระแสด้วยตัวเอง

สามารถขับเคลื่อนแบบปรับเปลี่ยนได้ทั้งความถี่และขนาด มีสองชนิด คือ อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน VSI และอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส CSI ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 วงจรอินเวอร์เตอร์กำลัง

(3) วงจรสับไฟฟ้า (DC-DC Converter or Chopper) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกระแสตรงใช้สำหรับการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันกระแสตรงจากแหล่งจ่ายที่มีขนาดแรงดันคงที่เพื่อให้แรงดันด้านเอาต์พุตปรับเปลี่ยนค่าการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.21

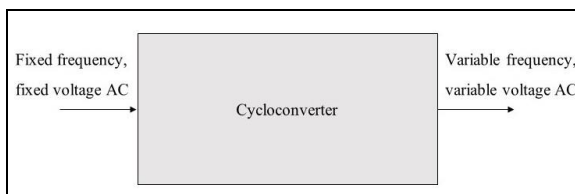


รูปที่ 3.21 วงจรสับไฟฟ้า

(4) วงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (Cyclo converter) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับใช้สำหรับปรับเปลี่ยนค่าแรงดันกระแสสลับที่มีขนาดแรงดัน



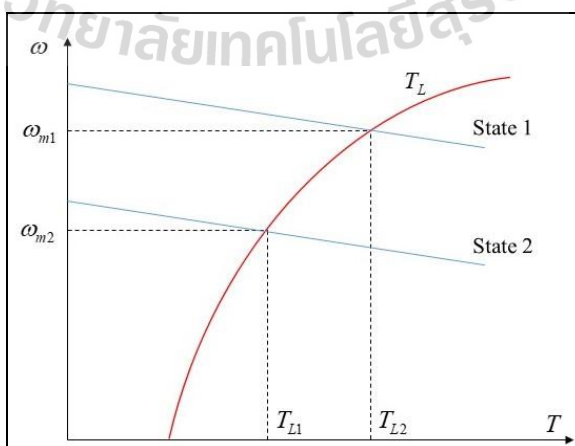
และความถี่ที่ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ปรับเปลี่ยนความถี่ได้ ด้วยเทคโนโลยีไทรสเตอร์กำลัง เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 วงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์

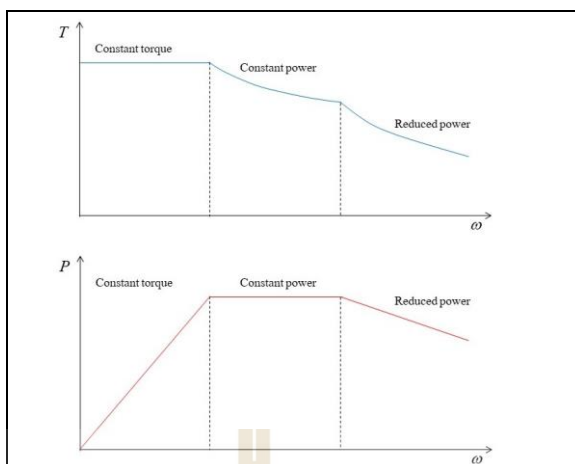
## 2. การควบคุมในงานขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

การขับเคลื่อนทางไฟฟ้าจำเป็นต้องมีระบบควบคุม โดยมีเป้าหมายการขับเคลื่อนในรูปแบบต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ อาจใช้การควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open-Loop) หรือวงรอบปิด (Close-Loop Control) การขับเคลื่อนทางไฟฟ้านี้จะมามีการทำงาน 3 สถานะ ประกอบด้วย สถานะคงตัว (Steady-State) สถานะเร่งและเริ่มเดินเครื่อง (Acceleration Including Starting) และ สถานะหน่วงและหยุดเครื่อง (Deceleration Including Stopping) การทำงานในสถานะคงตัวเกิดขึ้นเมื่อแรงบิดของมอเตอร์สมดุลกับแรงบิดของโหลด การทำงานในสถานะคงตัวที่ความเร็วรอบที่กำหนดพิจารณาได้จากการปรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วยรอบของระบบขับเคลื่อนที่ใช้งานที่จุดทำงานในสถานะคงตัวใด ๆ จะมีความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วยรอบ เช่น  $(T_{L1}, \omega_{m1})$  หรือ  $(T_{L2}, \omega_{m2})$  ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วยรอบ

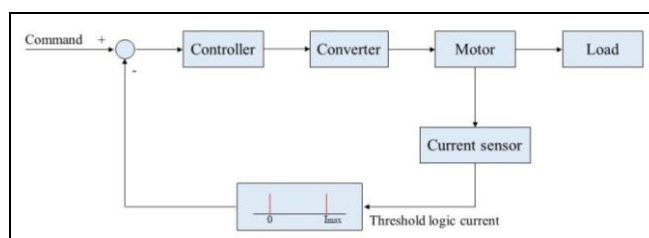
การเปลี่ยนสภาวะการทำงานจากสภาวะหนึ่งไปยังอีกสภาวะหนึ่ง ต้องการการทำงานในช่วงเปลี่ยนสภาวะอาจเป็นการเร่งหรือการหน่วง ในกรณีการเร่งเป็นผลมาจากความพยายามเปลี่ยนสภาวะการทำงานจากความเร็วรอบต่ำไปทำงานที่สภาวะความเร็วรอบสูง ในสภาวะการเร่งนี้มอเตอร์จะสร้างแรงบิดให้มากกว่าค่าโหดจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบภายในเวลาที่มากหรือน้อย มีผลมาจากค่าโมเมนต์ของระบบ สภาวะการเร่งนี้จะเพิ่มแรงบิดของมอเตอร์ให้สูงขึ้น โดยแรงบิดจะสัมพันธ์กับกระแสของมอเตอร์ทำให้กระแสมอเตอร์สูงขึ้นด้วยการเร่งความเร็วควรคำนึงถึงค่าการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าด้วย หากการเร่งความเร็วใช้ระยะเวลายาวนาน กระแสมอเตอร์ไม่ควรสูงเกินค่าพิกัด ทำให้อัตราเร่งไม่สามารถใช้ค่าที่สูงมากเกินไป หากการเร่งใช้เวลาไม่นานอาจยอมให้กระแสไฟฟ้าสูงกว่าค่าพิกัดได้ ส่วนการเริ่มเดินเครื่องถือว่าเป็นเงื่อนไขของการเร่งที่เริ่มต้นจากสภาวะหยุดนิ่ง จะทำให้กระแสในสภาวะเริ่มเดินเครื่องสูงกว่าค่าพิกัดมากอาจสูงถึง 6-8 เท่า ในมอเตอร์บางประเภท ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้วงจรพิเศษสำหรับควบคุมกระแสขณะเริ่มเดินเครื่อง เช่น ใช้ตัวต้านทานเริ่มเดินเครื่อง (Resistance Start) หรือใช้การเริ่มเดินเครื่องแบบนิ่มนวล (Soft Start) กรณีการหน่วงหรือเบรก มอเตอร์จะทำงานในรูปของการลดความเร็วโดยการลดแรงบิดลง หากต้องการหยุดเครื่อง แรงบิดจะถูกลดลงเหลือศูนย์ การเบรคนี้อาจเป็นการเบรกทางกล (Mechanical Braking) การเบรกทางไฟฟ้า (Electric Braking) หรือการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (Regenerative Braking) ก็ได้ การเบรกทางกลอาจมีข้อด้อย เช่น มีการสึกกร่อนสูง บำรุงรักษาบ่อย อายุการใช้งานของระบบเบรกสั้น และมีการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนสูง ส่วนการเบรกทางไฟฟ้าเหมาะกับระบบที่ต้องการรูปแบบเบรกที่ราบเรียบไม่เกิดการกระตุก มีความแม่นยำสูง และให้หยุดได้เร็วกว่า ในงานรถไฟฟ้การเบรกทางไฟฟ้าช่วยให้เบรกนุ่มนวลไม่กระทบต่อคุณภาพการให้บริการผู้โดยสาร การควบคุมระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า ประกอบด้วย การควบคุมแรงบิด และความเร็วรอบเป็นหลัก แต่เนื่องจากการทำงานในสภาวะเร่งหรือหน่วงมีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้า การควบคุมกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จึงเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมด้วย การขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามีหลากหลายการประยุกต์ใช้งาน ยานการทำงานอาจแคบในช่วงความเร็วรอบพิกัด หรือกว้าง จากหยุดนิ่งถึงความเร็วพิกัด การขับเคลื่อนแบบปรับเปลี่ยนความเร็วได้หรือเรียกว่าการขับเคลื่อนด้วยแรงบิดคงที่ คือ มีความสามารถการให้แรงบิดสูงสุดมีค่าคงที่ในย่านการทำงานที่พิจารณา ซึ่งไม่ใช่ค่าแรงบิดเอาต์พุตของมอเตอร์ที่ทำงาน ในทำนองเดียวกันการขับเคลื่อนในย่านกำลังงาน ในลักษณะเดียวกันกับการขับเคลื่อนในย่านแรงบิดคงที่ ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ย่านการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า

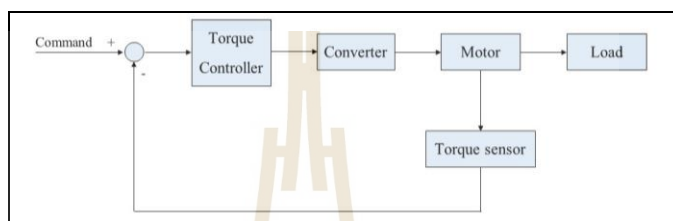
การควบคุมระบบขับเคลื่อนแบบวงรอบปิด เพื่อให้การควบคุมเป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ เป้าหมายหลักเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการควบคุม การเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนอง หรือการป้องกันความปลอดภัยของระบบ รูปแบบการควบคุมแบบวงปิดหรือแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ที่ใช้งานสำหรับระบบขับเคลื่อน ประกอบด้วย

(1) การควบคุมขีดจำกัดกระแสไฟฟ้า (Current-Limit Control) ดังรูปที่ 3.25 เป็นรูปแบบการควบคุมเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสเกินในสภาวะการทำงาน หากกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์เกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ การป้อนกลับจะถูกป้องกันไม่ให้ขับเคลื่อนมอเตอร์เกินขีดจำกัดนี้ จะทำให้กระแสเกิดการแกว่งตัวรอบ ๆ ขีดจำกัด จนกว่าแนวโน้มของกระแสไฟฟ้าจะต่ำกว่าขีดจำกัดการป้อนกลับจะทำงานได้ตามปกติ ตัวควบคุมกระแสที่ใช้อาจเป็นตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือพี (Proportional หรือ P control) ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI control) ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID control) หรือรูปแบบอื่น ๆ



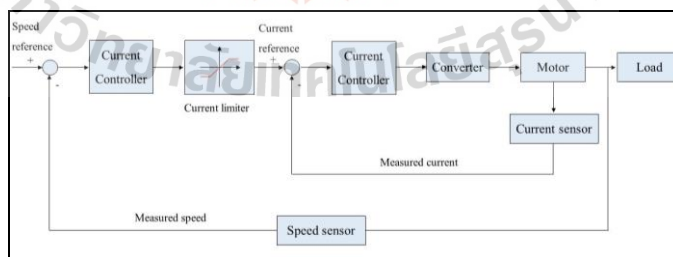
รูปที่ 3.25 การควบคุมขีดจำกัดกระแสไฟฟ้า

สำหรับรถรางหรือรถไฟฟ้า ผู้ขับกดคันเร่งเพื่อตั้งค่าแรงบิดอ้างอิง ภายใต้การควบคุมแรงบิดแบบวงปิดจะทำให้แรงบิดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามค่าอ้างอิง ดังรูปที่ 3.26 การควบคุมความเร็วในกรณีที่ผู้ขับจะถูกปรับเปลี่ยนตามคันเร่งขึ้นอยู่กับสภาพการจราจร สภาพถนน สภาพของรถไฟฟ้า หรือขีดจำกัดความเร็วที่กำหนดในเส้นทางที่ขับผ่าน เป็นต้น ตัวควบคุมแรงบิดที่ใช้อาจเป็นตัวควบคุมแบบพี (Proportional หรือ P control) ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI control) ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID control) หรือรูปแบบอื่น ๆ ตามความเหมาะสม



รูปที่ 3.26 การควบคุมแรงบิดแบบวงปิด

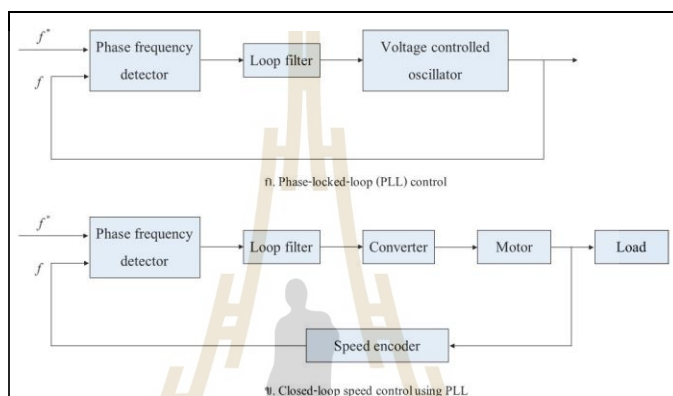
(2) การควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิด (Closed-Loop Speed Control) การควบคุมแบบนี้ใช้แพร่หลายในการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า โดยจะมีวงรอบของการควบคุมกระแสอยู่ด้านในอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแอสของมอเตอร์เกินขีดจำกัดที่กำหนด ดังรูปที่ 3.25 ตัวควบคุมแรงบิดที่ใช้อาจเป็นตัวควบคุมแบบพี (Proportional หรือ P control) ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI control) ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID control) หรือรูปแบบอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม



รูปที่ 3.27 การควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิด

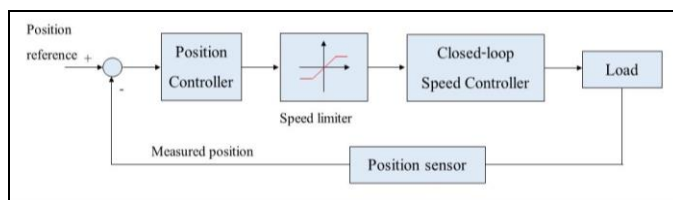
(3) การควบคุมแบบเฟสล็อกกลูป (Phase-Locked-Loop Control) เป็นการควบคุมที่ทำให้การคุมค่าความเร็วได้แม่นยำประมาณ 0.002 % ในขณะที่การใช้งานตัวควบคุมแบบพีไอจะมี

ความแม่นยำ 0.2 % เท่านั้น ภายใต้เงื่อนไขความไม่สมบูรณ์แบบของตัววัดความเร็ว หลักการทำงาน ประกอบด้วยชุดสร้างพัลส์จำนวน 2 ชุด เป็นสัญญาณพัลส์ของความถี่อ้างอิง  $f^*$  หนึ่งชุด และสัญญาณพัลส์ของความถี่  $f$  จากตัวป้อนกลับ ความแตกต่างของเฟสจากสัญญาณพัลส์ทั้งสองชุด จะถูกปรับแต่งเพื่อควบคุมค่าแรงดันสำหรับ VCO (Voltage Controlled Oscillator) เพื่อลดความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองชุด เมื่อระบบควบคุมแบบเฟสล็อกถูกป้อนเข้าสู่การทำงานในสภาวะคงตัวสัญญาณพัลส์ทั้งสองชุดจะเท่ากันเรียกว่า “การล็อกเฟสของสัญญาณ” ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 การควบคุมความเร็วรอบด้วยเฟสล็อก

(4) การควบคุมตำแหน่งแบบวงรอบปิด (Closed-Loop Position Control) จะมีวงรอบของการควบคุมความเร็วรอบอยู่ด้านในอีกชั้นหนึ่ง มีการควบคุมกระแสและความเร็วรอบไม่ให้เกินขีดจำกัดที่กำหนด ดังรูปที่ 3.29 นอกจากนี้ยังช่วยขจัดเศษผลของความเสียดทาน ความไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ ของระบบ ผลจากความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์อันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว



รูปที่ 3.29 การควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับ

### 3. การเลือกพิกัดมอเตอร์ในงานขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

การเลือกพิกัดมอเตอร์สำหรับระบบขับเคลื่อนพิจารณาจากค่าโหลดที่เกิดจากความร้อนขณะทำงาน ผลดังกล่าวจะช่วยเลือกพิกัดกำลังการทำงานของมอเตอร์ที่เหมาะสม รวมถึงการเลือกชั้นของฉนวนขดลวดของมอเตอร์ด้วย มาตรฐานอุณหภูมิขดลวดใช้งานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ สายไฟฟ้า และหม้อแปลง กำหนดในมาตรฐาน IEC 60085 : Electrical Insulation - Thermal Evaluation and Designation ปรับปรุงปี ค.ศ. 2007 แบ่งระดับชั้นตามค่าสูงสุดของอุณหภูมิจุดร้อน (Hotspot) เป็นตัวเลขแทนตัวอักษรระดับชั้นฉนวนของบริภัณฑ์ไฟฟ้า ดังตารางที่ 3.6

(1) แบบจำลองทางความร้อนของมอเตอร์ การคำนวณเพื่อพยากรณ์อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของขดลวดมอเตอร์ มีความจำเป็นต่อการเลือกพิกัดมอเตอร์ ในขณะที่เดียวกัน การคำนวณนี้มีความยุ่งยาก และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องซับซ้อน อันเนื่องจากรูปทรงทางเรขาคณิตของมอเตอร์วัสดุที่ใช้ไม่ใช่น้ำเป็นเนื้อเดียวกันและมีหลายองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามความแตกต่างของค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้สร้างมอเตอร์ไม่แตกต่างกันมากนัก การนำแบบจำลองอย่างง่ายมาใช้เพื่อประเมินอุณหภูมิของฉนวนไฟฟ้าในขณะที่ทำงานอาจทำได้ด้วยค่าความถูกต้องในระดับหนึ่งซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้งานเพื่อเลือกระดับชั้นของฉนวน และขีดจำกัดของอุณหภูมิการทำงานสูงสุดของมอเตอร์

ตารางที่ 3.6 มาตรฐานอุณหภูมิขดลวดไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60085

IEC 60085 (2007)	IEC 60085 (old)	Maximum hotspot temperature (°C)	Relative thermal endurance index (°C)
70		70	< 90
90	Y	90	90 - 105
105	A	105	105 - 120
120	E	120	120 - 130
130	B	130	130 - 155
155	F	155	155 - 180
180	H	180	180 - 200
200		200	200 - 220
220		220	220 - 250
250		250	> 250



กำหนดมอเตอร์ไฟฟ้ามีโครงสร้างเป็นวัสดุแบบเนื้อเดียว โดยมีมวล  $M$  ค่าความร้อนจำเพาะ  $h$  (Specific Heat,  $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ ) พื้นที่ระบายความร้อน  $A$  (Cooling Surface Area,  $\text{m}^2$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน  $\delta$  (Coefficient of Heat Transfer,  $\text{J/s/m}^2^\circ\text{C}$ ) และให้  $\theta$  แทนค่าอุณหภูมิ ( $^\circ\text{C}$ ) จะได้สมการสมดุลทางความร้อนดังต่อไปนี้

$$Mh \frac{d\theta}{dt} = H_1 - H_2 \quad (3.11)$$

โดยที่  $H_1$  คือ ค่าความร้อนที่สร้างขึ้นในโครงสร้าง  
 $H_2$  คือ ค่าความร้อนที่ระบายออกจากโครงสร้าง ( $H_2 = \theta dA$ )

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$C \frac{d\theta}{dt} = H_1 - D\theta \quad (3.12)$$

เมื่อ  $C$  แทนค่า  $Mh$  เรียกว่า “ความจุความร้อนของมอเตอร์ (Thermal Capacity)”  
 $D$  แทนค่า  $dA$  เรียกว่า “ค่าคงตัวการกระจายความร้อน (Heat Dissipation Constant)”  
 โดยทั่วไปมีค่าประมาณ  $40\text{-}600 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$

สมการที่ 3.12 เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับหนึ่ง มีผลเฉลยในรูปทั่วไปดังสมการต่อไปนี้

$$\theta = \theta_{ss} (1 - e^{-t/\tau}) + \theta_1 e^{-t/\tau} \quad (3.13)$$

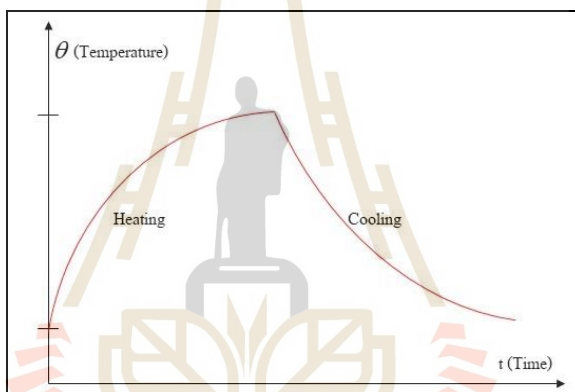
โดยที่  $\theta_{ss}$  คือ อุณหภูมิเพิ่ม (Steady-State Temperature Rise) ในสภาวะคงตัว  
 $\tau$  คือ ค่าคงตัวของเวลาของการให้ความร้อน (Initial Temperature Rise)

ในทำนองเดียวกัน เมื่อมอเตอร์ลดค่าการขับโหลดจะทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นลดน้อยลง มีการถ่ายโอนความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม อุณหภูมิของมอเตอร์จะลดลงซึ่งในกระบวนการนี้มอเตอร์จะเย็นตัวลง ในกรณีนี้อัตราการเย็นตัวลงอาจไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากับอัตราการให้

ความร้อนของมอเตอร์ต้องพิจารณาจากลักษณะสมบัติของมอเตอร์จากผู้ผลิตกำหนดให้พารามิเตอร์ สำหรับการเย็นตัวของมอเตอร์แทนด้วยตัวอักษรเดียวกันกับพารามิเตอร์การให้ความร้อน แต่เพิ่มเครื่องหมาย “'” เพื่อบ่งชี้ความแตกต่างจะได้สมการเย็นตัวของอุณหภูมิขดลวดมอเตอร์ ดังสมการที่ 3.6 และแผนภาพการให้ความร้อนและคายความร้อนของมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.30

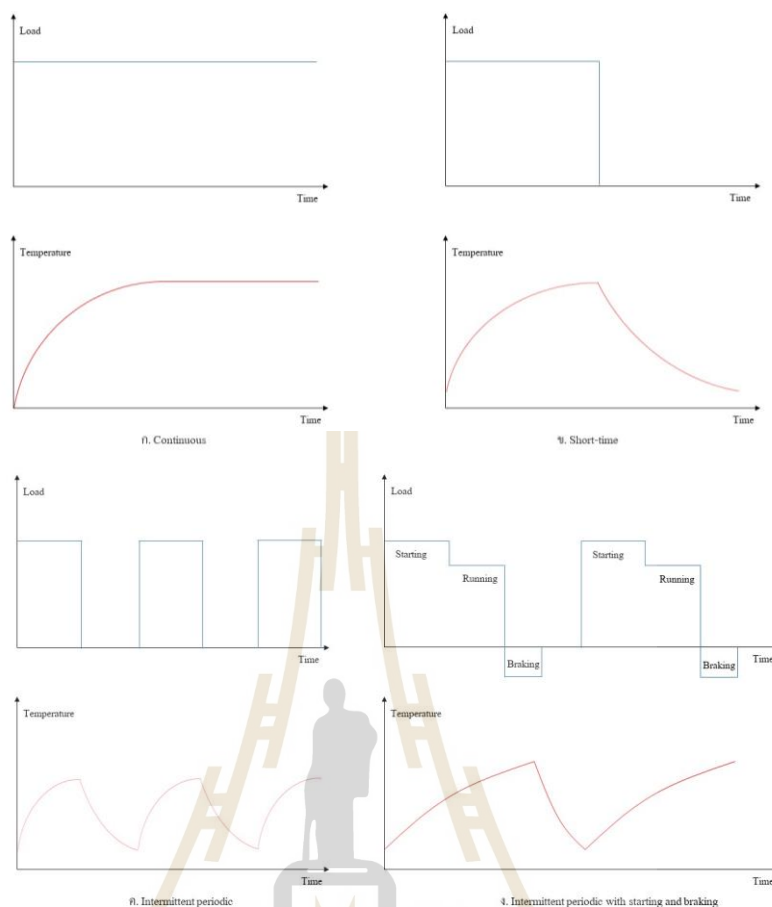
$$\theta = \theta'_{ss} (1 - e^{-t/\tau'}) + \theta_2 e^{-t/\tau'} \quad (3.14)$$

โดยที่  $\theta_2$  คือ ค่าอุณหภูมิเพิ่มในขณะเริ่มต้น เมื่อ  $t = 0$  s ก่อนที่จะเริ่มเย็นตัวลง  
 $\tau'$  คือ ค่าคงตัวเวลาของการเย็นตัว (Cooling Time Constant)



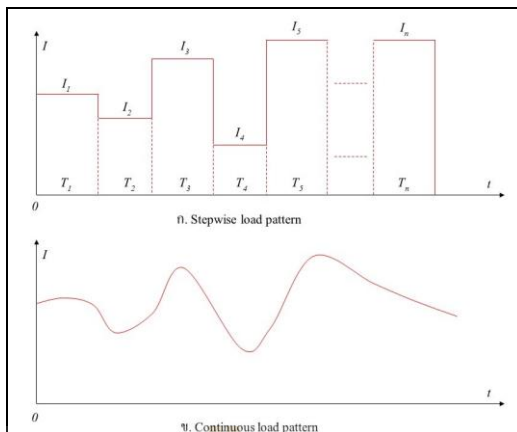
รูปที่ 3.30 ลักษณะสมบัติการให้ความร้อนและการเย็นตัวของมอเตอร์

(2) การคำนวณหาค่าพิกัดของมอเตอร์พิจารณาจากลักษณะการขับโหลด โดยการขับโหลดรูปแบบที่แตกต่างกันส่งผลต่อลักษณะสมบัติทางอุณหภูมิของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.29 รูปแบบการขับโหลดมีความหลากหลายจากรูปที่ 3.31 แสดงการขับโหลดแบบต่อเนื่อง (Continuous Load) การขับโหลดในช่วงเวลาสั้น (Short-Time Load) การขับโหลดไม่ต่อเนื่องเป็นรายคาบ (Intermittent Periodic Load) และมีการเริ่มเดินเครื่อง การหยุดเดินเครื่อง (Intermittent Periodic Load with Starting and Braking)



รูปที่ 3.31 การขับโหลดรูปแบบต่าง ๆ ของมอเตอร์

การพิจารณาพิภคของมอเตอร์ในกรณี โหลดต่อเนื่องคำนวณง่าย โดยใช้พิภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ขณะขับ โหลด และให้ใช้ตัวประกอบสำหรับการออกแบบเพื่อเพื่อ โหลดไว้เล็กน้อย อาจเพื่อไว้ประมาณ 10-50 % ตามความเหมาะสม ความยุ่งยากในการเลือกพิภคมอเตอร์พบในกรณีที่ขับโหลดไม่ต่อเนื่องรูปแบบต่าง ๆ เนื่องจากโหลดมีความไม่ต่อเนื่อง ทำให้ไม่สามารถใช้พิภคสูงสุดของโหลดได้ เนื่องจากจะทำให้มอเตอร์ที่ได้มีพิภคมากเกินไป ไม่ประหยัด หากเลือกน้อยเกินไปจะทำให้อายุการใช้งานสั้น ส่งผลกระทบต่อการบำรุงรักษาและผลผลิตที่ได้จากการทำงานของมอเตอร์ การคำนวณตัวแทนของกระแส แรงบิด และกำลังงานของมอเตอร์ในกรณีของการขับ โหลดแบบไม่ต่อเนื่อง ทำได้โดยการคำนวณค่ารากของผลรวมกำลังสอง (Root Mean Square: rms) ของปริมาณที่พิจารณา ค่ากระแสมอเตอร์สามารถแบ่งช่วงการขับโหลดออกเป็นชั้นได้ดังรูปที่ 3.32 การคำนวณสามารถใช้สมการที่ 3.15 ส่วนกรณีที่กระแสมีความต่อเนื่องจะใช้สมการที่ 3.16



รูปที่ 3.32 กระแสโหลดของมอเตอร์

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_1^2 T_1 + I_2^2 T_2 + \dots + I_n^2 T_n}{T_1 + T_2 + \dots + T_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 T_i}{\sum_{i=1}^n T_i}} \tag{3.15}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \tag{3.16}$$

ค่ากระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้นี้ สามารถนำมาใช้เลือกฟักัดของกระแสมอเตอร์ได้ นั่นคือ  $I_{rated} = I_{rms}$  โดยให้เลือกฟักัดที่มีจำหน่ายในท้องตลาดให้พอดีหรือมากกว่าขนาดที่คำนวณได้หนึ่งขั้น จากนั้นให้นำฟักัดที่ได้มาพิจารณา ดังนี้

กรณีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะยอมให้มอเตอร์ทำงานโหลดเกินได้ในช่วงเวลาสั้น การออกแบบโดยทั่วไปจะยอมให้ทำงานได้เกินค่ากระแสฟักัดที่เลือกไว้ได้ประมาณไม่เกิน 2 เท่า (มอเตอร์ที่ถูกออกแบบพิเศษอาจทำงานโหลดเกินได้ถึง 3.0-3.5 เท่า) เนื่องจากความเสียหายผลการอาร์กที่เกิดขึ้นระหว่างแปรงถ่านกับคอมมิวเตเตอร์ การพิจารณาจะใช้ตัวประกอบ  $\lambda$  โดยที่  $\lambda = 2$  สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$\lambda \geq \frac{I_{max}}{I_{rated}} \tag{3.17}$$

โดยที่  $I_{max}$  เป็นค่ากระแสทำงานสูงสุดของมอเตอร์

หากการเลือกพิกัดมอเตอร์ไม่สอดคล้องกับสมการที่ 3.9 ต้องทำการเลือกพิกัดกระแสมอเตอร์ใหม่ โดยใช้สมการที่ดัดแปลงจากสมการที่ 3.17 ดังนี้

$$I_{rated} \geq \frac{I_{max}}{\lambda} \quad (3.18)$$

กรณีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส นอกจากพิกัดค่ากระแสไฟฟ้าแล้ว ค่าแรงบิดทำงานสูงสุดของมอเตอร์ต้องไม่เกินค่าแรงบิดเบรคดาวน์ของมอเตอร์ (Breakdown Torque) มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีอัตราส่วนแรงบิด ( $\lambda$ ) ประมาณ 1.65-3 เท่า หรือ 2-2.25 เท่า ในกรณีของมอเตอร์ซิงโครนัส ดังสมการต่อไปนี้

$$\tau_{rated} \geq \frac{\tau_{max}}{\lambda'} \quad (3.19)$$

เมื่อโหลดมีความแปรผันตามเวลาทำให้การเลือกพิกัดแรงบิดของมอเตอร์ต้องพิจารณาค่าที่เป็นตัวแทนแรงบิดที่เหมาะสม ค่า rms ของแรงบิด จะได้สมการแรงบิดดังนี้

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\tau_1^2 T_1 + \tau_2^2 T_2 + \dots + \tau_n^2 T_n}{T_1 + T_2 + \dots + T_n}} \quad (3.20)$$

และเมื่อมอเตอร์ขับโหลดที่ความเร็วรอบคงที่จะทำให้กำลังงานมอเตอร์แปรผันตรงกับแรงบิด จะได้การคำนวณกำลังงานของมอเตอร์ตามสมการดังนี้

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{P_1^2 T_1 + P_2^2 T_2 + \dots + P_n^2 T_n}{T_1 + T_2 + \dots + T_n}} \quad (3.21)$$

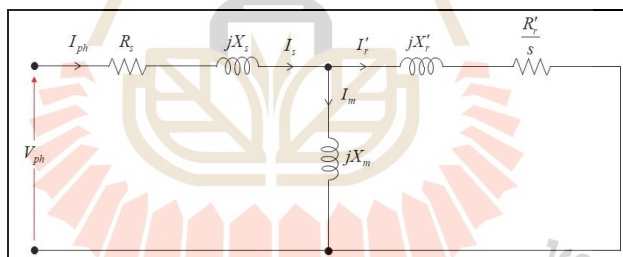
### 3.7.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอดีตเน้นที่การประยุกต์ใช้งานที่มีความเร็วรอบคงที่เป็นหลัก เนื่องจากวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิมทำได้ยาก มีประสิทธิภาพต่ำและราคาแพง ทำให้งานการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบนิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แต่ปัญหาของการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ การบำรุงรักษาคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านที่สึกกร่อนจากการใช้งาน นอกจากนี้

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไม่เหมาะสมกับงานที่มีความเสี่ยงต่อการใช้งานในสถานที่ที่มีความสกปรกหรือสารก่อให้เกิดความกัดกร่อนจนกระทั่งการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำไทรสเตอร์ ไอจีบีทีกำลังและจีทีโอ ทำให้ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำปรับเปลี่ยนความเร็วรอบได้เริ่มแพร่หลายแต่มีราคาแพง ในปัจจุบันด้วยข้อดีบางประการของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหนือกว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่งผลให้งานขับเคลื่อนในอุตสาหกรรมหนัก เช่น พัดลม งานรีดเหล็ก การขับเคลื่อนรถไฟ งานที่มีสภาวะแวดล้อม การทำงานที่สกปรก หรือการกัดกร่อนสูง เป็นต้น งานลักษณะนี้นิยมใช้การขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 1. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบ่งตามโครงสร้างเป็น 2 ประเภท ได้แก่ มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel-Cage Induction Motor) และมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ขดลวด (Wound-Rotor Induction Motor) โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกจะสร้างโรเตอร์ด้วยตัวนำหล่อด้วยโลหะทองแดง หรืออลูมิเนียมเป็นแท่งยาวแล้วปิดหัวท้ายด้วยวงแหวนลวดวงจร ภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ขดลวดจะทำการพันขดลวด 3 เฟสไว้บนแกนโรเตอร์ตามขั้วแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของขดลวดสเตเตอร์



รูปที่ 3.33 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แสดงในรูปที่ 3.33 พารามิเตอร์  $R'_r$  และ  $X'_r$  เป็นค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำของวงจรโรเตอร์ที่ย้ายจากด้านสเตเตอร์ การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสัมพันธ์กับค่าสลิป (Slip:  $s$ ) ที่นิยามดังสมการต่อไปนี้

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (3.22)$$



$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad (3.23)$$

เมื่อ  $\omega_s$  คือ ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)  
 $p$  คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

พิจารณาวจรสมมูลอย่างย่อในรูปที่ 3.31 คำนวณหาขนาดของกระแสสเตเตอร์และแรงบิดที่ถูกสร้างขึ้นที่เพลของมอเตอร์ได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$I_s = \frac{V}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_s + X'_r)^2}} \quad (3.24)$$

$$T = \frac{3}{\omega_s} \left\{ \frac{V^2 \left(\frac{R'_r}{s}\right)}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_s + X'_r)^2} \right\} \quad (3.25)$$

แรงบิดสูงสุดแสดงดังสมการที่ 3.24 พิจารณาได้จากการหาค่าอนุพันธ์และกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ แก่สมการจะได้ค่าสลิปที่แรงบิดสูงสุด เมื่อแทนค่าสลิปที่ได้ลงในสมการที่ 3.25 จะได้แรงบิดสูงสุดดังสมการต่อไปนี้

$$S_{T,\max} = \pm \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X'_r)^2}} \quad (3.26)$$

$$T_{\max} = \frac{3}{2\omega_s} \left\{ \frac{V^2}{R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (X_s + X'_r)^2}} \right\} \quad (3.27)$$

## 2. การควบคุมแหล่งจ่ายแบบปรับความถี่ได้

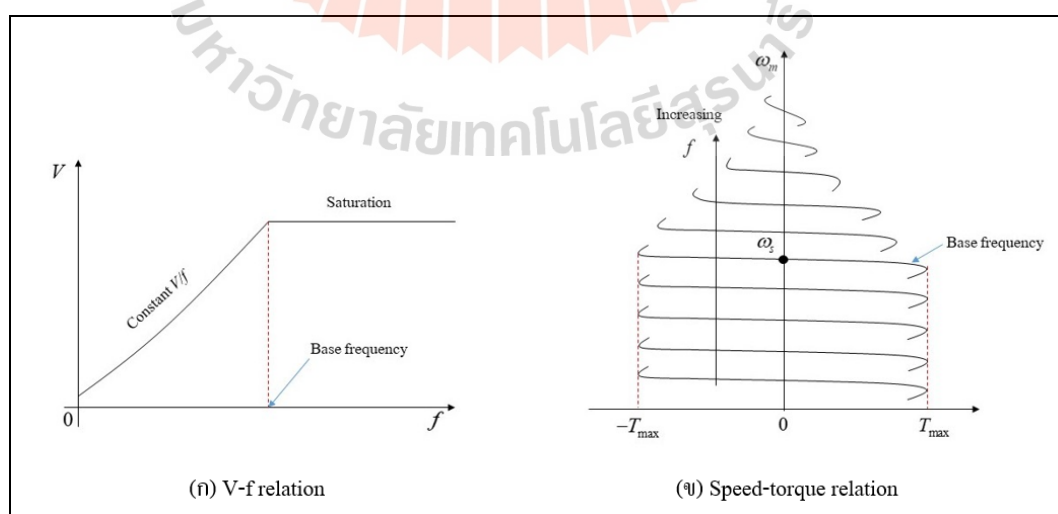
การควบคุมแหล่งจ่ายแบบปรับความถี่ได้ความเร็วซิงโครนัสสามารถปรับเปลี่ยนได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่ถูก

เหนี่ยวนำที่สเตเตอร์เป็นผลคูณของความถี่ทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าและฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศ (Air-Gap Flux) ดังนั้นเมื่อลดค่าความถี่ทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยไม่ลดขนาดแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากการออกแบบจุดทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะออกแบบให้ทำงานเต็มพิกัดที่จุดเปลี่ยนของเส้น โคงแม่เหล็กของวัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็ก การลดความถี่โดยไม่เปลี่ยนขนาดแรงดันจะส่งผลให้จุดทำงานเลื่อนไปอยู่ในย่านอิ่มตัวส่งผลให้เกิดการบิดเบี้ยวของรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็กและในขดลวดทองแดง รวมทั้งการสูญเสียพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ จากสมการที่ 3.26 จัดรูปความสัมพันธ์ใหม่โดยพิจารณาตัวแปรความถี่ทำงาน  $f$  เพิ่มเติมจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$T_{\max} = \frac{K(V/f)^2}{\frac{R_s}{f} \pm \left(\frac{R_s}{f}\right)^2 + 4\pi^2(L_s + L_r')^{1/2}} \quad (3.28)$$

$$T_{\max} = \pm \frac{K(V/f)^2}{2\pi(L_s + L_r')} \quad (3.29)$$

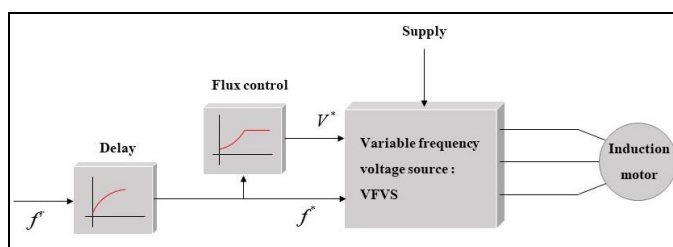
เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงตัวที่เกิดจากการจัดรูปสมการ  
 $L_s, L_r'$  แทนค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์และ โรเตอร์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.34 ลักษณะสมบัติการควบคุมแหล่งจ่ายปรับความถี่ได้

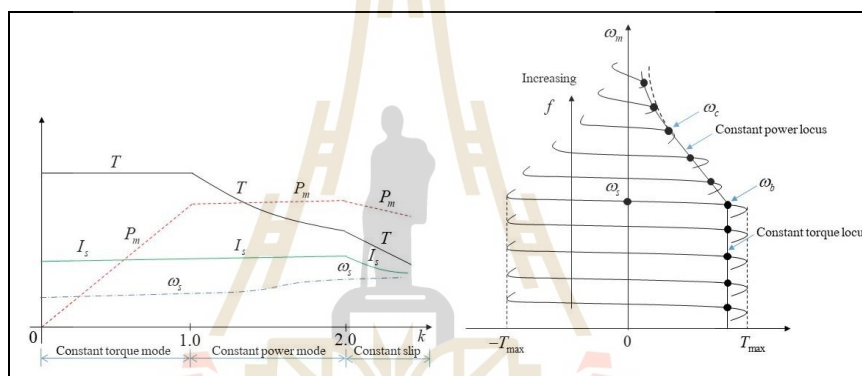
จากสมการที่ 3.28 การทำงานที่ความถี่สูงส่งผลให้สมการลดรูปลงเหลือความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.29 การรักษาค่าอัตราส่วนของขนาดแรงดันต่อความถี่ทำงาน (Volt-per-Hertz Ratio:  $V/f$  ratio) จะทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สร้างขึ้นมีค่าคงที่ ทำให้การทำงานในย่านความถี่ต่ำมอเตอร์สามารถรักษาแรงบิดให้คงที่ได้ เมื่อความถี่สูงขึ้นการรักษาค่าอัตราส่วนนี้ต้องการแรงดันที่สูงขึ้นด้วย แต่ผลจากการอิ่มตัวในแกนเหล็กทำให้ไม่สามารถรักษาค่าอัตราส่วนดังกล่าวได้ แรงบิดทำงานในย่านการอิ่มตัวของแม่เหล็กจะมีค่าลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจากค่าความถี่ฐาน ดังรูปที่ 3.34

การควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า มีข้อได้เปรียบในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก ที่มีราคาถูก ทนทาน อายุการใช้งานยาวนาน มีความเชื่อถือสูง ไม่ต้องทำการบำรุงรักษาคอมมิวเตเตอร์หรือแปลงถ่านเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ถึงแม้ว่าราคาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกจะถูกกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาก ราคาของวงจรขับเคลื่อนแบบเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้านี้มีราคาสูงกว่าชุดควบคุมกระแสตรงมากเช่นกัน แต่ด้วยข้อดีของอายุการใช้งาน ความเชื่อถือได้ และการบำรุงรักษาทำให้การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้รับความนิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบันแทนที่การขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยเฉพาะที่มีสถานะแวดล้อมการทำงานที่สกปรก มีอันตรายต่อการกัดกร่อนค่อนข้างสูง และการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า แผนภาพในรูปที่ 3.35 แสดงการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้การควบคุมความถี่และขนาดแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Variable Frequency Voltage Source : VFVS)  $V^*$  และ  $f^*$  เป็นคำสั่งปรับตั้งการทำงานของแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ตัวหน่วงเวลาในส่วนของการทำงานคำสั่งความถี่ทำงานมีไว้เพื่อไม่ให้ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงรวดเร็วเกินไป เพื่อจำกัดการทำงานของมอเตอร์ให้อยู่ในช่วงความเร็วเชิงโคนส์ถึงค่าแรงบิดสูงสุดเท่านั้น ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้านี้อาจเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันหรือไซโคลคอนเวอร์เตอร์ก็ได้



รูปที่ 3.35 การควบคุมแหล่งจ่ายแบบปรับความถี่ได้

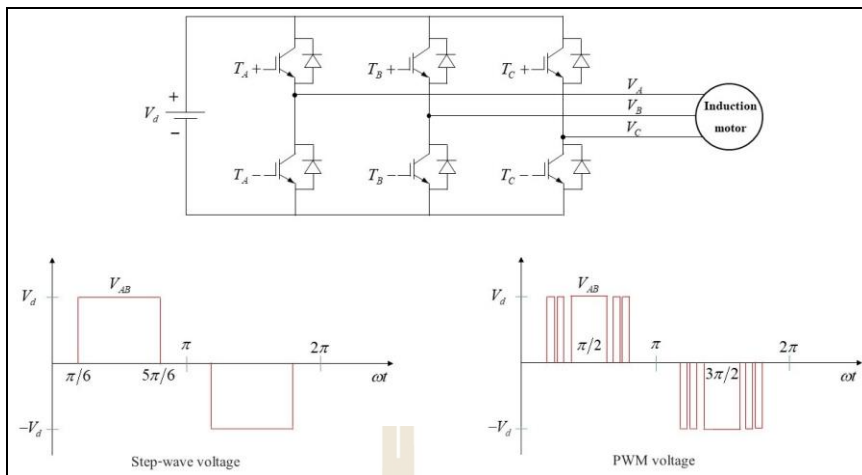
การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้การควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบ่งออกได้ 3 ช่วง ประกอบด้วย ช่วงแรงบิดคงที่ (Constant Torque Mode) เป็นช่วงการทำงานความถี่ต่ำจนถึงความถี่ฐาน  $\omega_b$  ซึ่งเป็นจุดที่แรงดันเหนี่ยวนำของสเตเตอร์ไม่เพิ่มขึ้นตามความถี่การทำงานที่ความถี่สูงกว่าค่านี้แรงบิดของมอเตอร์จะลดลงแต่จะยังคงรักษาการทำงานให้ขับโหลดด้วยกำลังงานคงที่ได้ เรียกช่วงการทำงานนี้ว่า “ช่วงกำลังงานคงที่ (Constant Power Mode)” เมื่อความถี่สูงขึ้นไปจนถึงแรงบิดเบรคดาวน์ (Breakdown Torque) ของมอเตอร์ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $\omega_c$  (มีค่าประมาณ 2 เท่าของความถี่ฐาน) แรงบิดจะตกลงในอัตราที่แปรผกผันกับความเร็วรอบยกกำลังสองและกำลังงานจะไม่คงที่ที่จุดนี้เรียกการทำงานในย่านนี้ว่า “ช่วงกำลังงานลดทอน (Reduce Power Mode)” หรือจะเรียกว่า “ช่วงสลลิปคงที่ (Constant Slip Mode)” ดังแสดงในรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 ช่วงการทำงานของการควบคุมแหล่งจ่ายแบบปรับความถี่ได้

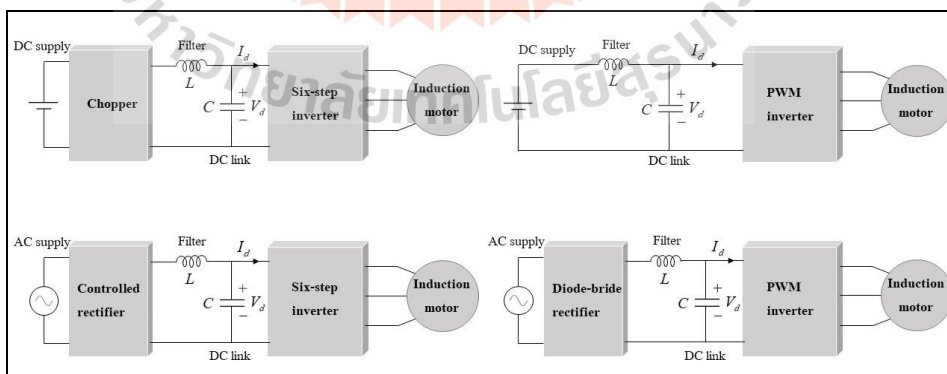
### 3. การควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน

การควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าความถี่ และขนาดแรงดันได้อย่างสมบูรณ์จะเป็นอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันหรือไซโคลคอนเวอร์เตอร์ ในการศึกษาแนะนำให้เสนออินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน โดยโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์จะใช้ทรานซิสเตอร์หรืออุปกรณ์สวิตซ์ที่หยุดนำกระแสได้ด้วยตัวเอง เช่น ไอจีบีทีหรือจีที ไอเก็ไค้ กรณีใช้งานที่ความถี่การสวิตซ์หรือพิกัดกำลังสูง การควบคุมจึงหว่าเปิด/ปิดวงจร นิยมใช้มี 2 รูปแบบ ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ชนิดรูปคลื่นขั้นบันได (Step-Wave Inverter) และอินเวอร์เตอร์ชนิดพิลด์ับเบิลยูเอ็ม (Pulse-Width Modulated Inverter : PWM) ดังแสดงในรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

วงจรนี้ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอินพุตของวงจร โครงสร้างวงจรอาจมีหลายแบบ เนื่องจากการสร้างแรงดันกระแสตรงเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าย่างต่อเนื่อง จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากการไฟฟ้าที่มีความต่อเนื่อง แบตเตอรี่หรือแหล่งอื่นอาจมีความไม่สะดวกในการใช้งาน ทำให้ต้องใช้งานร่วมกับวงจรเรียงกระแสและวงจรสับไฟฟ้าโดยจำเป็นต้องมีการติดตั้งตัวเก็บประจุเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงมีความเป็นอิสระจากวงจรเรียงกระแสหรือวงจรสับไฟฟ้านำมาใช้งาน และต้องออกแบบตัวกรอง LC เพื่อใช้กำจัดฮาร์มอนิกด้วย ซึ่งสรุปรูปแบบวงจรนี้ได้ดังรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันรูปแบบต่าง ๆ

เนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันระหว่างสายในรูปที่ 3.36 ไม่ได้เป็นรูปคลื่นไซน์ แต่เป็นสัญญาณรายคาบ ทำให้เขียนในรูปอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series) ได้ พิจารณาเฉพาะองค์ประกอบมูลฐานที่มีความถี่กำลัง สามารถคำนวณค่า rms ของแรงดันเฟสรูปคลื่นขั้นบันได และพีคดับเบิลยูเอ็ม โดยใช้สมการข้างล่างตามลำดับ

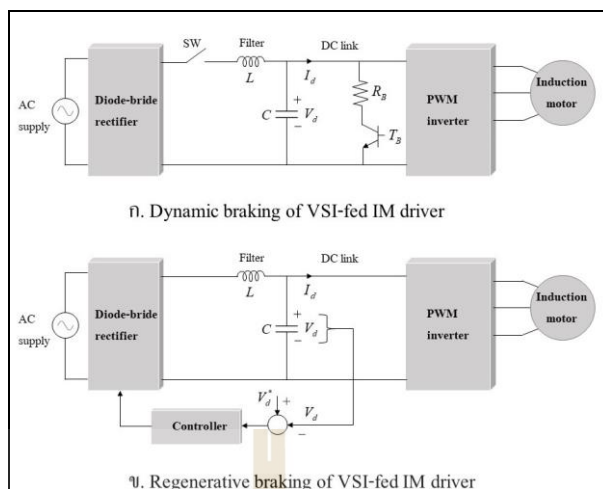
$$V_{1,rms} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_d \quad (3.30)$$

$$V_{1,rms} = \frac{m}{2\sqrt{2}} V_d \quad (3.31)$$

เมื่อ  $m$  คือ ดัชนีมอดูเลชัน (Modulation Index)

การเบรคมอดูเลเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันนี้ทำได้ทั้งการเบรคแบบพลวัตและการเบรคแบบจ่ายคืนพลังงาน ด้วยการควบคุมความถี่ทำงานของอินเวอร์เตอร์ ทำให้ปรับลดความเร็วรอบซึ่งโค่นซ์ของมอดูเลเตอร์ได้ เมื่อต้องการเบรคมอดูเลเตอร์โดยลดความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าลงทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์เกิดการกลับทิศทาง รวมทั้งกระแสในโรเตอร์และสนามแม่เหล็กในช่องอากาศด้วย จึงเกิดการไหลของกำลังไฟฟ้าจากมอดูเลเตอร์ซึ่งในขณะนี้จะประพฤติตัวเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากกำลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์ไปยังด้านเชื่อมโยงกระแสตรง ถ้าต้องการกำจัดพลังงานจากการเบรคทิ้งไปสามารถทำได้โดยการต่อตัวต้านทานสำหรับเบรค  $R_b$  คร่อมขั้วเชื่อมโยงกระแสตรง ซึ่งถูกควบคุมด้วยสวิตช์ที่หยุดนำกระแสด้วยตัวเองได้ ในวงจรใช้ทรานซิสเตอร์  $T_B$  หรือหากต้องการถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าจากการเบรคนี้ไปยังแหล่งจ่ายสามารถทำได้เช่นกัน แต่ต้องใช้วงจรเรียงกระแสที่ถูกควบคุมเพื่อจ่ายกำลังงานคืนสู่แหล่งจ่ายได้ หรือใช้คอนเวอร์เตอร์ชนิดจุกภาค (4QC) ควบคุมแบบพีคดับเบิลยูเอ็มแทนวงจรเรียงกระแส จะทำให้การส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าผ่านคอนเวอร์เตอร์ทำได้ 2 ทิศทาง ด้วยการควบคุมแรงดันด้านการเชื่อมโยงกระแสตรงดังแสดงในรูปที่ 3.39





รูปที่ 3.39 การเบรกสำหรับวงจรถอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันรูปแบบต่าง ๆ

### 3.8 สรุป

เนื้อหาของบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่สัมพันธ์กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 6 หัวข้อหลัก ได้แก่ ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มของต่างประเทศ การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในประเทศไทย หลักการของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน และการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า ซึ่งมีความสำคัญในการศึกษาระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

## บทที่ 4

### แบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

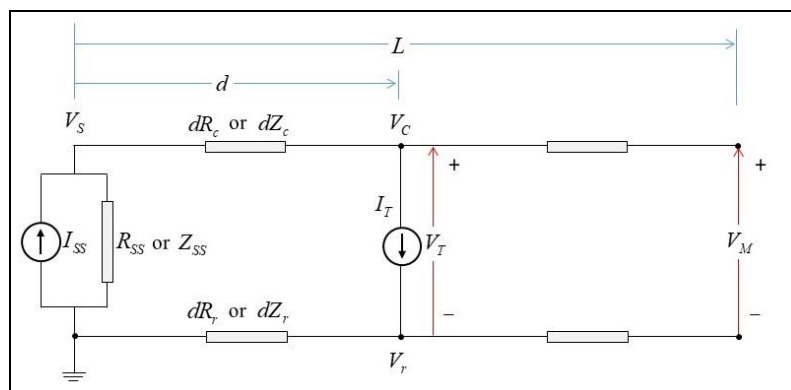
#### 4.1 บทนำ

การวางแผนเพื่อออกแบบระบบรถไฟฟ้านั้นมีความจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลักษณะสมบัติของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า เส้นทางวิ่งให้บริการ และการเลือกใช้ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับ เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการออกแบบเพื่อให้ระบบรถไฟฟ้ามีความเหมาะสม การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยพัฒนาในรูปแบบการคำนวณผ่านการสร้างแบบจำลองของระบบรถไฟฟ้าโดยรวมจะช่วยให้การออกแบบวางแผนระบบได้ตามสภาวะการใช้งานจริงหรือตามแผนที่คาดคะเนไว้ล่วงหน้า ในบทนี้นำเสนอขั้นตอนการสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า รวมทั้งการทดสอบและวิเคราะห์การจำลองผลของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ตามรูปแบบระบบที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.2 แบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน

##### 4.2.1 การวิเคราะห์เชิงเส้นของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนให้กับรถไฟฟ้า

การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนจะช่วยให้เข้าใจถึงหลักการพื้นฐานวิธีการคำนวณ ตลอดจนพารามิเตอร์และตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องในการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน การจ่ายไฟฟ้าจากตู้รถออกแบบการจ่ายไฟฟ้าด้านเดียว หรือให้จ่ายไฟฟ้าจากสองด้านและเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับ การวิเคราะห์ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าจะอาศัยการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธี โหนด (Nodal Analysis) เพื่อคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่รางตัวนำสัมผัสของรถไฟฟ้า จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่รางตัวนำตำแหน่งสถานีไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ จากรูปกำหนดให้ความต้านทาน  $R_c$  และ  $R_r$  เป็นความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางตัวนำ ในทำนองเดียวกันระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ  $Z_c$  และ  $Z_r$  เป็นค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวของรางตัวนำ



รูปที่ 4.1 แบบจำลองเชิงเส้นที่พิจารณาผลของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่รางตัวนำ

ในรูปที่ 4.1 พิจารณาที่โหนด  $V_s$ ,  $V_c$  และ  $V_r$  ตามลำดับ สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าประจำโหนดต่าง ๆ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_s = Z_{ss} (I_{ss} - I_T) \quad (4.1)$$

$$V_c = V_s - dZ_c I_T \quad (4.2)$$

$$V_r = dZ_r I_T \quad (4.3)$$

โดยวิเคราะห์สมการ โหนด  $V_s$  อีกครั้งในรูปของตัวแปร  $V_c$  จะได้ว่า

$$\left( \frac{1}{Z_{ss}} + \frac{1}{dZ_c} \right) V_s - \frac{1}{dZ_c} V_c = I_{ss}$$

แทนค่า  $V_s$  จากสมการที่ 4.2 จะได้สมการที่ใช้สำหรับคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่ตัวนำสัมผัสเข้าสู่รถไฟฟ้า  $V_c$  ดังแสดงในสมการที่ 4.4

$$V_c = I_{ss} Z_{ss} - \left( 1 + \frac{dZ_c}{Z_{ss}} \right) Z_{ss} I_T \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.3 และสมการที่ 4.4 จะได้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างที่ตัวนำ ลัมผัส  $V_c$  และ  $V_r$  ณ ตำแหน่งรถไฟฟ้า ดังสมการที่ 4.5

$$V_T = V_c - V_r$$

จะได้ว่า

$$V_T = I_{SS}Z_{SS} - [Z_{SS} + d(Z_c + Z_r)]I_T \quad (4.5)$$

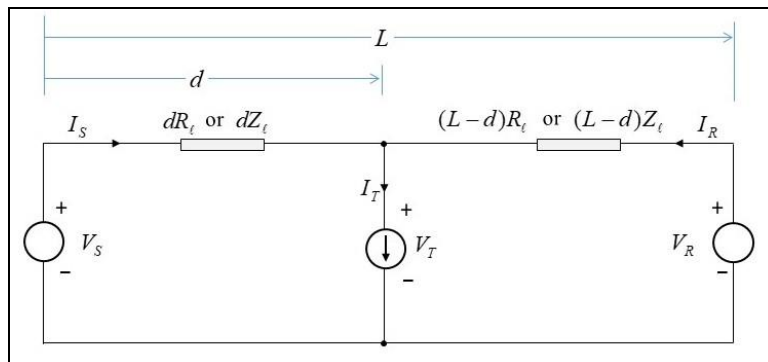
ในกรณีของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแทนค่าตัวแปรในสมการดังนี้

$$Z_c = R_c$$

$$Z_r = R_r$$

$$Z_{SS} = R_{SS} \quad (4.6)$$

กรณีระบบจ่ายไฟฟ้าจากสองด้านพิจารณาแบบจำลองที่ประกอบด้วยแหล่งจ่าย ไฟฟ้าสองชุดที่ปลายทางทั้งสองข้างของสายจ่ายตัวนำ เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.2 ระบบประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าที่บัสบาร์ของสถานีไฟฟ้า  $V_S$  และ  $V_R$  ตามลำดับ เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $d$  จากสถานีไฟฟ้า  $S$  ระยะห่างระหว่างสถานี ไฟฟ้า  $S$  และ  $R$  กำหนดให้มีค่าระยะทาง  $L$  รถไฟฟ้ารับกระแสไฟฟ้าจ่ายสายตัวนำ  $I_T$  ขณะที่ พิจารณากำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายจากสถานีไฟฟ้า  $S$  และ  $R$  มีค่าเป็น  $I_S$  และ  $I_R$  ตามลำดับ วิเคราะห์วงจรในรูปจะให้ความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 4.2 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายสองด้าน

$$I_S + I_R = I_T$$

$$-V_S + dZ_l I_S - (L-d)Z_l I_R + V_R = 0$$

ทำการลดรูปสมการจากทั้งสองสมการ จะเหลือสมการอย่างย่อเป็น

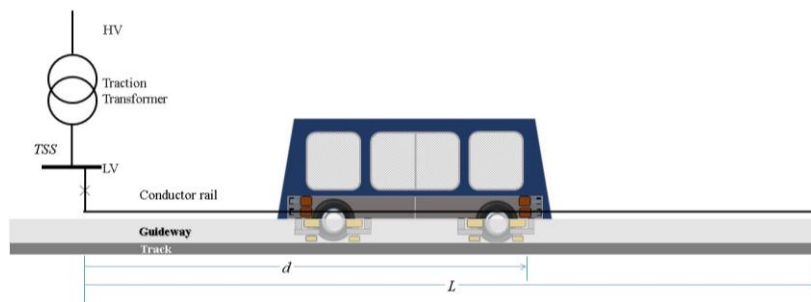
$$-V_S + V_R + \frac{L(V_S - V_T)}{d} - (L-d)Z_l I_T = 0$$

$$V_T = \frac{d}{L} \left\{ \left( \frac{L}{d} - 1 \right) V_S + V_R - (L-d)Z_l I_T \right\} \quad (4.7)$$

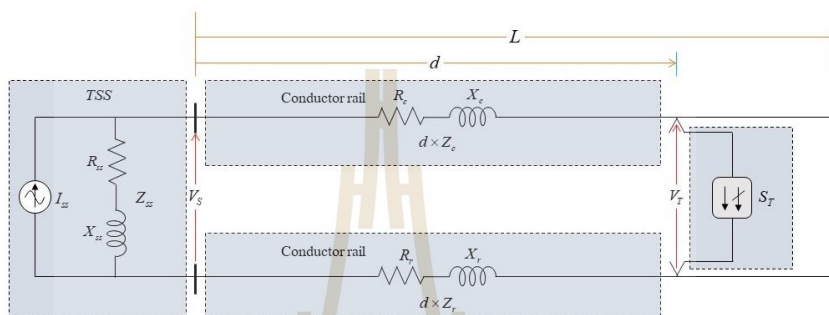
สมการที่ 4.7 เป็นกรณีสำหรับคำนวณแรงดันไฟฟ้าคร่อมแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง  $d$  ใด ๆ ระหว่างการจ่ายไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายสองด้าน ภายใต้ข้อกำหนดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสบาร์ของสถานีไฟฟ้าทั้งสองมีค่าคงที่

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับ

หัวข้อนี้นำเสนอการวิเคราะห์ด้วยวงจรสมมูลแบบหนึ่งเฟส พิจารณารูปที่ 4.3 ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับป้อนให้กับรถไฟฟ้า จะประกอบไปด้วย สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนระบบรางตัวนำสัมผัส และตัวรถไฟฟ้า โดยมีแบบจำลองในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้



(ก) แผนผังเส้นเดี่ยว



(ข) วงจรสมมูลแบบหนึ่งเฟส

รูปที่ 4.3 แบบจำลองหนึ่งเฟสสำหรับรถไฟกระแสสลับ

ก. แบบจำลองของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

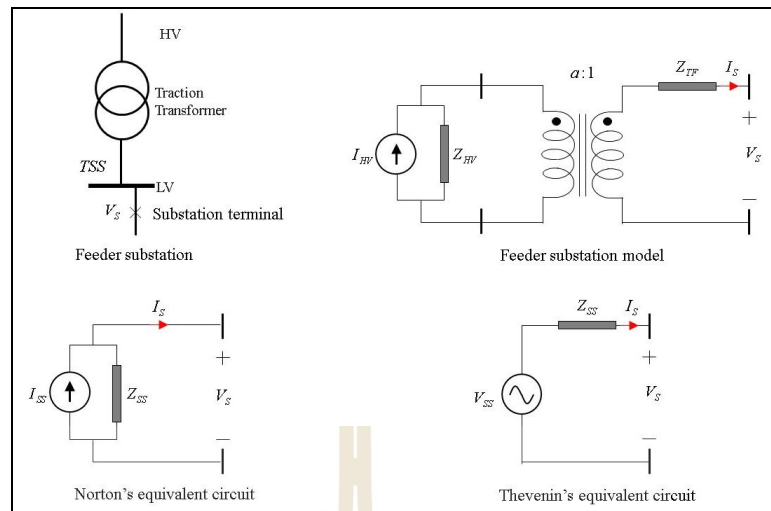
พิจารณาที่บัสบาร์ LV ในรูปวงจรมูลของนอร์ตัน แหล่งจ่ายกระแส  $I_{SS}$  แทนด้วยค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่บัสบาร์ LV อิมพีแดนซ์สมมูล  $Z_{SS}$  คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่บัสบาร์ด้าน LV ดังแสดงในรูปที่ 4.4 กำหนดให้พิกัดแรงดันทำงานทางด้านขดลวดทุติยภูมิของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเป็น  $V_{SS}$  มีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{SS} = \frac{I_{HV} Z_{HV}}{a} \tag{4.8}$$

$$Z_{SS} = \frac{Z_{HV}}{a^2} + Z_{TF} \tag{4.9}$$

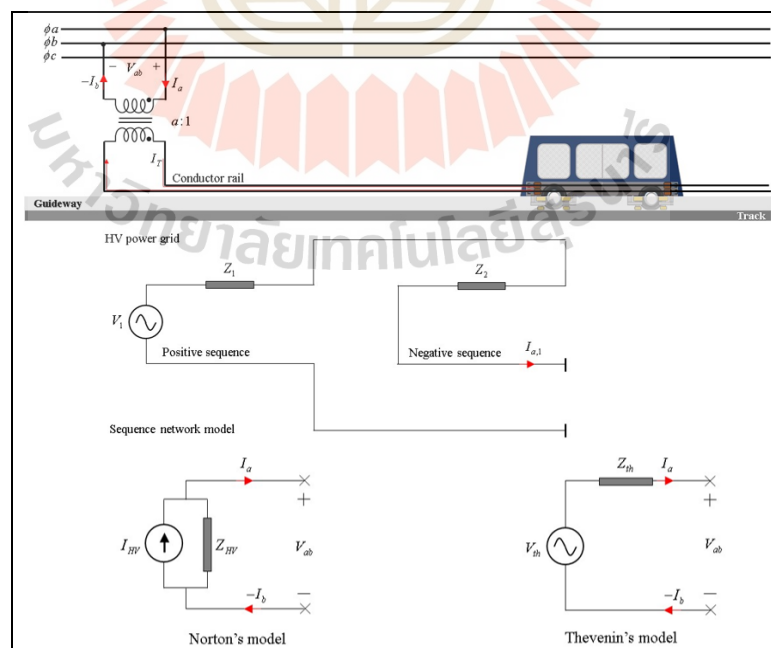
$$I_{SS} = \frac{V_{SS}}{Z_{SS}} = \frac{a I_{HV} Z_{HV}}{Z_{HV} + a^2 Z_{TF}} \tag{4.10}$$





รูปที่ 4.4 แบบจำลองสถานีจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับรถไฟฟ้า

การเชื่อมต่อหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนำเสนอมการต่อ แสดง ดังรูปที่ 4.5 กำหนดให้ใช้คู่สาย  $a-b$  เชื่อมต่อด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง เมื่อนำ ส่วนประกอบสมมาตรมาพิจารณาจะได้วงจรสมมูลด้านแหล่งจ่ายที่ต่อเข้ากับขดลวดหม้อแปลง ด้านปฐมภูมิเป็นไปดังวงจรของการลัดวงจรระหว่างคู่เฟส (Double-Line Fault)



รูปที่ 4.5 แบบจำลองสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต่อหม้อแปลงหนึ่งเฟส

โดยที่  $Z_1$  และ  $Z_2$  แทนค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวก และลำดับลบของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัสบาร์ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง และจากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.11 โดยที่  $I_{a,1}$  เป็นกระแสลำดับบวกของเฟส  $a$  จะได้ค่าอิมพีแดนซ์  $Z_{HV}$  และแหล่งจ่ายกระแสสมมูล  $I_{HV}$  ดังสมการที่ 4.12 และสมการที่ 4.13 ตามลำดับ

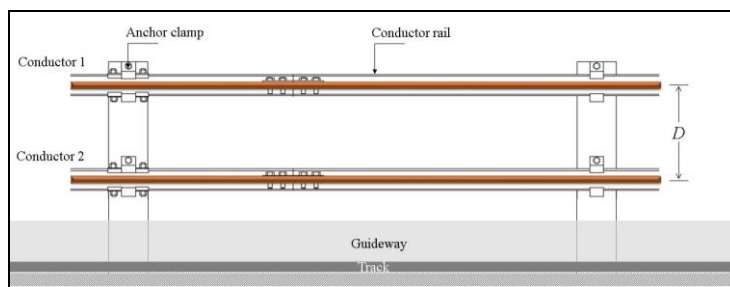
$$I_a = I_{ab} = (\sqrt{3} \angle 30^\circ) I_{a,1} \quad (4.11)$$

$$Z_{HV} = (\sqrt{3} \angle 30^\circ) (Z_1 + Z_2) \quad (4.12)$$

$$I_{HV} = \frac{V_{ab, \text{rated}}}{(\sqrt{3} \angle 30^\circ) (Z_1 + Z_2)} \quad (4.13)$$

#### ข. แบบจำลองรางตัวนำไฟฟ้า

แบบจำลองระบบรางตัวนำสัมผัสที่ใช้ในระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับรถไฟฟ้านั้นมีความสำคัญและเป็นปัจจัยที่ส่งผลในเรื่องแรงดันไฟฟ้าตก การสร้างแบบจำลองระบบรางตัวนำสัมผัส พิจารณาจากความต้านทานของระบบตัวนำสัมผัส ความเหนี่ยวนำของตัวนำสัมผัส และระหว่างตัวนำสัมผัส การจัดวางตำแหน่งของตัวนำสัมผัสมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำของระบบส่งจ่าย แบบจำลองของสายส่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า แต่เนื่องจากระยะเวลาการส่งจ่ายไฟฟ้าของรางตัวนำสัมผัสในแต่ละตอนมีระยะทางไม่ยาวมากนัก ซึ่งสายจ่ายไฟฟ้าแบบจ่ายโดยตรงมีระยะจ่ายประมาณ 10-20 km ดังนั้นแบบจำลองของรางตัวนำสัมผัสสามารถใช้แบบจำลองของสายส่งระยะสั้นได้ การส่งจ่ายในรูปแบบนี้ประกอบไปด้วยความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาว โดยไม่พิจารณาผลของค่าความจุไฟฟ้า พิจารณาระบบทางวิ่งเดี่ยว ในรูปที่ 4.6 แสดงระบบรางส่งจ่ายไฟฟ้าแบบหนึ่งเฟส โดยที่ตัวนำที่ 1 มีหน้าที่จ่ายกระแสไหลเข้าระบบรถไฟฟ้า และตัวนำที่ 2 จะรับกระแสไหลกลับ



รูปที่ 4.6 ระบบรางตัวนำจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียว

ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของตัวนำ (Resistance per unit length) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.14 (Friedrich, K. 2009)

$$R'_C = \frac{\rho \cdot \ell}{(A \cdot \ell)} = \frac{\rho}{A} = \frac{1}{(k \cdot A)} \quad (4.14)$$

โดยที่	$\rho$	แทน ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ, ( $\Omega \cdot \text{m}$ )
	$k$	แทน ความนำจำเพาะของตัวนำ, ( $1/\Omega \cdot \text{m}$ )
	$\ell$	แทน ความยาวของตัวนำ, (m หรือ km)
	$A$	แทน พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ, ( $\text{mm}^2$ )

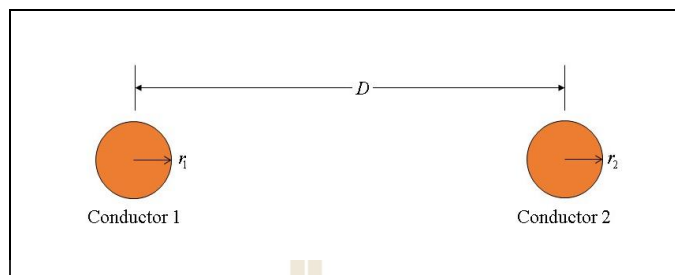
ค่าความต้านทานจำเพาะ  $\rho$  ของวัสดุตัวนำจะมีค่าการแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ซึ่งหาได้จากสมการที่ 4.15

$$\rho = \rho_{20^\circ} [1 + \alpha_R \cdot (\vartheta - 20)] \quad (4.15)$$

โดยที่	$\rho_{20^\circ}$	แทน ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิ $20^\circ\text{C}$
	$\alpha_R$	แทน สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานจำเพาะต่ออุณหภูมิ
	$\vartheta$	แทน อุณหภูมิของตัวนำสัมผัส, ( $^\circ\text{C}$ )

ความเหนี่ยวนำของตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟส (Inductance of Single Phase) ตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียว สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำของรางตัวนำแกนตัดที่มีพื้นที่หน้าตัดสอง

เส้นมีรัศมี  $r_1$  และ  $r_2$  ระยะที่พิจารณาในการหาค่าความเหนี่ยวนำ คือ ระยะ  $D$  ของรางตัวนำทั้ง 2 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 รางตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟส

ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำรวมของระบบรางตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟส สามารถหาได้ดังสมการข้างล่างนี้

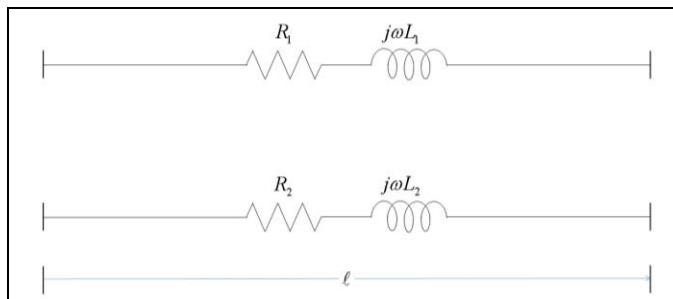
$$L = L_1 + L_2 = 4 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{D}{GMR} \right) \quad (4.16)$$

โดยที่  $L$  แทน ค่าความเหนี่ยวนำรวม, (H/m)

$L_1, L_2$  แทน ค่าความเหนี่ยวนำของตัวนำที่ 1 และ 2, (H/m)

$GMR$  แทน ค่ารัศมีเฉลี่ยเรขาคณิต ( $GMR$ : Geometric Mean Radius) ของรางตัวนำ

การวิเคราะห์วงจรเทียบเคียงระบบส่งจ่ายระยะสั้น (Short Transmission Line) ที่มีความยาวไม่เกิน 80 km พิจารณาโดยไม่คิดค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) และคอนดักแตนซ์ (Conductance) พารามิเตอร์ที่เหลือ คือ ค่าความต้านทาน (Resistance) และค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) สามารถเขียนวงจรเทียบเคียงได้ดังรูปที่ 4.8 โดยที่  $l$  คือ ความยาวของรางตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ 4.8 วงจรเทียบเคียงระบบตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้า

ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะมีผลของค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากความเหนี่ยวนำ ค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับรูปแบบและระยะห่างของการจัดวางตัวนำ จากรูปที่ 4.8 อิมพีแดนซ์ของรางตัวนำสัมผัสคำนวณได้ดังสมการข้างล่างนี้

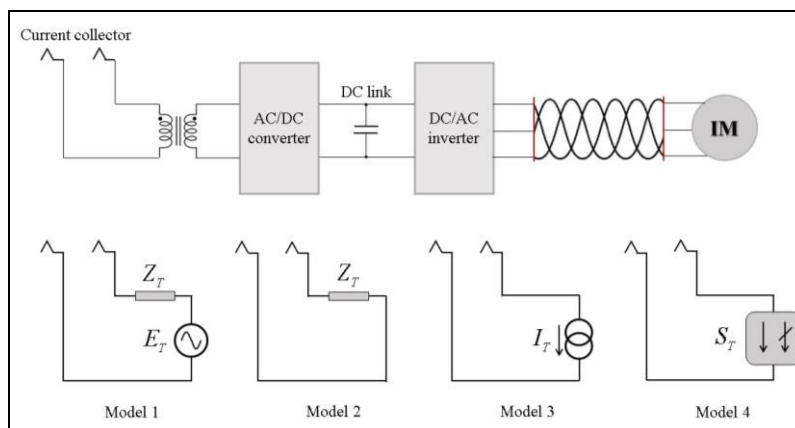
$$Z_T = Z_1 + Z_2 = R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2) \quad (4.17)$$

โดยที่  $R_1$  และ  $R_2$  แทน ความต้านทานของตัวนำที่ 1 และ 2, ( $\Omega \cdot m$ )

$L_1$  และ  $L_2$  แทน ความเหนี่ยวนำของตัวนำที่ 1 และ 2, (H/m)

#### ค. แบบจำลองของรถไฟฟ้ากระแสสลับ

ตัวรวบรวมกระแสไฟฟ้า (Current Collector) เป็นอุปกรณ์รวบรวมกระแสไฟฟ้าจากตัวนำสัมผัส ตัวรวบรวมกระแสไฟฟ้า จะเคลื่อนไปตามการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าสามารถไหลเข้าสู่ขบวนรถไฟฟ้าผ่านแผ่นตัวนำสัมผัสซึ่งถูกติดตั้งไว้ด้านข้างของรถไฟฟ้า บนขบวนรถไฟฟ้าจะถูกติดตั้ง หม้อแปลงกำลัง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC/DC และ DC/AC สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 4.9 นำเสนอแบบจำลอง 4 แบบ ได้แก่ แบบจำลองที่ 1 (Model 1) เป็นแบบจำลองคล้ายมอเตอร์กระแสตรง (DC-Motor-Like Model) โดยมีอิมพีแดนซ์อนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันที่สื่อความหมายแบบเดียวกันกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับของมอเตอร์แบบจำลองนี้ทำให้ระบบมีความเป็นเชิงเส้น แบบจำลองที่ 2 (Model 2) เป็นแบบจำลองอิมพีแดนซ์ (Impedance Model) หรืออาจทำในรูปแอดมิตแตนซ์ก็ได้



รูปที่ 4.9 แบบจำลองรถไฟฟ้ากระแสสลับ

แบบจำลองที่ 3 (Model 3) เป็นแบบจำลองกระแสไฟฟ้า (Current Model) นำเสนอด้วย โหลดกระแสไฟฟ้า ตามสมการทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่ง่าย แต่มีปัญหาในทางปฏิบัติใน กระบวนการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับจะต้องพิจารณาเฟสของ กระแสไฟฟ้า การวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าจะมีการอ้างอิงเฟสที่มีมุมเป็น 0 องศา ไว้ที่บัสบาร์อ้างอิง หรือจุดอ้างอิงของระบบ เมื่อขบวนรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ตลอดเวลา การระบุมุมเฟสของกระแสไฟฟ้า ไม่สามารถทำได้อย่างถูกต้อง แบบจำลองนี้โดยปกติไม่ถูกใช้งานในทางปฏิบัติ และแบบจำลองที่ 4 (Model 4) แบบจำลองกำลังไฟฟ้า (Power Model) เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ เนื่องจากปริมาณ กำลังไฟฟ้านี้เป็นปริมาณเฟสเซอร์และคำนวณค่ามุมเฟสได้ง่ายจากตัวประกอบกำลัง ปริมาณ กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟสามารถวัดได้ และคำนวณได้จากสมรรถนะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ทำให้แบบจำลองนี้ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายสำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าในระบบ รถไฟฟ้ากระแสสลับ

#### 4.2.3 การหาผลเฉลยด้วยวิธีลำดับเชิงเส้น

วิธีการนี้ถูกนำเสนอขึ้น โดย C.J. Goodman and T. Kulworawanichpong เรียกชื่อว่า “วิธีการลำดับเชิงเส้น (Sequential Linear Method)” เป็นการคำนวณที่จัดรูปแบบสมการไหล กำลังไฟฟ้าให้เป็นเชิงเส้น นำเสนอแบบจำลองของแหล่งจ่ายและโหลดกำลังไฟฟ้าให้เป็น แบบจำลองกระแสไฟฟ้า อ้างอิงสมการโนดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้ (ธนัตชัย, 2560)



$$\begin{bmatrix} Y_{1,1} & Y_{1,2} & \cdots & Y_{1,N} \\ Y_{2,1} & Y_{2,2} & \cdots & Y_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N,1} & Y_{N,2} & \cdots & Y_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

บัสที่ติดตั้งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีแหล่งจ่ายกระแสเชื่อมอยู่ แต่ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสกลับเป็นเพียงการจ่ายแบบด้านเดียว ดังนั้น ในระบบจ่ายไฟฟ้าจะมีสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเพียงบัสเดียวเท่านั้นให้โหลดรถไฟฟ้าในรูปแบบจำลองกำลังไฟฟ้าที่บัส  $k$  ใด ๆ มีค่า  $S_{T,k} = P_{T,k} + jQ_{T,k}$  ดังนั้นกระแสที่บัส  $k$  ได้จากสมการต่อไปนี้

$$I_k = I_{SS,k} - I_{T,k} \quad (4.19)$$

โดยที่  $I_{SS,k}$  แทน กระแสของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน, (A)  
 $I_{T,k}$  แทน กระแสที่รถไฟฟ้ารับจากสายจ่าย, (A)

เนื่องจากรถไฟฟ้านำเสนอโหลดในรูปแบบของกำลังไฟฟ้า แต่การคำนวณด้วยวิธีนี้ค่าในเมตริกซ์ของสมการที่ 4.18 อยู่ในรูปเชิงเส้น การคำนวณรอบไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ต้องกำหนดค่าเริ่มต้นของแรงดันไฟฟ้าที่บัสทุกบัส ดังนั้นในระหว่างรอบการคำนวณที่  $h$  ใด ๆ จะทราบแรงดันในรอบก่อนหน้าเพื่อปรับปรุงแรงดันในรอบถัดไป โดยใช้แรงดันปรับปรุงล่าสุดมาใช้คำนวณ ทำให้แปลงค่ากำลังไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้าได้ และค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่ที่เป็นค่ากระแสของรถไฟฟ้านั้น การคำนวณให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบที่คำนวณเป็นหลักการสมการให้เป็นเชิงเส้นในการคำนวณเชิงตัวเลข การปรับปรุงกระแสไฟฟ้าคำนวณได้ตามสมการข้างล่างนี้

$$I_{T,k}^{(h)} = \left( \frac{S_{T,k}}{V_k^{(h)}} \right)^* \quad (4.20)$$

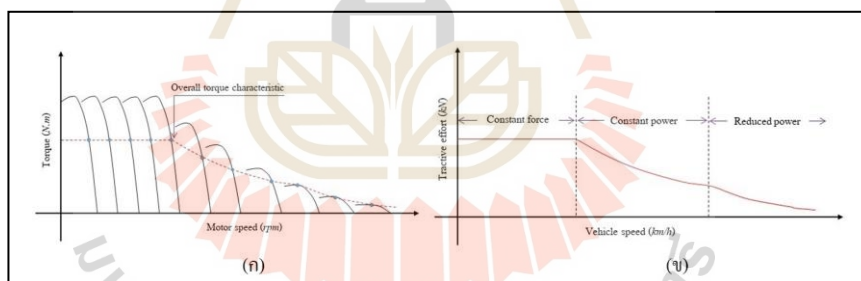
การคำนวณผลเฉลยด้วยวิธีนี้มีข้อได้เปรียบหลายประการประกอบด้วยสมการที่ง่ายกว่าวิธีนิวตันราฟสัน จำนวนรอบคำนวณน้อยกว่าวิธีเกาส์ซีเคิล นอกจากนี้วิธีการนี้ใช้

แบบจำลองโพลของรถไฟฟ้าได้หลายรูปแบบมากกว่า เช่น แบบจำลองกำลังไฟฟ้า แบบจำลองกระแสไฟฟ้าหรือแบบจำลองอิมพีแดนซ์ เป็นต้น

### 4.3 การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

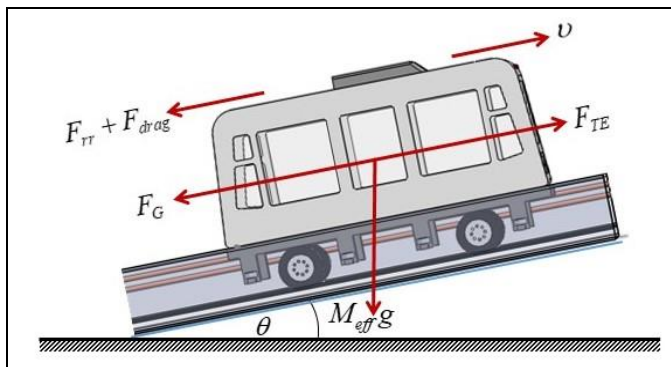
#### 4.3.1 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า

การสร้างแบบจำลองการขับเคลื่อนรถไฟฟ้านี้จะพิจารณาคุณสมบัติแรงจุดของรถไฟฟ้า ซึ่งแรงจุดนี้เกิดจากแรงบิดของมอเตอร์ส่งกำลังผ่านระบบเฟืองทดไปขับที่ล้อของรถไฟฟ้า การปรับคุณอัตราทดมาแล้ว ทำให้เหมาะที่จะนำไปใช้คำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าได้ โดยกราฟแรงจุดของรถไฟฟ้ามีหน่วยเป็น N จะแปรผันตามความเร็วในการเคลื่อนที่เชิงเส้นของรถไฟฟ้าในหน่วย m/s หรือ km/h สำหรับกราฟแรงบิดและความเร็วรอบดังรูปที่ 4.10 (ก) นี้แรงบิดของมอเตอร์มีหน่วยเป็น N.m และความเร็วรอบของเพลามอเตอร์มีหน่วยเป็น rpm เมื่อลากเส้นผ่านค่าแรงบิดทำงาน (Operating Torque) ของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ จะได้กราฟเส้นประดังแสดงในรูป เมื่อปรับคุณด้วยอัตราทดประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานเฟืองทดและระยะการเคลื่อนที่ตามรัศมีของล้อรถไฟฟ้าจะได้ผลลัพธ์เป็นแรงจุดและแกนระนาบจะถูกแปลงเป็นความเร็วเชิงเส้นซึ่งจะได้เส้นกราฟในรูปที่ 4.10 (ข) เรียกว่า “แรงจุด (Tractive Effort :  $TE$ )”



รูปที่ 4.10 ลักษณะสมบัติแรงจุดรถไฟฟ้ากับเส้นโค้งแรงบิดและความเร็วรอบ

การจ่ายพลังงานไฟฟ้าป้อนให้กับรถไฟฟ้าเพื่อใช้เร่งให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นไปตามทางวิ่ง ด้วยการเคลื่อนที่เชิงเส้นของรถไฟฟ้าเป็นผลมาจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ใช้สร้างแรงบิดไปขับล้อของรถไฟฟ้า เมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้ามากพอที่จะเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่าง ๆ ได้ แรงลัพท์ที่เหลือจะกระทำกับรถเพื่อเร่งให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร่งได้ ในหัวข้อนี้นำเสนอการคำนวณทางพลวัตของรถไฟฟ้า (Vehicle Dynamic) โดยพิจารณาจากแผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าที่มีมวลประสิทธิผล (Effective Mass :  $M_{eff}$ ) แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปบนทางวิ่ง เพื่อวิเคราะห์อยู่ในรูปแบบทั่วไป ให้บนทางวิ่ง ถูกยกทำมุมกับแนวราบ ส่งผลให้แรงโน้มถ่วงมีผลต่อการเคลื่อนที่นี้ด้วย จากรูปแรงกระทำที่เกี่ยวข้อง คือ แรงฉุดของรถไฟฟ้า (Vehicle Traction:  $F_{TE}$ ) แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า (Vehicle Resistance:  $F_R$ ) โดยที่แรงต้านการเคลื่อนที่นั้นแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ แรงเสียดทานที่ต้านการเคลื่อนที่ (Vehicle Rolling Resistance:  $F_{rr}$ ) แรงโน้มถ่วง (Gradient Force:  $F_G$ ) และแรงต้านอากาศ (Aerodynamic Drag Force:  $F_{drag}$ ) จากรูปกำหนดให้รถไฟฟ้าขณะเคลื่อนที่ไปตามทางวิ่งที่เอียงทำมุม  $\theta$  กับแนวระนาบด้วยความเร่ง  $a$  ตามกฎข้อที่สองของนิวตัน สมการหาแรงฉุดของรถไฟฟ้าหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$F_{TE} - F_R = M_{eff}a \quad (4.21)$$

$$F_R = F_{rr} + F_G + F_{drag} \quad (4.22)$$

แรงเสียดทานที่ต้านการเคลื่อนที่ ( $F_{rr}$ ) เกิดจากแรงเสียดทานสามประการ ได้แก่ แรงเสียดทานจากแบริ่ง แรงเสียดทานจากเฟืองทด และแรงเสียดทานจากระบบเบรก โดยแรงเสียดทานนี้มีรูปแบบสมการมาตรฐานตามสมการที่ 4.23 โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์  $f_i$  ละทิ้งได้ในขณะที่สัมประสิทธิ์  $f_0$  มีค่าประมาณ 0.001 สำหรับล้อเหล็กของรถไฟฟ้าราง กรณีของล้อยางกับพื้นถนนสัมประสิทธิ์นี้จะสูงกว่าประมาณ 6-10 เท่า นั่นคือ ประมาณ 0.006-0.01

$$F_{rr} = f_{rr}W_{axle} = (f_0 + f_1v)W_{axle} \quad (4.23)$$

โดยที่  $f_{rr}, f_p, f_i$  แทน สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

$W_{axle}$  แทน น้ำหนักโหลดของแกนขับเคลื่อน (Axle Load)

แรงต้านอากาศ ( $F_{drag}$ ) เป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ที่แปรผันตามโครงสร้างของรถไฟฟ้าพื้นที่ด้านหน้าของรถไฟฟ้าที่รองรับการไหลของอากาศผ่านรถไฟฟ้า โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$F_{drag} = 0.5 \rho_{air} C_d A_f v_{air}^2 \quad (4.24)$$

โดยที่  $\rho_{air}$  แทน ความหนาแน่นของอากาศ, ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_d$  แทน สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

$A_f$  แทน พื้นที่ด้านหน้าของรถไฟฟ้าที่ฉายให้ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ, ( $\text{m}^2$ )

$v_{air}$  แทน ความเร็วสัมพัทธ์การไหลของอากาศเทียบกับความเร็วของรถไฟฟ้า, ( $\text{m/s}$ )

แรงโน้มถ่วง ( $F_G$ ) เป็นปัจจัยที่พิจารณาแยกออกมา ซึ่งเป็นผลมาจากมวลของรถไฟฟ้าที่วิ่งบนรางนำทางที่เอียงทำมุมกับพื้น เกิดการแยกองค์ประกอบของน้ำหนักรถไฟฟ้ากระทำกับรถไฟฟ้าอาจมีทิศทางการเคลื่อนที่หรือต้านทานการเคลื่อนที่ ดังสมการที่ 4.25

$$F_G = \pm M_{eff} g \sin \theta \quad (4.25)$$

เมื่อ  $M_{eff}$  แทน มวลของรถไฟฟ้าและน้ำหนักบรรทุกทุก มวลนี้จะรวมมวลในส่วนที่แปลงจากโมเมนต์ความเฉื่อยขององค์ประกอบที่เชื่อมต่อกับเพลาของมอเตอร์เพื่อนำไปรวมกับมวล  $M_{tare}$  (Tare Mass) ของรถไฟฟ้า ซึ่งจะใช้ตัวประกอบมวลประสิทธิผล  $\lambda_{eff}$  (Effective Mass Coefficient) แทนผลรวมของน้ำหนักบรรทุก ได้แก่ มวลของผู้โดยสาร  $M_{pg}$  (Passenger Mass) และมวลสมมูลจากโมเมนต์ความเฉื่อยทางการหมุน  $M_{rm}$  (Rotational Inertia Equivalent Mass) โดยมวลแต่ละองค์ประกอบจะถูกเทียบเป็นสัดส่วนกับมวลของรถไฟฟ้าเปล่า ดังสมการต่อไปนี้

$$M_{eff} = M_{tare} (1 + \lambda_{eff}) \quad (4.26)$$

$$\lambda_{eff} = \frac{M_{pg} + M_{rm}}{M_{tare}} \quad (4.27)$$

เมื่อพิจารณาระบบรถไฟฟ้ายานไฟเอเอ็มยังมีปัจจัยผลกระทบจากการเคลื่อนที่สัมผัสของล้อ การสั่นสะเทือนของล้อ ยาง พื้นผิวของทางวิ่ง รวมถึงความเสียดทานของรางบังคับนำทางและรางตัวนำสัมผัส เป็นต้น จากข้อมูลของ Lin, Y.-D., and Trani, A. A. นำเสนอสมการเดวิส (Davis Equation) ถูกใช้เพื่อประเมินแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ายานไฟเอเอ็ม ดังสมการต่อไปนี้

$$F_R = K_0 + \frac{K_1}{W} + B(v) + \frac{CAv^2}{Wn} \quad (4.28)$$

โดยที่	$F_R$	แทน แรงต้านของรถไฟฟ้ายานไฟเอเอ็มที่เกิดจากผลรวมของแรงเสียดทานการเคลื่อนที่กับแรงต้านอากาศ, (lb/ton)
	$W$	แทน น้ำหนักโหลดต่อแกนเพลลาขับเคลื่อน, (tons)
	$A$	แทน พื้นที่หน้าตัดของรถไฟฟ้ายานไฟเอเอ็ม, (ft <sup>2</sup> )
	$B$	แทน สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่รางบังคับนำทาง
	$C$	แทน สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอากาศ
	$v$	แทน ความเร็วของรถไฟฟ้ายานไฟเอเอ็ม, (m/h)
	$n$	แทน จำนวนแกนเพลลาขับเคลื่อน
	$K_0, K_1$	แทน ค่าคงที่ มีค่า 1.3 และ 29 ตามลำดับ

จากสมการที่ 4.28 จะถูกแสดงในหน่วยของระบบ SI โดยจะให้แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ายานไฟเอเอ็มในหน่วย (N) น้ำหนักโหลดต่อแกนเพลลาขับเคลื่อนในหน่วย (kg) พื้นที่หน้าตัดของรถไฟฟ้ายานไฟเอเอ็มในหน่วย (m<sup>2</sup>) และความเร็วของรถไฟฟ้ายานไฟเอเอ็มในหน่วย (m/s) สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$F_R = 5 \times 10^{-4} K_0 + 4.4480 \frac{K_1}{W} + 1.1187 \times 10^{-3} B(v) + 239.6904 \frac{CAv^2}{Wn} \quad (4.29)$$

และแรงต้านความโน้มถ่วงจะคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$F_G = 9.81W_G \left( \frac{i}{100} \right) \quad (4.30)$$

โดยที่  $W_G$  แทน น้ำหนักรวมทั้งหมด, (kg)  
 $i$  แทน ความชันทางวิ่งของรถไฟฟ้า, (%)

จากที่ได้กล่าวแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า และแรงต้านความโน้มถ่วงข้างต้น สามารถหาแรงฉุดที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม แสดงได้ดังสมการที่ 4.31

$$F_{TE} - F_R - F_G = M_{eff}a \quad (4.31)$$

และสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเอพีเอ็มได้จากสมการที่ 4.32

$$P_e = \frac{F_{TE} \cdot v}{\eta_t} + P_{aux} \quad (4.32)$$

โดยที่  $P_e$  แทน กำลังทางไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม, (W)  
 $P_{aux}$  แทน กำลังไฟฟ้าเสริม, (W)  
 $v$  แทน ความเร็วของรถไฟฟ้า, (m/s)  
 $\eta_t$  แทน ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

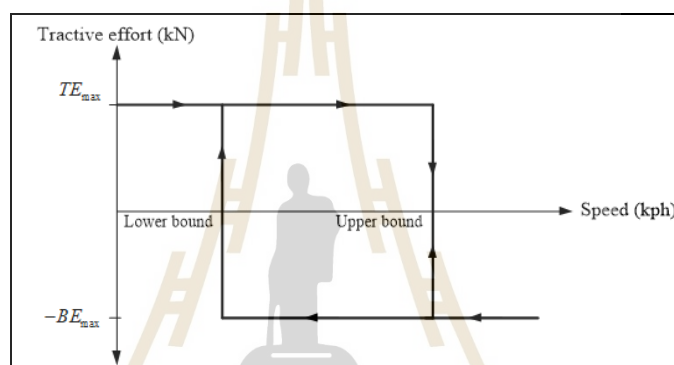
#### 4.3.2 การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าอ้างอิงจากการเคลื่อนที่ของนิวตัน ซึ่งนำเสนอการคำนวณลักษณะสมบัติของแรงฉุด และกำลังงานขับเคลื่อนที่ใช้งานเพื่อให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปตามทางวิ่งตามลักษณะของการเคลื่อนที่ที่กำหนด การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยทั่วไปประกอบด้วย การเร่ง การแล่นด้วยความเฉื่อย ความเร็วคงที่ และการเบรก ในขณะที่ออกตัวจากหยุดนิ่งที่สถานี รถจะเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งตามที่ออกแบบไว้ ในช่วงแรกของการออกตัว รถจะเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งคงที่ถึงแม้ว่าจะมีผลจากแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า แต่แรงฉุดที่ผู้ขับเคลื่อนสร้างขึ้นมีค่ามากเพียงพอจากกราฟแรงฉุด-ความเร็วของหัวขบวน หัวขบวนรถไฟฟ้าจะให้แรงฉุดสูงสุดคงที่จนถึงความเร็วฐาน จากนั้น ชิดจำกัดการจ่ายแรงขับของมอเตอร์ไม่สามารถสร้างแรงขับสูงสุดได้ โดยชิดจำกัดแรงขับสูงสุดจะลดลง ทำให้ผู้ขับเคลื่อนของขบวนรถไฟฟ้าอาจจะไม่สามารถรักษาอัตราเร่งให้คงที่ได้ การคำนวณการเคลื่อนที่นี้นำเสนอการคำนวณใน โดเมนเวลา แบ่งช่วงเวลาคำนวณออกเป็นขั้นเวลา (Time Step) ที่สั้นเพียงพอให้การคำนวณมีความละเอียดที่ยอมรับได้ และไม่ใช่เวลาคำนวณยาวนานเกินไป ปกติใช้ค่า 0.5-1.0 s อย่างไรก็ตาม อาจจะลดค่าช่วงเวลานี้ให้ต่ำกว่านี้ได้ เช่น 0.1 s



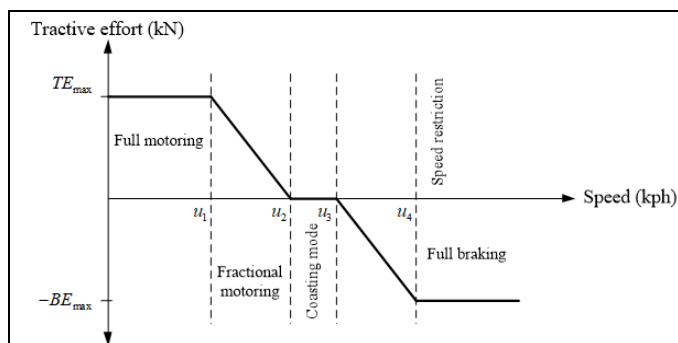
เป็นต้น สมรรถนะของรถไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับโหมดการทำงานของรถไฟฟ้า และวิธีควบคุมความเร็ว การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า โดยนำเสนอการควบคุมความเร็วแบบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Speed Control) และการควบคุมความเร็วแบบสัดส่วน (Proportional Speed Control) โดยทั้งสองวิธีนี้เป็นวิธีพื้นฐานเพื่อควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้าที่ใช้เพื่อการศึกษา (ธนดชัย, 2560)

ก. การควบคุมความเร็วแบบฮิสเทอรีซิส ใช้หลักการ โดยตั้งค่าความเร็วเป้าหมาย หากรถไฟฟ้ามีความเร็วต่ำกว่าขอบเขตล่าง (Lower Bound) ของแถบความเร็วที่กำหนด ตัวควบคุมจะสั่งให้สร้างแรงจุดที่ค่าสูงสุด (Maximum Tractive Effort) เพื่อลดความเร็วของรถไฟฟ้าให้อยู่ภายในแถบความเร็วที่กำหนด ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แผนภาพการควบคุมความเร็วของขบวนรถไฟฟ้าแบบฮิสเทอรีซิส  
(ที่มา: Kulworawanichpong, 2004. (pp.134))

ข. การควบคุมความเร็วแบบสัดส่วน จะให้แรงจุดสูงสุด ดังรูปที่ 4.13 เมื่อรถไฟฟ้ามีความเร็วต่ำกว่า  $u_1$  และ  $u_2$  จะใช้แรงจุดบางส่วนซึ่งแปรผันตามความเร็วที่ความเร็วในช่วง  $u_2$  และ  $u_3$  เป็นการควบคุมแบบเล่นด้วยความเฉื่อย นั่นคือ จ่ายแรงจุดในช่วงนี้ เมื่อความเร็วอยู่ในช่วง  $u_3$  และ  $u_4$  จะเป็นการเบรกด้วยแรงเบรกบางส่วนตามเส้นกราฟ และเมื่อความเร็วมีความเร็วมากกว่า  $u_4$  จะใช้แรงเบรกสูงสุด เพื่อลดความเร็วในการเคลื่อนที่



รูปที่ 4.13 แผนภาพการควบคุมความเร็วของขบวนรถไฟฟ้าแบบสัดส่วน  
(ที่มา: Kulworawanichpong, 2004. (pp.134))

การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า เมื่อทราบค่าความเร่งและแรงฉุดจะใช้สมการการเคลื่อนที่เชิงเส้น หากช่วงเวลาที่พิจารณามีค่าเล็กเพียงพอที่จะทำให้ความเร่งของการเคลื่อนที่มีค่าคงที่ในช่วงที่พิจารณาสมการที่ใช้คำนวณความเร็วและตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้างดังสมการที่ 4.33 และสมการที่ 4.34

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a \cdot \Delta t \quad (4.33)$$

$$d(t + \Delta t) = d(t) + v(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a \cdot (\Delta t)^2 \quad (4.34)$$

โดยที่  $v(t)$  และ  $v(t + \Delta t)$  แทน ความเร็วต้นและปลายของช่วงเวลาที่พิจารณา  
 $d(t)$  แทน ตำแหน่งเริ่มต้นของช่วงเวลาที่พิจารณา  
 $d(t + \Delta t)$  แทน ตำแหน่งปลายของช่วงเวลาที่พิจารณา

#### 4.4 โปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

หัวข้อนี้นำเสนอโปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มหนึ่งคัน ประกอบด้วย การคำนวณการเคลื่อนที่และสมรรถนะของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม และการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งแบ่งการศึกษาาระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนตามรูปแบบระบบที่มีใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงแรงดัน 750 V และระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ 3 เฟส แรงดัน 600 V 50 Hz สามารถแสดงรายละเอียดดังนี้

#### 4.4.1 ระบบทดสอบ

การประเมินระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม จะจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าบนทางวิ่งกรณีศึกษาพื้นที่ของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 4.14 การประเมินระบบทดสอบจะอาศัยทางวิ่งที่มีระยะทางโดยประมาณ 1.5 km กำหนดให้มีสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี คือ สถานีต้นทางและสถานีปลายทาง โดยตำแหน่งของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนติดตั้งใกล้กับสถานีต้นทาง จำลองสถานการณ์กำหนดให้บริการรับส่งผู้โดยสารเคลื่อนที่ทำงานแบบไปและกลับ

#### 4.4.2 เงื่อนไขระบบทดสอบ

กำหนดคุณลักษณะของรถไฟฟ้า โดยหาสมรรถนะการขับเคลื่อนไฟฟ้าที่ต้องการ เช่น น้ำหนักรถไฟฟ้า น้ำหนักบรรทุก ระยะทางวิ่ง ความเร็วสูงสุด มุมไต่ทางชัน อัตราเร่ง หรือแรงบิดสูงสุด และแรงต้านของรถไฟฟ้า เป็นต้น โดยผู้วิจัยได้ระบุข้อมูลดังกล่าวไว้ในตารางที่ 4.1



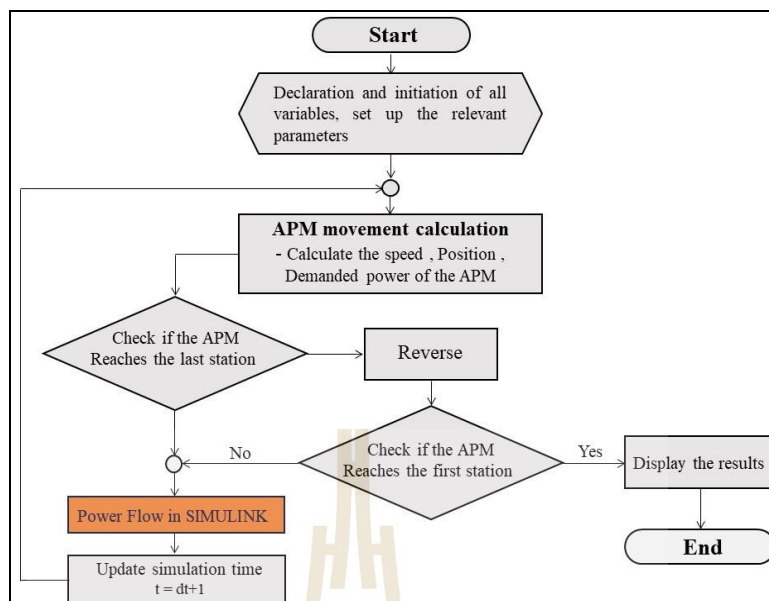
รูปที่ 4.14 ผังระบบทดสอบ

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขระบบทดสอบ

ขนาดและน้ำหนัก	
มิติภายนอก (กว้าง × ยาว × สูง) m	2.5×6.5×3
น้ำหนักรถไฟฟ้า (kg)	4,500
สมรรถนะ	
น้ำหนักบรรทุก (kg)	2,000
ความเร็วสูงสุด (km/h)	50
ระยะทางวิ่ง (km)	1.5
มุมไต่ทางชัน (%)	ไม่เกิน 5
อัตราเร่ง ( $m/s^2$ )	0.6
พื้นทางวิ่ง	คอนกรีต พื้นเรียบ
ประสิทธิภาพ Gear Motor and Inverter (%)	98, 88, 98
แรงต้านของรถไฟฟ้า $F_R$ (สมการที่ 4.29)	$A = 6.5$ $B = 0.03$ $C = 0.00034$ $K_0 = 1.3$ และ $K_1 = 29$

#### 4.4.3 การทำงานของโปรแกรมจำลองผล

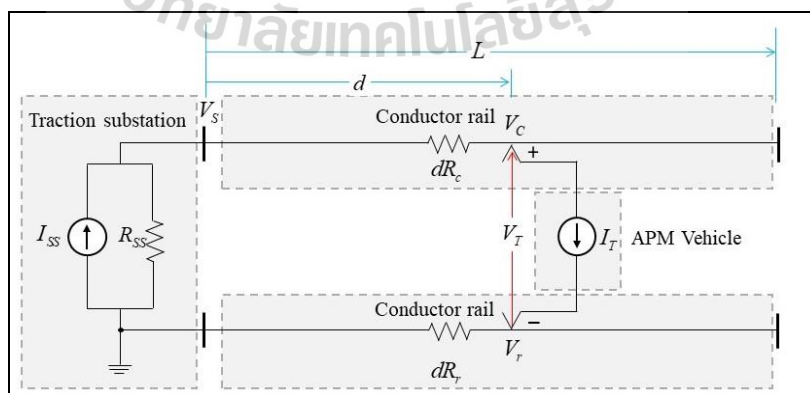
การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็มอาศัยชุดคำสั่ง โปรแกรมเมทแลป โดยแสดงอัลกอริทึมการทำงานของโปรแกรมจำลองผล ดังแสดงผังการทำงานในรูปที่ 4.15 เริ่มจากการประกาศและกำหนดค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ พารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน พารามิเตอร์ของรางตัวนำ และพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม เป็นต้น จากนั้นจะคำนวณหา ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม เช่น ความเร็ว ระยะทาง ตำแหน่ง และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อน หากรถไฟฟ้าเอพีเอ็มเคลื่อนที่ไปยังสถานีสุดท้าย และเคลื่อนที่ในทิศทางย้อนกลับมา ยังสถานีแรก ให้ยุติกระบวนการ หลังจากนั้นทำการส่งค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนและ ตำแหน่งของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ไปทดสอบกับวงจรจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนที่สร้างขึ้นด้วย ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับซิมมูลิงก์ในโปรแกรมเมทแลปเพื่อหาการไหลของกำลังไฟฟ้า จากนั้นเพิ่มเวลาจำลองผลไปยังลำดับเวลาถัดไป โดยทำซ้ำจนกว่าเวลาจะถึงเวลาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โปรแกรมจะส่งข้อมูลมาเก็บไว้บนโปรแกรมเมทแลป และแสดงผลจำลองต่อไป



รูปที่ 4.15 ผังลำดับการทำงานของโปรแกรมจำลองผล

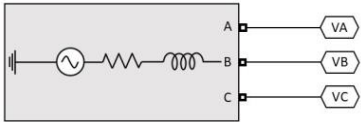
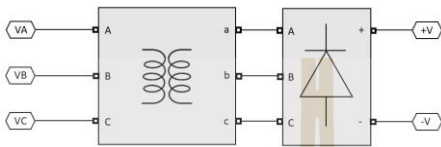
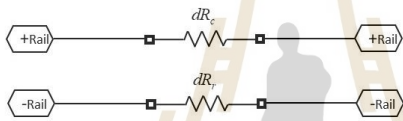
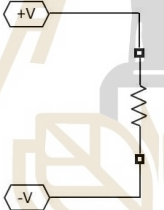
#### 4.4.4 วงจรจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง

วงจรสมมูลระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็มอาศัยการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีโนด มีส่วนประกอบ 4 ส่วน คือ ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สถานีเรียงกระแส รางตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้า และตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็มแสดงดังรูปที่ 4.16 แต่ส่วนประกอบจะถูกสร้างขึ้นบนชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับซิมมูลิงกิ้งของโปรแกรมแมทแล็บ โดยค่าพารามิเตอร์ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง แสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.16 วงจรสมมูลระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

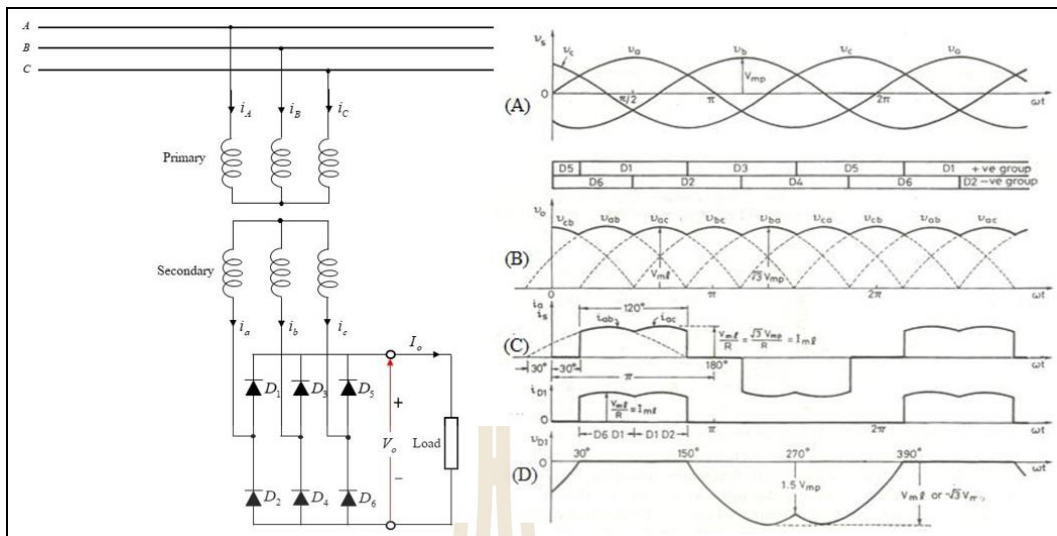
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดตรง

Component	Simulink Modeling	Parameters
Electric power		$V_{L-L} = 22 \text{ kV}, 50 \text{ Hz}$
Six-pulse AC/DC converter		Power = 250kVA, 50 Hz HV Side $V_{L-L}=22\text{kV}$ $R=0.02 \text{ m}\Omega$ $L= 0.07 \text{ m}\Omega$ LV Side $V_{L-L}=530\text{V}$ $R=7.55 \text{ m}\Omega$ $L= 77.8 \text{ m}\Omega$ Bridge $R_s = 500 \Omega$ $V_f = 0.8\text{V}$ and $R_{on} = 19 \text{ m}\Omega$ Voltage = 750 V
Conductor Rail		Resistance = 0.148 $\Omega$ /km
APM Vehicle		Nominal voltage = 750 V Load type: constant P

จากตารางที่ 4.2 แสดงชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังแต่ละภาคส่วนดังแสดงรายละเอียดดังนี้

1. ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA Substation) ระบบ 3 เฟส ที่ระดับแรงดัน 22 kV 50 Hz แทนด้วยชุดบล็อก Three-Phase Source
2. สถานีเรียงกระแส (Rectifier Substation) ประกอบไปด้วย หม้อแปลงกำลัง มีหน้าที่ลดระดับแรงดัน 3 เฟส จาก 22 kV ไปเป็น 530 V เชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงเลือกใช้ DYn11 เป็นมาตรฐานแทนด้วยบล็อก Three-Phase Transformer จากนั้นเรียงกระแสสลับเป็นกระแสดตรง ด้วยวงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ แทนด้วยบล็อก Bridge Diode โครงสร้างวงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์และรูปคลื่นแรงดัน กระแส ของด้านขาเข้าและด้านขาออกแสดงดังรูปที่ 4.17





รูปที่ 4.17 วงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ และรูปคลื่น

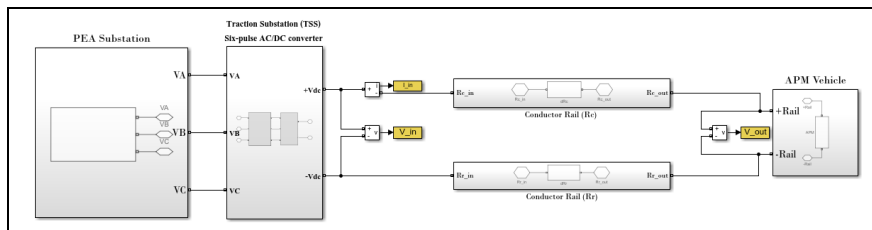
การหาค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย  $V_o$  จะหาได้จากสมการที่ 4.35

$$V_o = \frac{1}{\text{periodicity}} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} V_{ab} d(\omega t) \tag{4.35}$$

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.17 จะเห็นว่าแรงดันด้านเข้า  $V_{ab}$  ที่  $\omega t = 0$  คือ  $V_{ml} \sin 30^\circ$  และคาบเวลาเป็น  $60^\circ$  หรือ  $\pi/3 \text{ rad}$  จะสามารถหาค่า  $V_o$  ได้จากสมการที่ 4.36

$$V_o = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} V_{ml} \sin(\omega t + 30^\circ) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_c \tag{4.36}$$

3. ระบบรางตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้า (Conductor Rail) แทนด้วยบล็อก Series RL Branch
  4. ตัวระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (APM Vehicle) แทนด้วยบล็อก Series RL Load
- จากส่วนประกอบแบบจำลองทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสร้างแบบจำลองผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับซิมมูลิงก์ของโปรแกรมเมทแลป ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 วงจรจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงบนซิมมูลติงก์ของโปรแกรมเมทแลป

การจำลองบนซิมมูลติงก์นี้จะใช้ระยะเวลาจำลองผล (Simulation Time) จาก 0-0.2 s ต่อหนึ่งรอบระยะเวลาคำนวณ (Time Step:  $\Delta t$ ) ในโปรแกรมเมทแลป กำหนดการหาผลเฉลยในซิมมูลติงก์เป็นแบบอัตโนมัติ (Automatic Solver) โดยรูปแบบสมการที่ใช้ในการคำนวณทางไฟฟ้าร่วมกับซิมมูลติงก์ แสดงได้ดังนี้

$$V_{SS(k+1)} = V_{SS(end)} \quad (4.37)$$

$$I_{SS(k+1)} = I_{SS(end)} \quad (4.38)$$

$$V_{Tr(k+1)} = V_{Tr(end)} \quad (4.39)$$

- เมื่อ
- $V_{SS(k+1)}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ารอบปัจจุบันของสถานีจ่ายไฟฟ้าในโปรแกรมเมทแลป, (V)
  - $V_{SS(end)}$  คือ แรงดันไฟฟ้าค่าสุดท้ายของสถานีจ่ายไฟฟ้าในซิมมูลติงก์แต่ละรอบ, (V)
  - $I_{SS(k+1)}$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้ารอบปัจจุบันของสถานีจ่ายไฟฟ้าในโปรแกรมเมทแลป, (A)
  - $I_{SS(end)}$  คือ กระแสไฟฟ้าค่าสุดท้ายของสถานีจ่ายไฟฟ้าในซิมมูลติงก์แต่ละรอบ, (A)
  - $V_{Tr(k+1)}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ารอบปัจจุบันของรถเอพีเอ็มในโปรแกรมเมทแลป, (V)
  - $V_{Tr(end)}$  คือ แรงดันไฟฟ้าค่าสุดท้ายของรถเอพีเอ็มในซิมมูลติงก์แต่ละรอบ, (V)

การคำนวณผลเฉลยของกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง พิจารณาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$P_{SS(k+1)} = V_{SS(k+1)} \cdot I_{SS(k+1)} \quad (4.40)$$

$$P_{tr(k+1)} = V_{tr(k+1)} \cdot I_{SS(k+1)} \quad (4.41)$$

$$P_{loss(k+1)} = P_{SS(k+1)} - P_{tr(k+1)} \quad (4.42)$$

$$E_{SS(k+1)} = E_{SS(k)} + P_{SS(k+1)} \cdot \Delta t \quad (4.43)$$

$$E_{loss(k+1)} = E_{loss(k)} + P_{loss(k+1)} \cdot \Delta t \quad (4.44)$$

เมื่อ	$P_{SS(k+1)}, P_{tr(k+1)}$	คือ กำลังไฟฟ้ารอบปัจจุบันในโปรแกรมเมทแลปที่สถานีจ่ายไฟฟ้าและที่รูดเอพีเอ็ม, (W)
	$P_{loss(k+1)}$	คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียรอบปัจจุบันในโปรแกรมเมทแลป, (W)
	$E_{SS(k+1)}, E_{SS(k)}$	คือ พลังงานไฟฟ้ารอบปัจจุบันและรอบก่อนหน้าในโปรแกรมเมทแลปที่สถานีจ่ายไฟฟ้า, (Wh)
	$E_{loss(k+1)}, E_{loss(k)}$	คือ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรอบปัจจุบันและรอบก่อนหน้าในโปรแกรมเมทแลป, (Wh)

การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าตก และเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า  
ขับเคลื่อนกระแสดตรง พิจารณาได้ดังสมการข้างล่างนี้

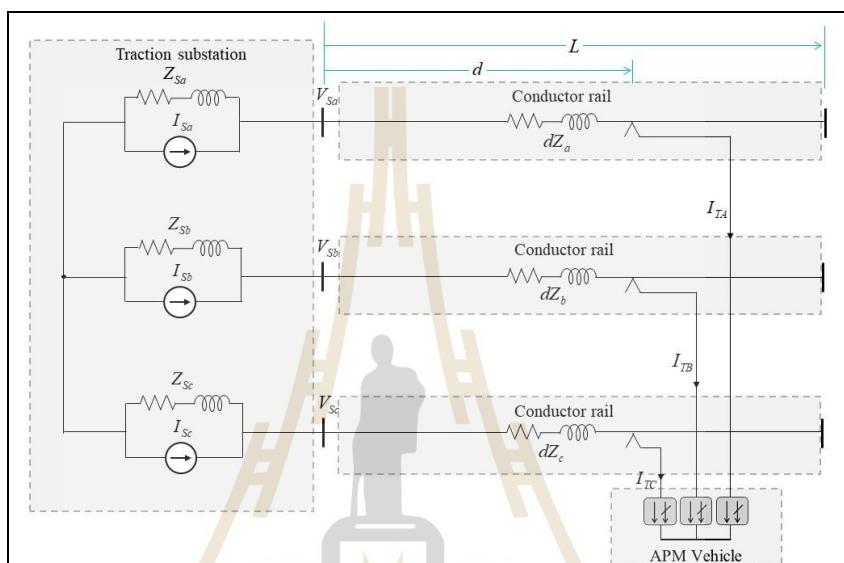
$$\Delta V = V_S - V_{tr} \quad (4.51)$$

$$\varepsilon = \left( \frac{V_S - V_{tr}}{V_S} \right) \times 100 \quad (4.52)$$

เมื่อ	$\Delta V$	แทน แรงดันไฟฟ้าตก, (V)
	$\varepsilon$	แทน เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้า, (%)
	$V_S$	แทนแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งของสถานีจ่ายไฟฟ้า, (V)
	$V_{tr}$	แทนแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสัมผัสเข้าสู่รูดไฟฟ้า, (V)

#### 4.4.5 วงจรจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

วงจรจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ 3 เฟส 50 Hz จะอาศัยการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ด้วยวิธี โนด โดยมีส่วนประกอบ 4 ส่วน คือ ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ รางตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้า และตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.19



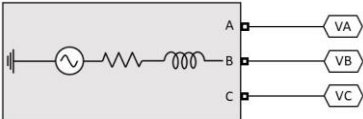
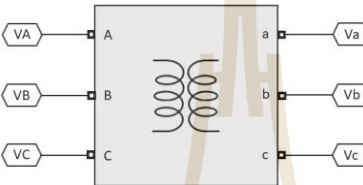
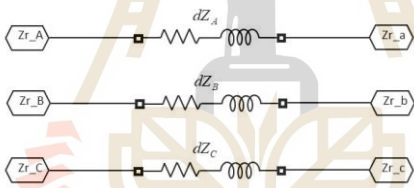
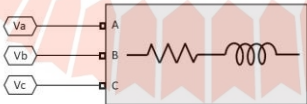
รูปที่ 4.19 วงจรสมมูลระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน 3 เฟส สำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

แต่ละส่วนประกอบจะถูกสร้างบนชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของซิมมูลิงก์มีรายละเอียด

ดังนี้

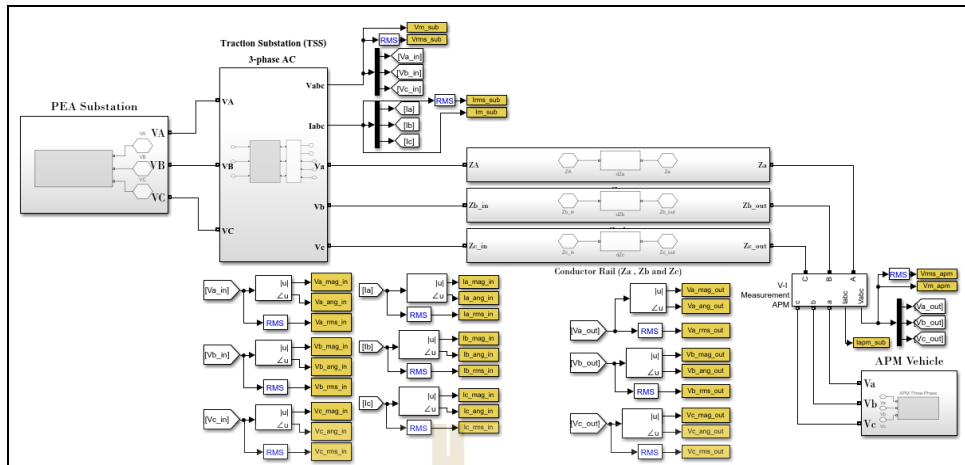
1. ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ระบบ 3 เฟส ระดับแรงดัน 22 kV ถูกแทนด้วยชุดบล็อก Three-Phase Source
2. สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ (AC Traction Substation) ประกอบไปด้วยหม้อแปลงกำลังไฟฟ้า มีหน้าที่ลดระดับแรงดัน 3 เฟส จาก 22 kV ไปเป็น 600 V กำหนดการเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลง เลือกใช้ DYn11 เป็นมาตรฐาน ถูกแทนด้วยบล็อก Three-Phase Transformer
3. ระบบรางตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้า (Conductor Rail) ถูกแทนด้วยชุดบล็อก Series RL Branch
4. ตัวระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (APM Vehicle) ถูกแทนด้วยชุดบล็อก Series RL Load โดยค่าพารามิเตอร์แต่ละส่วนประกอบจะแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

Component	Simulink Modeling	Parameters
Traction Substation		$V_{L-L} = 22 \text{ kV}, 50 \text{ Hz}$
Transformers		Power = 250kVA, 50 Hz HV Side $V_{L-L} = 22 \text{ kV}$ $R = 0.02 \text{ m}\Omega$ $L = 0.07 \text{ m}\Omega$ LV Side $V_{L-L} = 530 \text{ V}$ $R = 7.55 \text{ m}\Omega$ $L = 77.8 \text{ m}\Omega$
Conductor Rail		Resistance = 0.148 $\Omega$ /km Impedance = 0.253 $\Omega$ /km
APM Vehicle		Nominal voltage = 600 V Nominal frequency = 50 Hz Load type: constant PQ

หมายเหตุ: ข้อมูลจำเพาะของรางตัวนำอ้างอิง จากภาคผนวก ข.

ส่วนประกอบแบบจำลองทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น สามารถแสดงแบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมซึ่งมีอยู่ในโปรแกรมเมทแลป ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 การจำลองผลของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับ 3 เฟส

รูปแบบสมการที่ใช้ในการคำนวณทางไฟฟ้าร่วมกับซิมมูลิงก์ แสดงได้ดังนี้

$$V_{Sa(k+1)} = V_{Sa(end)} \cdot (\cos \phi_a + j \sin \phi_a)$$

$$V_{Sb(k+1)} = V_{Sb(end)} \cdot (\cos \phi_b + j \sin \phi_b)$$

$$V_{Sc(k+1)} = V_{Sc(end)} \cdot (\cos \phi_c + j \sin \phi_c)$$

(4.53)

$$V_{Sab(k+1)} = V_{Sa(k+1)} - V_{Sb(k+1)}$$

$$V_{Sbc(k+1)} = V_{Sb(k+1)} - V_{Sc(k+1)}$$

$$V_{Sca(k+1)} = V_{Sc(k+1)} - V_{Sa(k+1)}$$

(4.54)

$$I_{Sa(k+1)} = I_{Sa(end)} \cdot (\cos \phi_a + j \sin \phi_a)$$

$$I_{Sb(k+1)} = I_{Sb(end)} \cdot (\cos \phi_b + j \sin \phi_b)$$



$$I_{Sc(k+1)} = I_{Sc(end)} \cdot (\cos \phi_c + j \sin \phi_c) \quad (4.55)$$

$$V_{Ta(k+1)} = V_{Ta(end)} \cdot (\cos \phi_a + j \sin \phi_a)$$

$$V_{Tb(k+1)} = V_{Tb(end)} \cdot (\cos \phi_b + j \sin \phi_b)$$

$$V_{Tc(k+1)} = V_{Tc(end)} \cdot (\cos \phi_c + j \sin \phi_c) \quad (4.56)$$

$$V_{Tab(k+1)} = V_{Ta(k+1)} - V_{Tb(k+1)}$$

$$V_{Tbc(k+1)} = V_{Tb(k+1)} - V_{Tc(k+1)}$$

$$V_{Tca(k+1)} = V_{Tc(k+1)} - V_{Ta(k+1)} \quad (4.57)$$

เมื่อ

$V_{Sa(k+1)}$ ,  $V_{Sb(k+1)}$  และ  $V_{Sc(k+1)}$  คือ ค่าแรงดันระหว่างเฟสรอบปัจจุบันของสถานีจ่ายไฟฟ้าในโปรแกรมแมทแลป, ( $V_{rms}$ )

$V_{Sa(end)}$ ,  $V_{Sb(end)}$  และ  $V_{Sc(end)}$  คือ แรงดันระหว่างเฟสค่าสุดท้ายของสถานีจ่ายไฟฟ้าในซิมมูลิงก์แต่ละรอบ, ( $V_{rms}$ )

$V_{Sab(k+1)}$ ,  $V_{Sbc(k+1)}$  และ  $V_{Sca(k+1)}$  คือ ค่าแรงดันระหว่างสายรอบปัจจุบันของสถานีจ่ายไฟฟ้าในโปรแกรมแมทแลป, ( $V_{rms}$ )

$I_{Sa(k+1)}$ ,  $I_{Sb(k+1)}$  และ  $I_{Sc(k+1)}$  คือ ค่ากระแสระหว่างสายรอบปัจจุบันของสถานีจ่ายไฟฟ้าในโปรแกรมแมทแลป, ( $A_{rms}$ )

$I_{Sa(end)}$ ,  $I_{Sb(end)}$  และ  $I_{Sc(end)}$  คือ กระแสระหว่างเฟสค่าสุดท้ายของสถานีจ่ายไฟฟ้าในซิมมูลิงก์แต่ละรอบ, ( $A_{rms}$ )

$V_{Ta(k+1)}$ ,  $V_{Tb(k+1)}$  และ  $V_{Tc(k+1)}$  คือ ค่าแรงดันระหว่างเฟสรอบปัจจุบันของรถเอพีเอ็มในโปรแกรมแมทแลป, ( $V_{rms}$ )

$V_{Ta(end)}$ ,  $V_{Tb(end)}$  และ  $V_{Tc(end)}$  คือ แรงดันระหว่างเฟสค่าสุดท้ายของรถเอพีเอ็มในซิมมูลิงก์แต่ละรอบ, ( $V_{rms}$ )

$V_{Tab(k+1)}$ ,  $V_{Tbc(k+1)}$  และ  $V_{Tca(k+1)}$  คือ ค่าแรงดันระหว่างสายรอบปัจจุบันของรถเอพีเอ็มในโปรแกรม  
แมทแลป, ( $V_{\text{rms}}$ )  
 $\phi$  คือ มุมเฟสทางไฟฟ้า, (degree)

การคำนวณผลเฉลยของกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า สามารถพิจารณาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$S_{SS} = (V_{Sa(k+1)} \cdot I_{Sa(k+1)}^*) + (V_{Sb(k+1)} \cdot I_{Sb(k+1)}^*) + (V_{Sc(k+1)} \cdot I_{Sc(k+1)}^*) \quad (4.58)$$

$$S_{tr} = (V_{Ta(k+1)} \cdot I_{Ta(k+1)}^*) + (V_{Tb(k+1)} \cdot I_{Tb(k+1)}^*) + (V_{Tc(k+1)} \cdot I_{Tc(k+1)}^*) \quad (4.59)$$

$$P_{SS(k+1)} = \text{Re}(S_{SS}) \quad (4.60)$$

$$Q_{SS(k+1)} = \text{Im}(S_{SS}) \quad (4.61)$$

$$P_{tr(k+1)} = \text{Re}(S_{tr}) \quad (4.62)$$

$$Q_{tr(k+1)} = \text{Im}(S_{tr}) \quad (4.63)$$

$$P_{loss(k+1)} = P_{SS(k+1)} - P_{tr(k+1)} \quad (4.64)$$

$$E_{SS(k+1)} = E_{SS(k)} + P_{SS(k+1)} \cdot \Delta t \quad (4.65)$$

$$E_{loss(k+1)} = E_{loss(k)} + P_{loss(k+1)} \cdot \Delta t \quad (4.66)$$

เมื่อ  $S_{SS}$ ,  $S_{tr}$  คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่สถานีจ่ายไฟฟ้าและที่รถเอพีเอ็ม, (VA)  
 $P_{SS(k+1)}$ ,  $P_{tr(k+1)}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงรอบปัจจุบันในโปรแกรมแมทแลป ที่สถานีจ่ายไฟฟ้า  
และที่รถเอพีเอ็ม, (W)

$Q_{SS(k+1)}, Q_{Tr(k+1)}$	คือ กำลังไฟฟ้าด้านกลับรอบปัจจุบันในโปรแกรมแมทแลปที่สถานีจ่ายไฟฟ้าและที่รถเอพีเอ็ม, (VAR)
$P_{loss(k+1)}$	คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียรอบปัจจุบันในโปรแกรมแมทแลป, (W)
$E_{SS(k+1)}, E_{SS(k)}$	คือ พลังงานไฟฟ้ารอบปัจจุบันและรอบก่อนหน้าในโปรแกรมแมทแลปที่สถานีจ่ายไฟฟ้า, (Wh)
$E_{loss(k+1)}, E_{loss(k)}$	คือ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรอบปัจจุบันและรอบก่อนหน้าในโปรแกรมแมทแลป, (Wh)

การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าตก และเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส พิจารณาได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$\Delta V = V_{S_L} - V_{T_L} \quad (4.67)$$

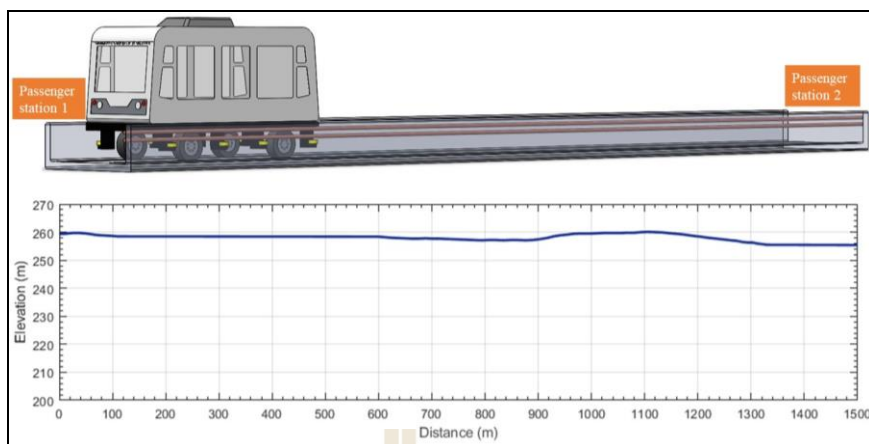
$$\varepsilon = \left( \frac{V_{S_L} - V_{T_L}}{V_{S_L}} \right) \times 100 \quad (4.68)$$

เมื่อ	$\Delta V$	แทน แรงดันไฟฟ้าตก, (V)
	$\varepsilon$	แทน เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้า, (%)
	$V_{S_L}$	แทน แรงดันระหว่างสาย (Line Voltage) ที่สถานีไฟฟ้า, (V)
	$V_{T_L}$	แทน แรงดันระหว่างสาย (Line Voltage) ที่ข้ามผัสเข้าสู่รถไฟฟ้า, (V)

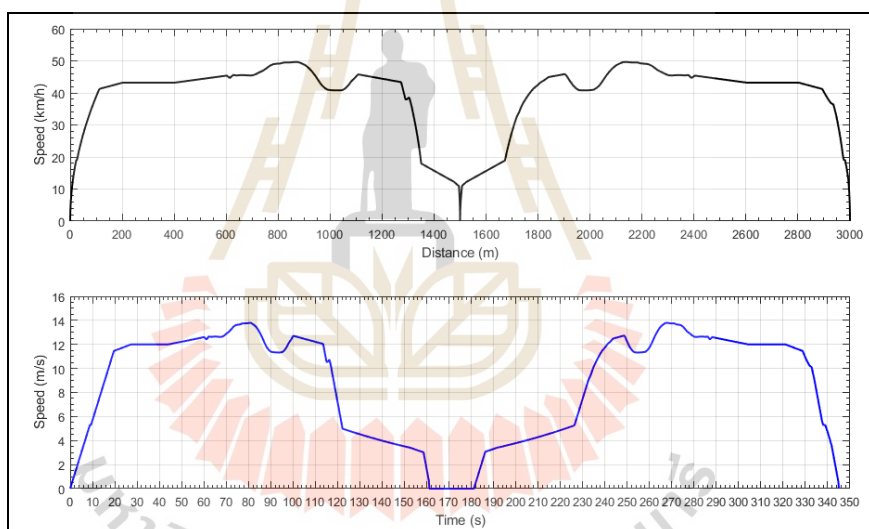
## 4.5 ผลการจำลองและการประเมินระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

### 4.5.1 ผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

ข้อมูลระบบทดสอบและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ถูกกำหนดในชุดคำสั่งที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรมแมทแลปในโดเมนเชิงเวลา แบ่งช่วงเวลาคำนวณออกเป็นขั้นเวลา (Time Step) กำหนดความละเอียดเป็น 0.2 s โดยแสดงข้อมูลระดับความชันของทางวิ่ง ดังรูปที่ 4.21 เคลื่อนที่รับส่งผู้โดยสารด้วยความเร็วสูงสุด 50 km/h ใช้เวลาจอดที่สถานีปลายทาง 20 s การทำงานของโปรแกรมจะสิ้นสุดเมื่อรถไฟฟ้าเอพีเอ็มเคลื่อนที่ไปยังสถานีสุดท้าย และเคลื่อนที่ในทิศทางย้อนกลับมายังสถานีแรก โดยใช้ระยะเวลาทั้งหมด 345 s ดังแสดงในรูปที่ 4.22



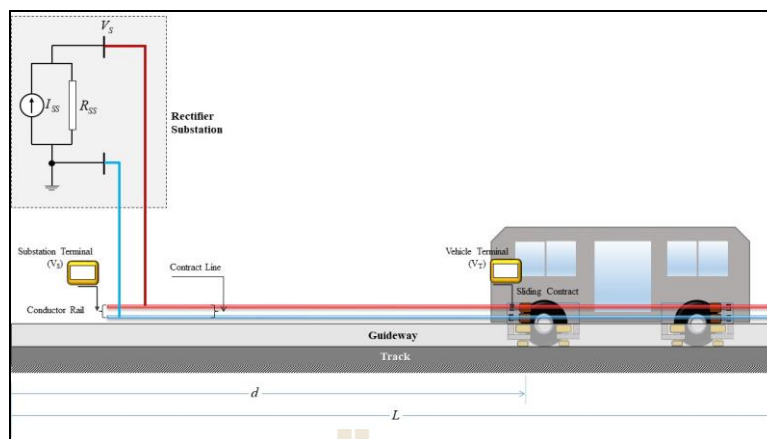
รูปที่ 4.21 ระดับความชันของเส้นทางวิ่ง



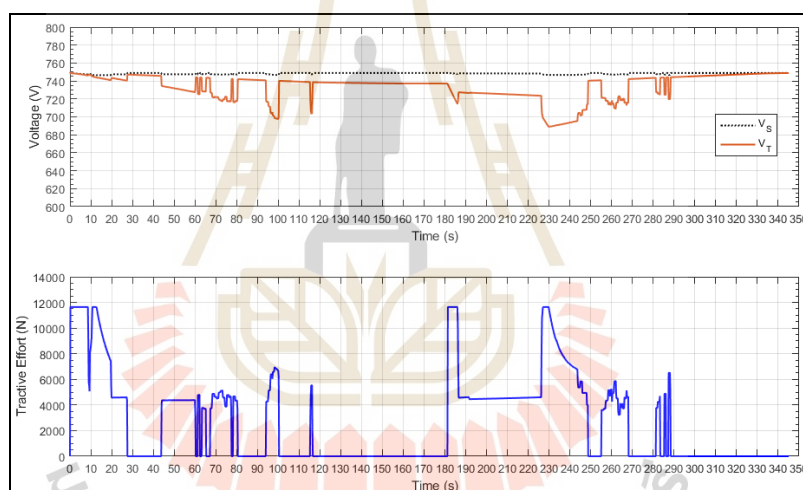
รูปที่ 4.22 ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

#### 4.5.2 การทดสอบจำลองผลระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดตรง

ตำแหน่งจุดวัดของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดตรง โดยที่ขั้วสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน คือ  $V_S$  และที่ขั้วสัมผัสรับไฟฟ้าเข้าสู่รถไฟฟ้าเอพีเอ็ม คือ  $V_T$  ดังแสดงในรูปที่ 4.23

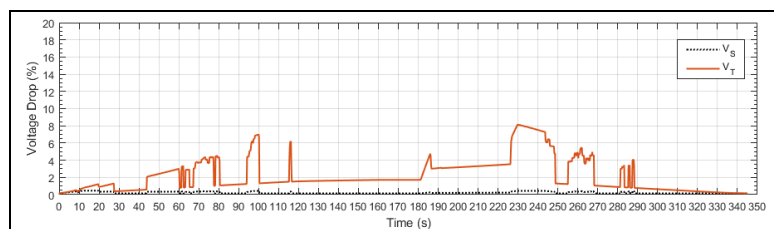


รูปที่ 4.23 ตำแหน่งจุดวัดทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง

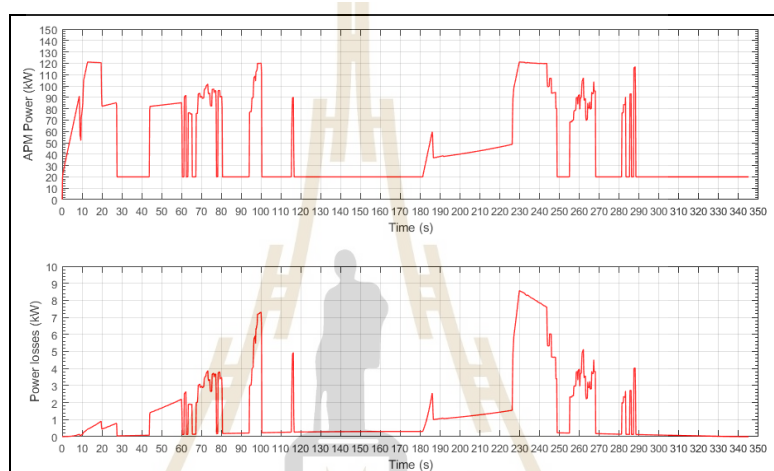


รูปที่ 4.24 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าและแรงจูง กรณ์ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง

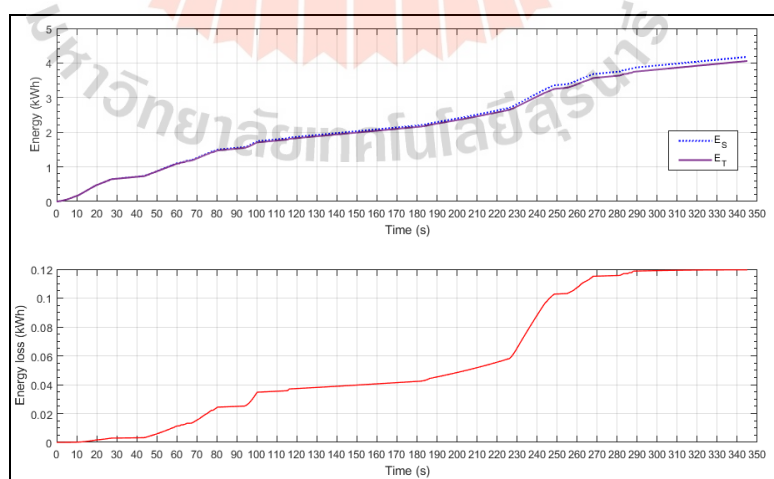
ในรูปที่ 4.24 แสดงการทำงานโหมดวิ่งจากต้นทางไปยังปลายทางใช้เวลา 160 s และจอดรับส่งผู้โดยสาร 20 s พบว่า แรงดันไฟฟ้าจะแปรผันตามแรงจูงขณะรถไฟฟ้าเอพีเอ็มเคลื่อนที่ โดยที่ เวลา 99.6 s ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดตกคร่อมที่ขั้วสัมผัสของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม เป็น 697.8 V จากแรงดันไฟฟ้าปกติ 750 V จากนั้นจะทำงานในโหมดวิ่งจากต้นทางไปยังปลายทาง จากเวลา 180 s ถึง 340 s พบว่า ที่เวลา 229.80 s มีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดตกคร่อมที่ขั้วสัมผัสของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม เป็น 689.0 V จากแรงดันไฟฟ้าปกติ 750 V เมื่อนำข้อมูลแรงดันไฟฟ้ามาคำนวณในสมการที่ 4.42 สามารถประเมินผลเป็นเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.25 พบว่า เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าสูงสุดเป็น 8.137 %



รูปที่ 4.25 เปอร์เซนต์แรงดันไฟฟ้ากรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง



รูปที่ 4.26 กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย กรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง



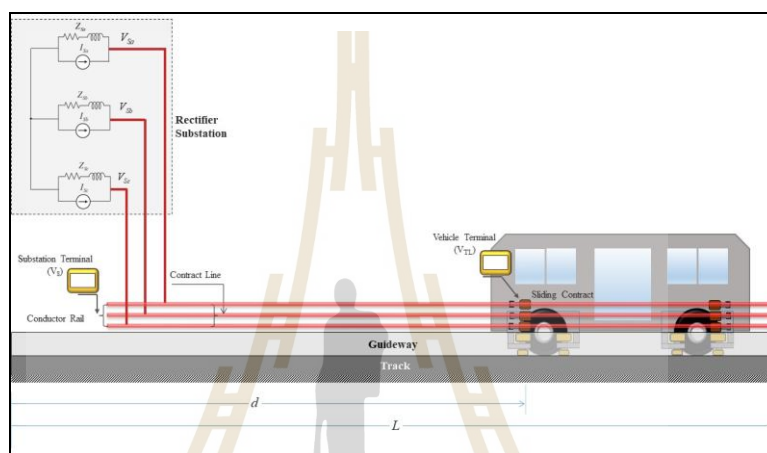
รูปที่ 4.27 พลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนและพลังงานสูญเสีย กรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง



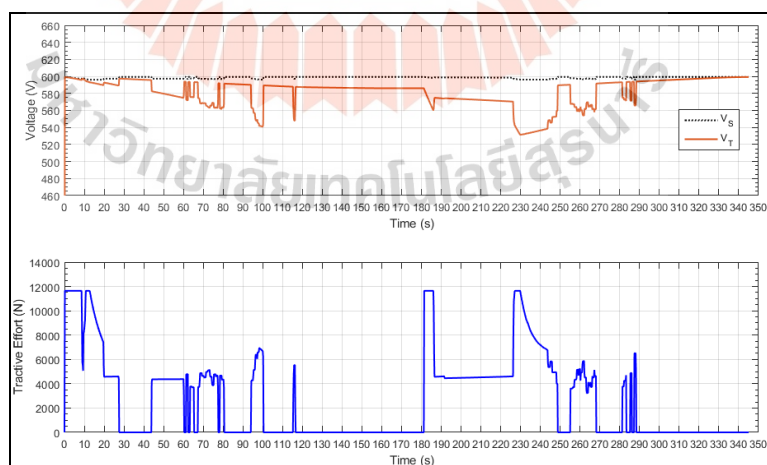
ผลของกำลังไฟฟ้า ในรูปที่ 4.26 แสดงกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนสูงสุดและกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุด มีค่าเป็น 121.12 kW และ 8.567 kW ตามลำดับ รูปที่ 4.27 แสดงผลของการใช้พลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าเป็น 4.057 kWh และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเป็น 0.119 kWh

#### 4.5.3 การทดสอบจำลองผลระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

จุดวัดระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับนำเสนอในรูปที่ 4.28 โดยตำแหน่งที่ขั้วสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน คือ  $V_S$  และตำแหน่งขั้วสัมผัสรับไฟฟ้าเข้าสู่รถไฟฟ้าเอพีเอ็ม คือ  $V_{TL}$

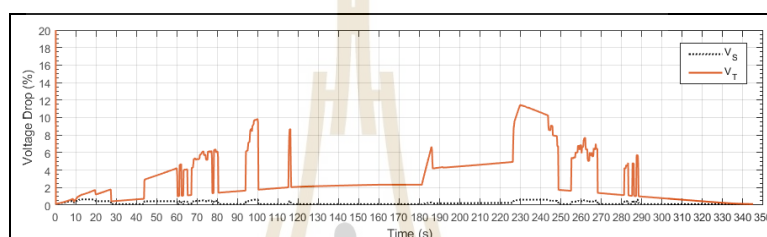


รูปที่ 4.28 ตำแหน่งจุดวัดทดสอบทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

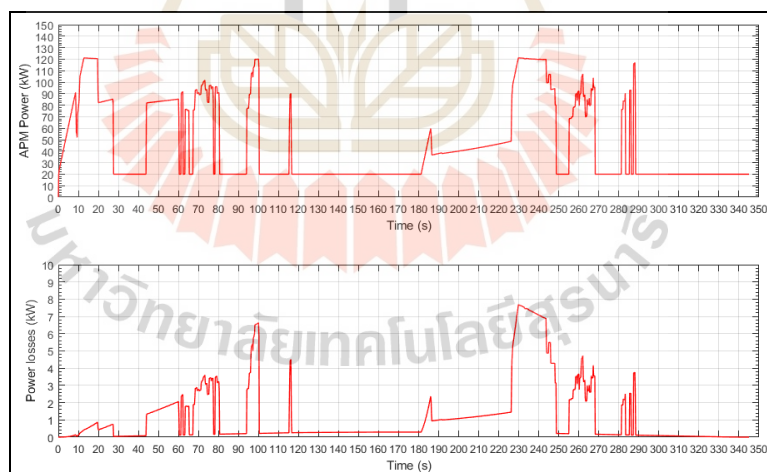


รูปที่ 4.29 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าและแรงจูง กรณิระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

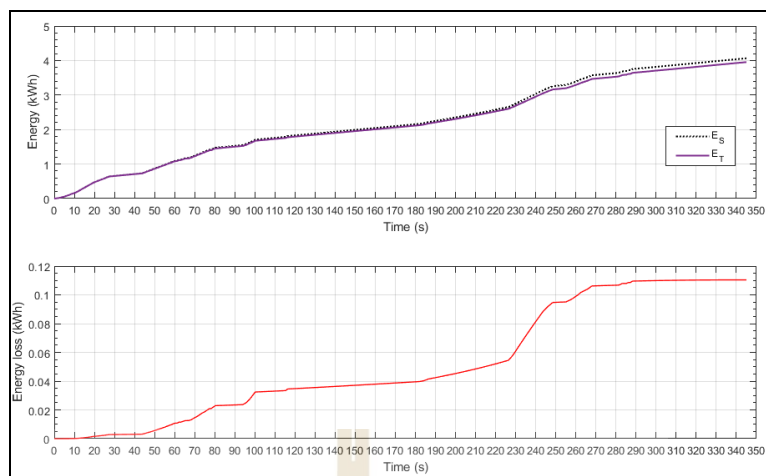
ผลของลักษณะแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 4.29 ทำงานในโหมดวิ่งจากต้นทางไปยังปลายทาง โดยใช้เวลาเคลื่อนที่จาก 0-160 s พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสัมผัสของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ที่เวลา 99 s มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเป็น 541.60 V จากแรงดันไฟฟ้าปกติ 600 V จากนั้นขณะทำงานในโหมดวิ่งจากปลายทางไปยังต้นทาง จากเวลา 180-340 s พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสัมผัสของรถไฟฟ้าเอพีเอ็มที่เวลา 230 s มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเป็น 531.40 V จากแรงดันไฟฟ้าปกติ 600 V เมื่อนำข้อมูลแรงดันไฟฟ้ามาคำนวณในสมการที่ 4.42 สามารถประเมินผลเป็นเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.30 พบว่า เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าสูงสุดเป็น 11.44 %



รูปที่ 4.30 เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้า กรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ



รูปที่ 4.31 กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนและกำลังไฟฟ้าสูญเสียกรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ



รูปที่ 4.32 พลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนและพลังงานสูญเสีย กรณีระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

ในรูปที่ 4.31 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนสูงสุดและกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุด มีค่าเป็น 121.12 kW และ 7.679 kW ตามลำดับ รูปที่ 4.32 แสดงผลของการใช้พลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าเป็น 3.953 kWh และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเป็น 0.110 kWh

#### 4.6 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

กรณีศึกษาทางวิศวกรรมบนพื้นที่โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ด้วยโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยศึกษาระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ที่ทั่วโลกใช้งานในปัจจุบัน ด้วยระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงแรงดัน 750 V และระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ 3 เฟส 50 Hz แรงดัน 600 V สามารถสรุปผลจำลองได้ดังตารางที่ 4.4

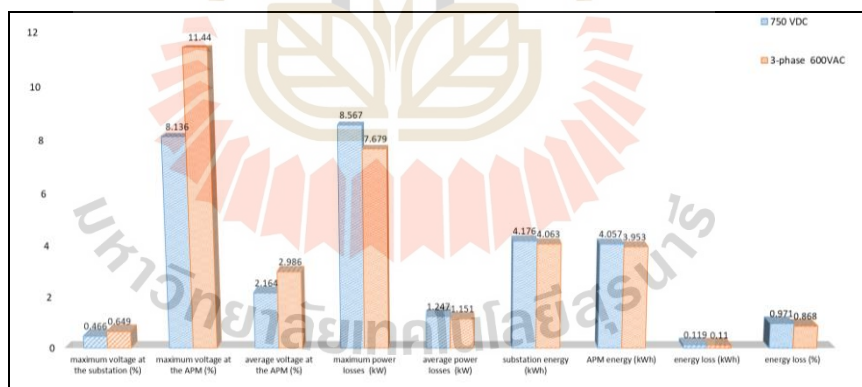
ตารางที่ 4.4 สรุปผลจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนทั้ง 2 ระบบ

Specification	Power Feeding System	
	750 VDC	3-phase 50Hz 600VAC
Minimum voltage at the substation (V)	746.503	596.101
Minimum voltage at the APM (V)	688.973	531.357
Maximum voltage at the substation (%)	0.466	0.649
Maximum voltage at the APM (%)	8.136	11.440

ตารางที่ 4.4 สรุปผลจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนทั้ง 2 ระบบ (ต่อ)

Specification	Power Feeding System	
	750 VDC	3-phase 50Hz 600VAC
Average voltage at the APM (%)	2.164	2.986
Maximum power losses (kW)	8.567	7.679
Average power losses (kW)	1.247	1.151
Substation energy (kWh)	4.176	4.063
APM energy (kWh)	4.057	3.953
Energy loss (kWh)	0.119	0.110
Energy loss (%)	0.971	0.868

จากข้อมูลสรุปในตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าทั้งสองระบบมีความสามารถในการจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนให้กับรถไฟฟ้าเอเอ็มขณะเคลื่อนที่ตามเงื่อนไขโดยทั้งสองระบบมีข้อดีหรือข้อจำกัดที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาในกราฟรูปที่ 4.31 โดยมีเหตุผลสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 4.33 ผลจำลองของระบบจ่ายไฟฟ้าทั้งสอง

#### ข้อดีของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงระดับแรงดัน 750 V

1. การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าดีกว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส
2. จำนวนของรางตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้าน้อยกว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

#### ข้อดีของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ 3 เฟส ระดับแรงดัน 600 V 50 Hz

1. กำลังไฟฟ้าสูญเสียและพลังงานไฟฟ้าสูญเสียน้อยกว่าระบบไฟฟ้ากระแสตรง

2. การใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าระบบไฟฟ้ากระแสตรง
3. ไม่จำเป็นต้องมีชุดวงจรเรียงกระแสผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
4. การบำรุงรักษาน้อยกว่าระบบไฟฟ้ากระแสตรง

#### 4.7 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนโดยทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม รวมถึงการคำนวณลักษณะสมบัติของแรงจลและกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ใช้งานเพื่อให้รถไฟฟ้าเอพีเอ็มเคลื่อนที่ไปบนทางวิ่งตามรูปแบบการเคลื่อนที่ที่กำหนด นอกจากนี้ได้นำเสนอ โปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มที่พัฒนาขึ้น โดยนำเสนอกรณีศึกษาระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็มตามรูปแบบที่มีใช้งานอยู่ปัจจุบัน ซึ่งจะเป็ผลดีทางด้าน การออกแบบสำหรับเลือกจุดทำงานให้การทำงานของระบบมีความเหมาะสมมีประสิทธิภาพ และการประหยัดพลังงาน



## บทที่ 5

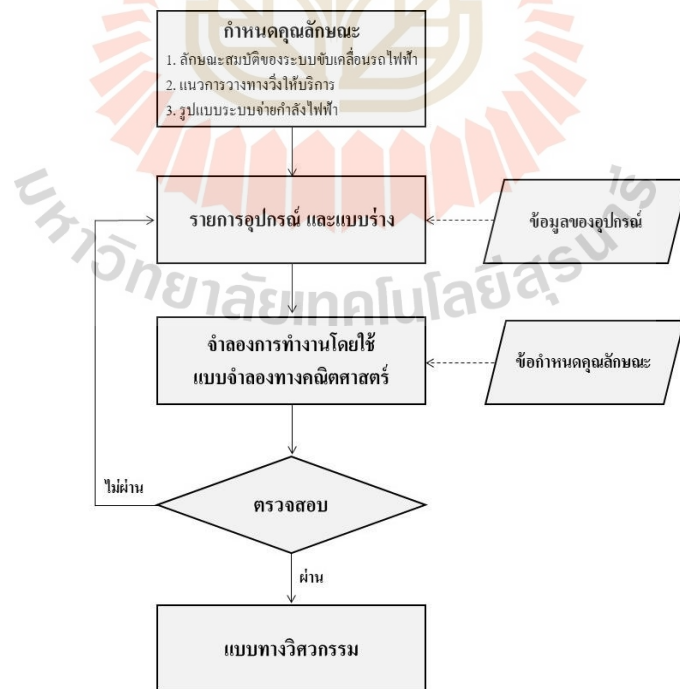
### การออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

#### 5.1 บทนำ

การศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม จำเป็นต้องมีการออกแบบระบบให้มีความปลอดภัยและมีพิคัดกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนระบบขนส่งผู้โดยสารรวมถึงอุปกรณ์อื่น ๆ ได้อย่างเพียงพอและมีประสิทธิภาพ ในบทนี้นำเสนอการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ระบบรางตัวนำไฟฟ้า และระบบการต่อลงดิน ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

#### 5.2 การออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

การออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการสร้างระบบดังกล่าว โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการวางแผนและออกแบบทางวิศวกรรม ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังต้นแบบสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม



จากผังขั้นตอนการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในรูปที่ 5.1 สามารถแสดงรายละเอียดแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

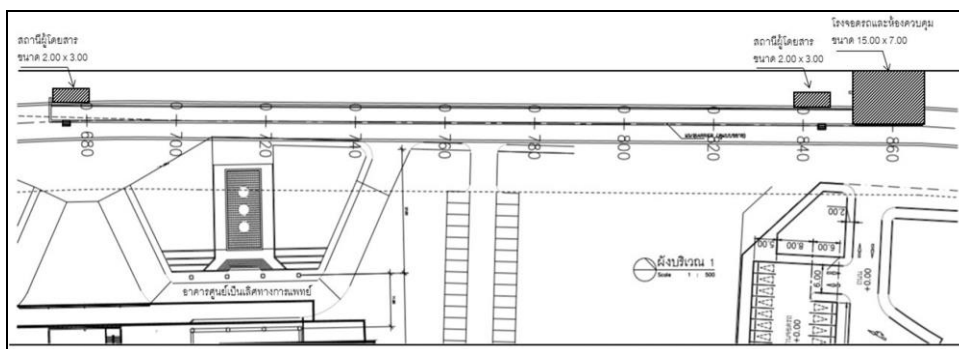
### 5.2.1 แนวการวางทางวิ่งของรถไฟฟ้า

การกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในงานวิทยานิพนธ์นี้ ใช้กรณีศึกษาบนพื้นที่ของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นหน่วยงานผู้ใช้ประโยชน์ เมื่อระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มใช้งานจริงได้อย่างสมบูรณ์ จะมีเป้าหมายเพื่อรับส่งผู้โดยสารหรือขนย้ายอุปกรณ์ทางการแพทย์ โดยทางวิ่งของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มจะประกอบด้วยทางวิ่งคอนกรีตเพื่อรองรับล้อของรถไฟฟ้า รางตัวนำไฟฟ้าและตัวบังคับนำทาง (Guide Way) มีรูปแบบการติดตั้ง 2 รูปแบบ คือ ติดตั้งบริเวณด้านข้างของตัวรถไฟฟ้า (Side Guide) และติดตั้งอยู่บริเวณกึ่งกลางของตัวรถไฟฟ้า (Central Guide) ซึ่งนำเสนอรายละเอียดในบทที่ 3 ด้วยเหตุผลทางด้านโครงสร้างพื้นฐาน และข้อจำกัดของพื้นที่สำหรับจัดสร้างทางวิ่งของรถไฟฟ้าจึงนำเสนอในรูปแบบการติดตั้งบริเวณด้านข้างของตัวรถไฟฟ้า



รูปที่ 5.2 พื้นที่ทางวิ่งของระบบรถไฟฟ้า

โดยเส้นทางวิ่งของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มจะเริ่มต้นจากบริเวณด้านหน้าของอาคารจอดรถสำหรับศูนย์ปฏิบัติการทางการแพทย์ ไปยังด้านหน้าของอาคารศูนย์เป็นเลิศทางการแพทย์ เป็นระยะทาง 200 m มีสถานีจอดรับส่งผู้โดยสาร 2 สถานี ภาพรวมเส้นทางการวิ่งของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม แสดงในรูปที่ 5.2 และได้ดำเนินการจัดทำแบบแนวทางการวิ่งรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แนวการวางทางวิ่งของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

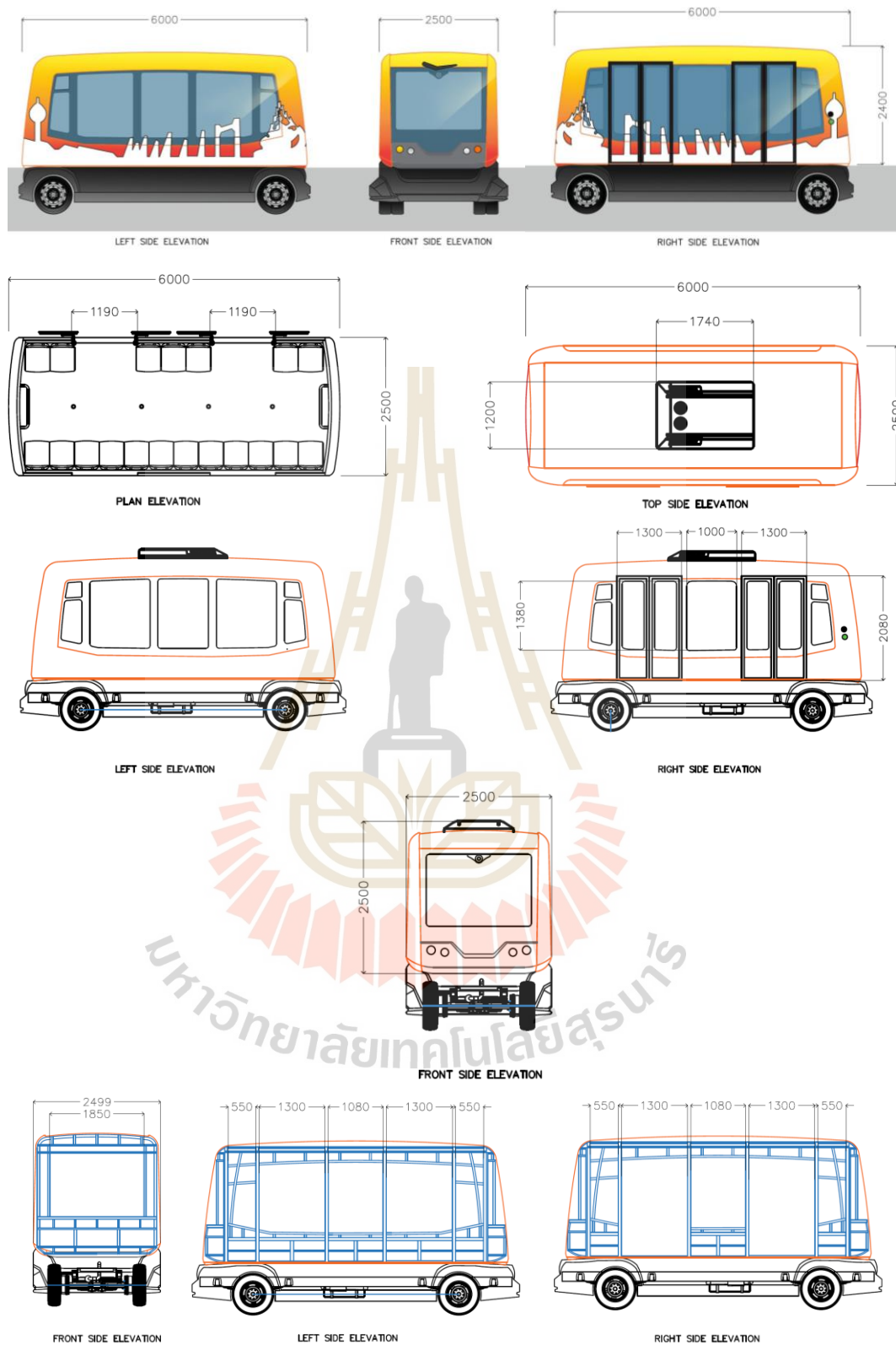
## 5.2.2 การออกแบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มทางกลและทางไฟฟ้า

### 1. แบบวิศวกรรมทางกล

ต้นแบบตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็มจะพิจารณาความเหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในเรื่องของการใช้ประโยชน์จากระบบขนส่งแนวราบเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการในโรงพยาบาลให้มากที่สุด โดยรูปแบบของตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ที่ออกแบบแสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งได้เน้นรูปทรงที่ทันสมัย มีขนาดภายนอก  $2.5 \text{ m} \times 6.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  (กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  สูง) จำนวนที่นั่งผู้โดยสาร 19 ที่นั่ง มีประตูขึ้น-ลง 2 ประตู สามารถแสดงรายละเอียดของตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็มได้ดังรูปที่ 5.4 โดยคุณลักษณะสมบัติของรถไฟฟ้าเอพีเอ็มต้นแบบ มีข้อกำหนดต่าง ๆ ได้แก่ น้ำหนักของรถ น้ำหนักบรรทุกหรือผู้โดยสาร ความเร็วสูงสุดมุมไต่ทางชัน และอัตราเร่งหรือแรงบิดสูงสุด โดยผู้วิจัยได้ระบุข้อมูลไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลจำเพาะของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

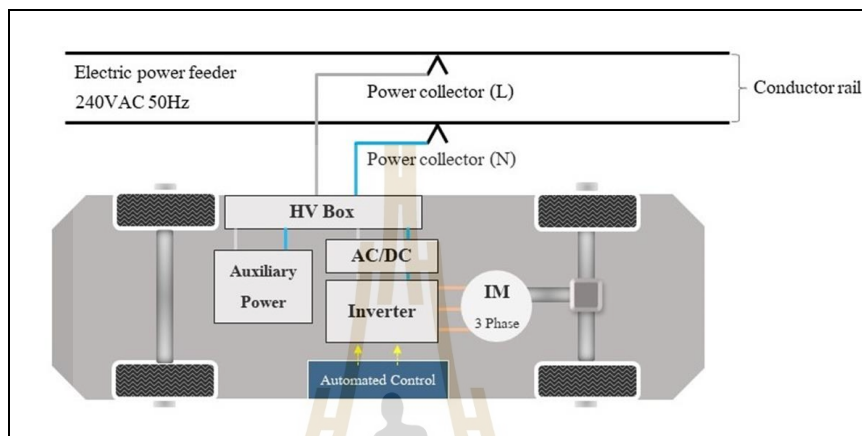
ขนาดและน้ำหนัก	
มิติภายนอก (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ สูง) (m)	2.5 $\times$ 6.5 $\times$ 3
น้ำหนักรถ (kg)	2,000
สมรรถนะ	
น้ำหนักบรรทุก (kg)	1,000
อัตราเร่ง ( $\text{m/s}^2$ )	0.4
ความเร็วสูงสุด (m/s)	11.11
มุมไต่ทางชัน (%)	ไม่เกิน 5



รูปที่ 5.4 ต้นแบบตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

## 2. แบบวิศวกรรมทางไฟฟ้า

การออกแบบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเอพีเอ็มจะพิจารณาหลักการทางพลศาสตร์มาช่วยในการออกแบบเพื่อคำนวณหาขนาดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ขับเคลื่อน โดยโครงสร้างของระบบขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม แสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 โครงสร้างระบบขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

การคำนวณพลวัตของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม โดยระบบการทำงานของรถไฟฟ้าจะถูกศึกษาผ่านแบบจำลองอาศัยสมการของการเคลื่อนที่รถไฟฟ้า ดังนำเสนอในบทที่ 4 โดยสมการหาแรงฉุดที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้า พิจารณาได้จากสมการที่ 5.1 (Yi-Dar and Antonio, 2000)

$$F_{TE} - F_R - F_G = M_{eff} a \quad (5.1)$$

เมื่อ  $M_{eff}$  แทน มวลประสิทธิผล, (kg)  
 $a$  แทน อัตราเร่งของรถไฟฟ้า, ( $m/s^2$ )

$$F_R = 5 \times 10^{-4} K_0 + 4.4480 \frac{K_1}{W} + 1.1187 \times 10^{-3} B(v) + 239.6904 \frac{CAv^2}{Wn} \quad (5.2)$$

โดยที่  $F_R$  แทน แรงต้านของรถไฟฟ้า ที่เกิดจากผลรวมของแรงเสียดทานการเคลื่อนที่กับแรงต้านอากาศ, (N)

$W$	แทน น้ำหนักโหลดต่อแกนเพลลาขับเคลื่อน, (kg)
$A$	แทน พื้นที่หน้าตัดของรถไฟฟ้า, (m <sup>2</sup> )
$B$	แทน สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่รางนำทาง
$C$	แทน สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอากาศ
$v$	แทน ความเร็วของรถไฟฟ้า, (m/s)
$n$	แทน จำนวนแกนเพลลาขับเคลื่อน
$K_0, K_1$	แทน ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1.3 และ 29 ตามลำดับ

แรงต้านความโน้มถ่วงจะคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$F_G = 9.81W_G \left( \frac{i}{100} \right) \quad (5.3)$$

โดยที่	$W_G$	แทน น้ำหนักรวมทั้งหมด, (kg)
	$i$	แทน ความชันทางวิ่งของรถไฟฟ้า, (%)

สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถไฟฟ้าได้จากสมการที่ 5.4

$$P_e = \frac{F_{TE} \cdot v}{\eta_t} + P_{aux} \quad (5.4)$$

โดยที่	$P_e$	แทน กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถไฟฟ้า, (W)
	$P_{aux}$	แทน กำลังไฟฟ้าเสริม, (W)
	$\eta_t$	แทน ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

การออกแบบเบื้องต้นเพื่อหาสมรรถนะของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม โดยมีพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์

พารามิเตอร์			
$A$ แทน พื้นที่หน้าตัดของรถ ( $m^2$ )	6.25		สมการที่ 5.2
$B$ แทน สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่รางนำทาง	0.03	อ้างอิงจาก	
$C$ แทน สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอากาศ	0.00034	Yi-Dar and	
$K_0$ และ $K_l$ แทน ค่าคงที่	1.3 และ 29	Antonio, 2000	
$\eta_t$ แทน ค่าประสิทธิภาพรวม (%)	Gear = 98, Motor = 88, Inverter = 98		
$P_{aux}$ แทน กำลังไฟฟ้าเสริม (kW)	Constant load = 20		

จากข้อมูลของรถไฟฟ้าเอพีเอ็มในตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ในตารางที่ 5.2 แทนค่าลงในสมการที่ 5.2 สามารถคำนวณหา  $F_R = 0.0639$  N และ  $F_G = 1,471.50$  N จากนั้นแทนค่าทั้งสองลงในสมการที่ 5.1 จะได้แรงจุดที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

$$\therefore F_{TE} = 2,671.563 \text{ N}$$

สามารถหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าเอพีเอ็มต้องการได้จากสมการที่ 5.4 นั่นคือ

$$\therefore P_e = 37,129.215 \text{ W หรือ } 37.129 \text{ kW}$$

คำนวณหาแรงบิดที่ล้อแล้วแรงบิดจะเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์จากรัศมีของล้อรวมยาง รวมถึงค่าความต้านทานระหว่างเพลากับลูกปืนด้วยสมการที่ 5.5

$$\tau_w = F_{TE} \times R_w \times R_f \quad (5.5)$$

เมื่อ  $\tau_w$  คือ แรงบิดที่ล้อยาง (N.m)

$R_w$  คือ รัศมีของล้อยาง (m)

$R_f$  คือ ตัวประกอบการเสียดทานระหว่างเพลากับลูกปืน กำหนดให้เป็น 1.1

เลือกขอบล้อและยาง มีรัศมีของล้อรวมยางเป็น 0.316 m แทนค่าลงในสมการที่ 5.5

ดังนั้น แรงบิดที่ล้อยางเป็น  $\tau_w = 931.574$  N.m

คำนวณหาความเร็วรอบของล้อรถ  $n_w$  โดยที่ล้อหมุน 1 รอบ ได้ระยะทาง 1.98 m และความเร็วไต่ทางขึ้น 11.11 m/s

$$n_w = 11.11/1.98 = 5.611 \text{ rps}$$



และหาความเร็วเชิงมุม  $\omega$  โดยที่  $n_w$  คือ ความเร็วรอบล้อรถ ดังสมการที่ 5.6

$$\omega = 2\pi n_w \quad (5.6)$$

$$\therefore \omega = 13.22 \text{ rad/s}$$

คำนวณหาแรงบิดที่มอเตอร์ขับเคลื่อนได้จากสมการดังนี้

$$\tau_m = \frac{\tau_w}{\text{Gear ratio}} \quad (5.7)$$

เมื่อ Gear ratio แทน อัตราทดเฟืองขับเท่ากับ 6

$$\therefore \tau_m = 155.262 \text{ N.m}$$

ความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนหาได้ดังนี้

$$n_m = \text{อัตราทดเฟือง} \times \text{ความเร็วล้อหมุน} \times 60 \quad (5.8)$$

$$\therefore n_m = 2,020 \text{ rpm}$$

คำนวณหาค่าพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนจากทฤษฎีบทที่ 3 จะพิจารณาจากลักษณะของการขับโหลดเป็นแบบร่ายคาบ โดยใช้พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ขับเคลื่อนและใช้ตัวประกอบการออกแบบเพื่อไว้ประมาณ 25% เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 40 kW แบบเชิงเส้นในเวลา  $T_1 = 5$  นาที คำนวณได้จากสมการที่ 5.9

$$P_1 = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} x^2 dx} \quad (5.9)$$

$$\text{แทนค่าจะได้ } P_1 = \sqrt{\frac{1}{5} \int_0^5 \left(\frac{40}{5} x^2\right) dx} = \frac{40}{\sqrt{3}} \text{ kW}$$

เมื่อโหลดสม่ำเสมอขนาด 35 kW เป็นเวลา  $T_2 = 5$  นาที  $P_2 = 35$  kW  
 คำนวณหาค่าประสิทธิผลของกำลังไฟฟ้า ( $P_{rms}$ ) ได้จากสมการที่ 5.10

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{P_1^2 T_1 + P_2^2 T_2 + \dots + P_n^2 T_n}{T_1 + T_2 + \dots + T_n}} \quad (5.10)$$

จะได้  $P_{rms} = 29.649$  kW

เนื่องจาก  $P_{max} = 40$  kW คำนวณหาอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้า

$$\lambda' = \frac{P_{max}}{P_{rms}} = 1.16$$

ดังนั้นจะได้พิกัดกำลังไฟฟ้าต่อเนื่องของมอเตอร์ขับเคลื่อนเป็น 29.649 kW

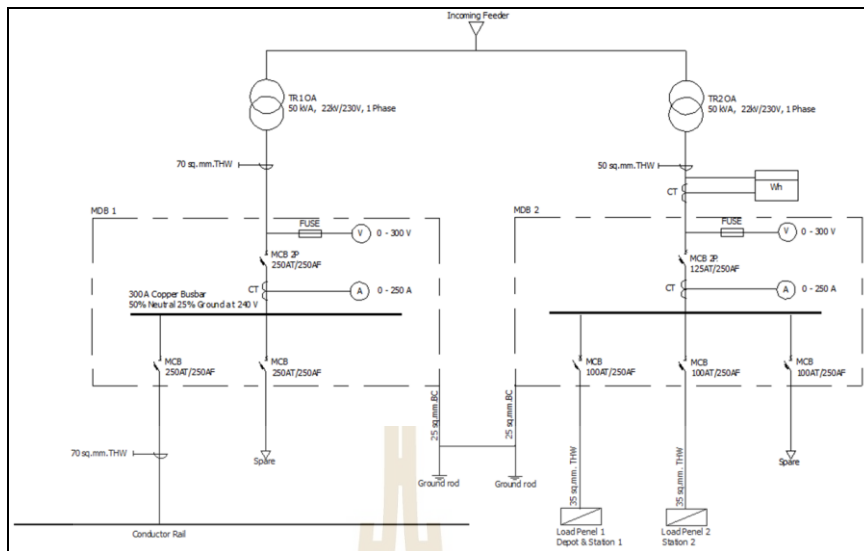
### 5.2.3 การออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน

#### 1. ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน

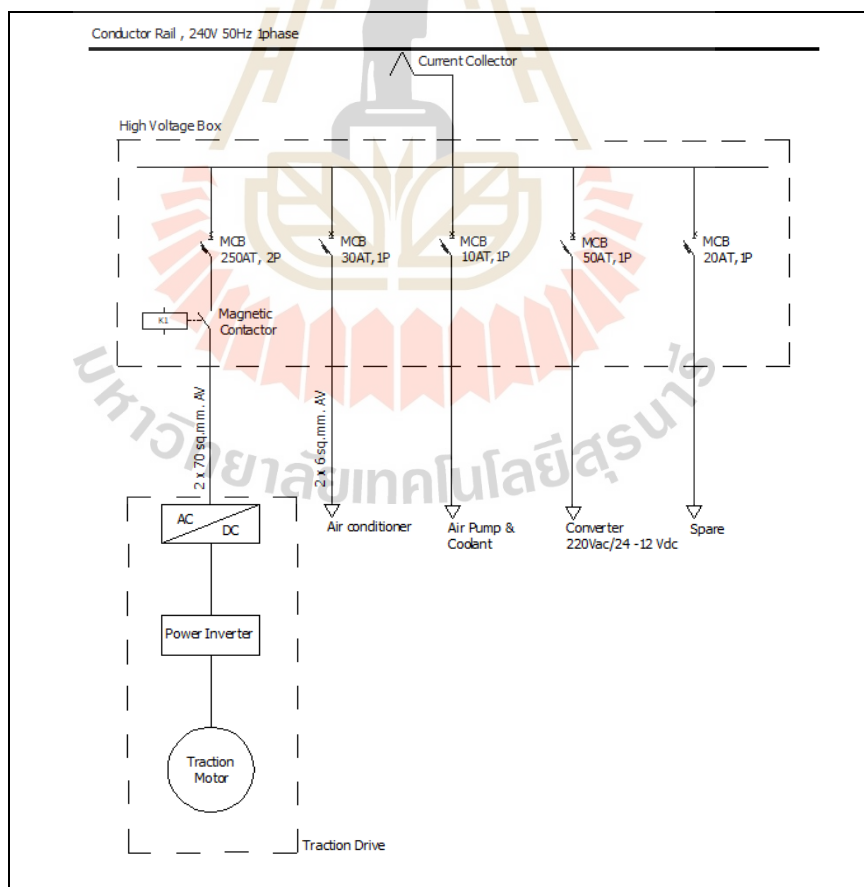
จากระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าในงานลากจูงของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ดังที่นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมาสามารถสรุปข้อกำหนดและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็มได้ดังแสดงตารางที่ 5.3 โดยที่ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต่อเนื่อง มีพิกัดการจ่ายกำลังงานสูงและด้วยความต้องการขนส่งผู้โดยสารหรือขนส่งสัมภาระ ซึ่งการเลือกใช้ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็มให้เหมาะสมนั้น จะช่วยให้การใช้พลังงานเพื่อขับเคลื่อนระบบขนส่งให้มีประสิทธิภาพ งานวิทยานิพนธ์นี้เลือกพิจารณาระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ เนื่องจากต้นแบบแนวทางวิ่งระบบรถไฟฟ้ามีระยะทางสั้นประกอบด้วยต้นทุนการสร้างถูกกว่าระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยรับไฟฟ้ากระแสสลับจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ระดับแรงดัน 22 kV จ่ายผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า 22 kV/240 V 50 Hz พิกัด 50 kVA เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส 240 V 50 Hz และจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่านรางตัวนำไฟฟ้าเพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ในตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็มมีการติดตั้งอุปกรณ์เรียงกระแสเพื่อแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับชุดควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน แผนผังเส้นเดี่ยวของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็มและระบบไฟฟ้าในรถไฟฟ้าเอพีเอ็มแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.3 ข้อกำหนดและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

ขนาดและน้ำหนัก	
มิติภายนอก (กว้าง×ยาว×สูง) (m)	2.5×6.5×3
น้ำหนักรถไฟฟ้า (kg)	3,000
ระบบขับเคลื่อนและระบบรองรับ	
ระบบเบรก	Disc brake
รัศมีล้อยาง (m)	0.36
ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าใช้งาน (VAC)	240
มอเตอร์ขับเคลื่อน	Induction motor
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)	40
แรงบิดสูงสุด (N.m)	155.262
กำลังไฟฟ้าเสริม (kW)	20
สมรรถนะ	
น้ำหนักบรรทุก (kg)	1,000
อัตราเร่ง ( $m/s^2$ )	0.45
ความเร็วสูงสุด (m/s)	11.11
มุมไต่ทางชัน (%)	ไม่เกิน 5
ลักษณะการเคลื่อนที่รถไฟฟ้า	ไปและกลับ
ทางวิ่งรถไฟฟ้า	
ระยะทาง (m)	200
สถานีรับส่งผู้โดยสาร	2 สถานี คือ สถานีต้นทางและสถานีปลายทาง



รูปที่ 5.6 ผังเส้นเดี่ยวของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอทีเอ็ม



รูปที่ 5.7 ผังเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้าในตัวรถรถไฟฟ้าเอทีเอ็ม

จากผังเส้นเดียวระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ในรูปที่ 5.6 ประกอบไปด้วย (1) วงจรจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าและอุปกรณ์บนตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม (2) วงจรจ่ายไฟฟ้าให้อุปกรณ์สนับสนุนการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ได้แก่ ระบบควบคุมและติดต่อสื่อสาร สถานีผู้โดยสาร โรงจอดซ่อมบำรุง และระบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง สามารถนำเสนอรายละเอียดการออกแบบหาพิกัดอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าและขนาดของสายไฟฟ้า ได้ดังนี้

1. วงจรจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าและอุปกรณ์บนตัวรถไฟฟ้า การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ได้เพื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าเป็น 50 kVA แรงดันไฟฟ้าใช้งานเป็น 240 V แสดงการหาพิกัดอุปกรณ์และขนาดสายไฟฟ้า ดังนี้

1.1 กระแสไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนและอุปกรณ์บนตัวรถไฟฟ้าหาได้จากสมการที่ 5.11

$$I_L = \frac{\text{Power}}{\text{Voltage}} \quad (5.11)$$

โดยที่  $I_L$  คือ กระแสไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนและอุปกรณ์บนตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม, (A)  
 $\text{Power}$  คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง, (VA)  
 $\text{Voltage}$  คือ พิกัดแรงดันไฟฟ้าใช้งาน, (V)

เลือกหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 kVA พิกัดแรงดันไฟฟ้าใช้งาน 240 V สามารถหากระแสไฟฟ้าได้

$$\therefore I_L = 208.33 \text{ A}$$

1.2 กระแสไฟฟ้าที่สายป้อนได้จากสมการที่ 5.12

$$I_{BC} = 1.1 \times I_L \quad (5.12)$$

โดยที่  $I_{BC}$  คือ กระแสไฟฟ้าผ่านสายป้อน, (A)  
 $I_L$  คือ กระแสไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนและอุปกรณ์บนตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม, (A)

$$\therefore I_{BC} = 229.163 \text{ A}$$

1.3 ใช้สายป้อนแบบ THW เดินผ่านอากาศขนาด  $70 \text{ mm}^2$  และพิจารณาขนาดสายดินบริเวณที่ไฟฟ้าจากตารางการหาขนาดต่ำสุดของสายต่อหลักดินของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (วสท., 2556) มีขนาดเป็น  $25 \text{ mm}^2$

1.4 คำนวณกระแสเปิดวงจรของอุปกรณ์ตัดวงจรที่ติดตั้งปลายสายป้อนโดยพิกัดกำลังไฟฟ้า 50 kVA แรงดันไฟฟ้าใช้งานเป็น 240 V และค่าอิมพีแดนซ์ของรางตัวนำ  $Z_c = Z_r$  เป็น  $0.148 + j0.253 \ \Omega/\text{km}$  มีระยะทางวิ่ง 0.2 km อ้างอิงข้อมูลรางตัวนำในภาคผนวก ข. และค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านแรงต่ำ  $Z_{ss} = 0.128 \ \Omega$ ,  $R_{ss} + jX_{ss} = 0.06 + j0.112 \ \Omega$

คำนวณหากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ปลายสาย กรณีลัดวงจรลงดินโดยตรง  $Z_c = 0$  ได้จากสมการที่ 5.13 (न्छัย, 2560)

$$I_f = \frac{1.05 \times V \angle 0^\circ}{jX_{ss} + 0.2(Z_c + Z_r + Z_f)} \quad (5.13)$$

$$\therefore I_f = 158.86 \angle -331.67^\circ \text{ A}$$

คำนวณหาพิกัดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้จากสมการที่ 5.15

$$I_p = k \cdot I_f \sqrt{2} \quad (5.14)$$

โดยที่  $k = 1.02 + 0.98e^{-3\frac{R_{ss}}{X_{ss}}}$

$$\therefore I_p = 1.21 \times 158.86 \times \sqrt{2} = 273.29 \text{ A}$$

กระแสเปิดวงจรตามมาตรฐาน IEC 60909 มีค่าเท่ากับกระแสลัดวงจรค่ายอด ดังนั้นพิกัดกระแสเปิดวงจรของอุปกรณ์ตัดวงจรที่ปลายรางตัวนำมีค่า 273.29 A

2. วงจรจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์สนับสนุนของระบบบรอดไฟฟ้าเอพีเอ็ม

รายละเอียดโหลดไฟฟ้าของอุปกรณ์สนับสนุนทั้งหมด กำหนดให้พิกัดกำลังไฟฟ้าเสริมเป็น 20 kVA และแรงดันไฟฟ้าใช้งานเป็น 230 V สามารถคำนวณได้ดังนี้



### 2.1 หากกระแสไหลลดแทนค่าลงในสมการที่ 5.11

$$\therefore I_L = 86.95 \text{ A}$$

### 2.2 กระแสไฟฟ้าสายป้อนแทนค่าลงในสมการที่ 5.12

$$\therefore I_{BC} = 108.69 \text{ A}$$

2.3 ใช้สายป้อนแบบ THW เดินผ่านอากาศขนาด  $35 \text{ mm}^2$  และพิจารณาขนาดสายดินบริษัทไฟฟ้จากตารางการหาขนาดต่ำสุดของสายต่อหลักดินของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (วสท., 2556) มีขนาดเป็น  $10 \text{ mm}^2$

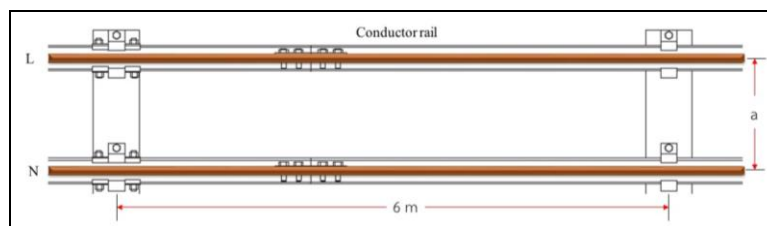
### 5.3 ระบบรางตัวนำไฟฟ้า

รางตัวนำไฟฟ้า (conductor rail) ทำหน้าที่ส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ามายังตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม จากข้อกำหนดทางวิ่งรถไฟฟ้ามีระยะทาง 200 m สามารถออกแบบการติดตั้งรางตัวนำไฟฟ้านี้ โดยระยะความกว้างของรางตัวนำสองเส้นนี้ จะอ้างอิงตามมาตรฐานของ CONDUCTIX wampfler, Heavy-Duty Conductor Rail Copper Head ดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ระยะความกว้างของรางตัวนำทั้งสองเส้น

Distance between centers of two conductor rails	Standard voltage arrangement	High voltage arrangement
Minimum distance a (mm)	$\geq 150$	$\geq 250$

จากตารางที่ 5.4 พิจารณาระยะห่างความกว้างของรางตัวนำทั้งสองเส้น โดยเลือกระยะความกว้างของรางตัวนำสองเส้น คือ  $a \geq 150 \text{ mm}$  และออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์ยึดจับรางตัวนำโดยมีระยะห่างของอุปกรณ์ยึดจับรางตัวนำแต่ละจุดเท่ากับ 6 m ตามระยะทางวิ่งของรถไฟฟ้ามีทั้งหมด 30 จุด ที่ความยาวทางวิ่ง 200 m ดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ระยะความกว้างของรางตัวนำทั้งสองเส้นและระยะติดตั้งอุปกรณ์จับยึดรางตัวนำ

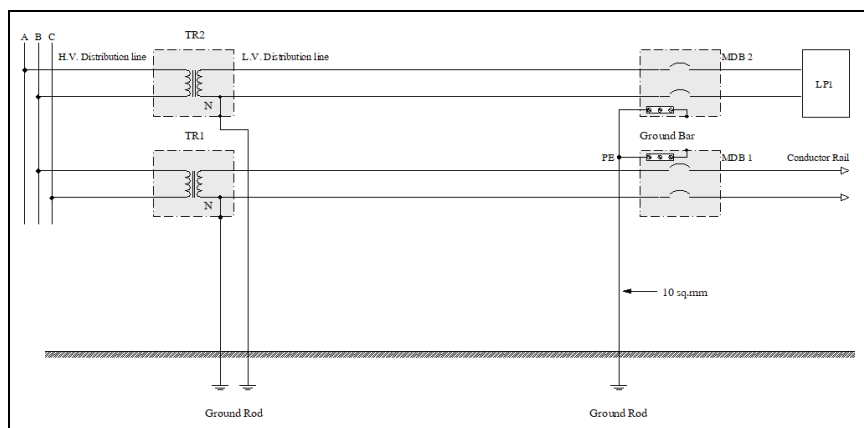
#### 5.4 การออกแบบระบบการต่อลงดินของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง

ระบบการต่อลงดินถือว่าเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง ซึ่งระบบการต่อลงดินที่ดีจำเป็นต้องมีความต้านทานดินที่ต่ำและการติดตั้งที่มั่นคงแข็งแรง ใช้งานระยะยาว ซึ่งระบบการต่อลงดินมีค่าความต้านทานดินที่ต่ำ นั้นหมายถึงระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังมีความปลอดภัยแก่ชีวิตและทรัพย์สิน หัวข้อนี้นำเสนอการออกแบบระบบต่อลงดินของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง การคำนวณค่าความต้านทานของหลักดินหาได้จากสมการที่ 5.15 (ประสิทธิ์ และคณะ, 2560)

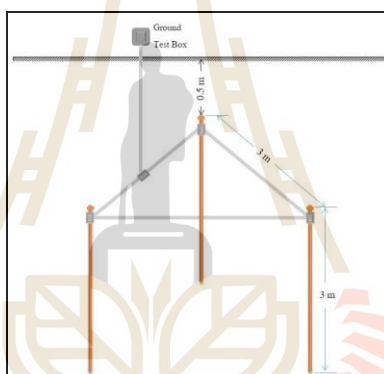
$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right] \quad (5.15)$$

เมื่อ	$R$	คือ ความต้านทานดิน, ( $\Omega$ )
	$\rho$	คือ ความต้านทานจำเพาะ, ( $\Omega \cdot \text{m}$ )
	$L$	คือ ความยาวหลักดิน, (m)
	$d$	คือ เส้นผ่าศูนย์กลางหลักดิน, (m)
	$\ln$	คือ Natural Logarithm

ข้อกำหนด      ชนิดของดินผสมวัชพืชเปียก       $\rho = 10 \Omega \cdot \text{m}$   
ใช้หลักดินแบบแนวคิงมีความยาว  $L = 3 \text{ m}$  จำนวน 3 แท่ง  
เส้นผ่าศูนย์กลางหลักดิน       $d = 0.0142 \text{ m}$   
แทนค่าข้างต้นลงในสมการที่ 5.1 จะได้ค่าความต้านทานดิน  $R = 3.409 \Omega$   
พิจารณาความต้านทานของหลักดินกับดินได้กำหนดไว้ในมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าต้องไม่เกิน  $5 \Omega$  ดังนั้นจากการออกแบบข้างต้นถือว่าใช้ได้



รูปที่ 5.9 แผนผังการต่อลงดินของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 5.10 การปักแท่งหลักดินแนวตั้งแบบ 3 หลัก

ทำการเขียนแผนผังการต่อลงดินของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง ดังแสดงในรูปที่ 5.9 จากที่ได้คำนวณค่าความต้านทานของหลักดินที่นำเสนอข้างต้น โดยจะทำการปักแท่งหลักดินแนวตั้งเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าและห่างเท่ากับความยาวของหลักดิน ดังแสดงในรูปที่ 5.10

## 5.5 สรุป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอภาพรวมของการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง สำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม โดยทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม และจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์สนับสนุนของการเดินรถไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้แสดงการออกแบบระบบการต่อลงดินของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะทำให้ระบบมีความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน

## บทที่ 6

### การทดสอบและประเมินผล

#### 6.1 บทนำ

ในบทที่ผ่านมาได้นำเสนอการออกแบบระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ซึ่งประกอบด้วย เส้นบังคับนำทางที่มีรางตัวนำไฟฟ้าติดตั้งไปตามแนวทางวิ่ง สถานีผู้โดยสาร ศูนย์กลางควบคุมระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง และตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม สำหรับบทนี้นำเสนอการทดสอบระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม กำหนดให้รถไฟฟ้าขับเคลื่อนบนทางวิ่งในลักษณะเคลื่อนที่ไปและกลับ เพื่อศึกษาคุณลักษณะของระบบการจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน เก็บข้อมูลโดยบันทึกการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าบนทางวิ่งพร้อมทั้งบันทึกคุณภาพทางไฟฟ้า จากนั้นประเมินผลการทดสอบ โดยแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 6.2 และยืนยันผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าเทียบกับผลการวัดจริง ดังแสดงในหัวข้อที่ 6.3

#### 6.2 การทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนให้กับรถไฟฟ้า

##### 6.2.1 ระบบทดสอบ

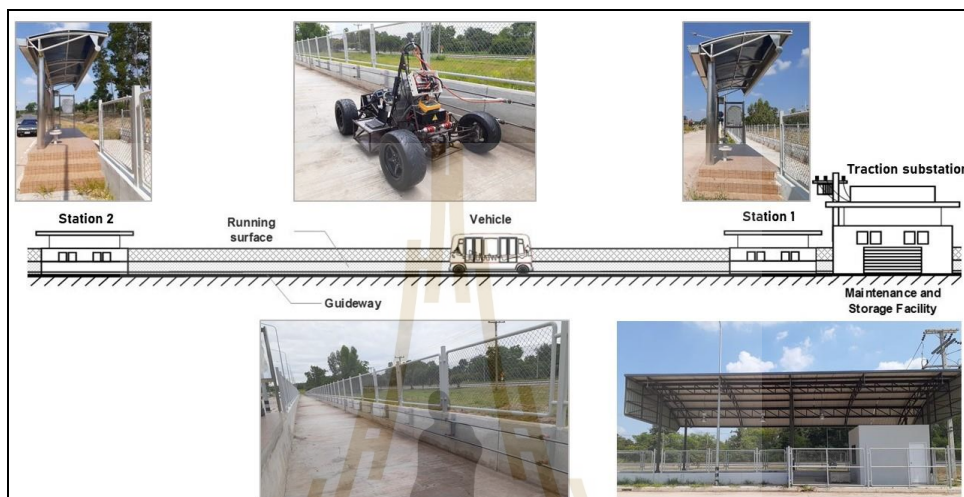
ระบบทดสอบจะอาศัยทางวิ่งที่จัดสร้างขึ้นบนพื้นที่ของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 6.1 เบื้องต้นกำหนดลักษณะทางวิ่งเป็นเส้นทางตรงระยะทาง 210 m มีสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี



รูปที่ 6.1 ผังระบบทดสอบบนพื้นที่โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

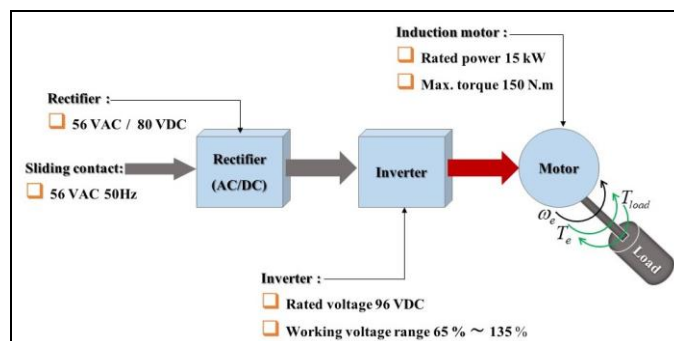
## 6.2.2 ต้นแบบระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

ต้นแบบระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มที่สร้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.2 ประกอบไปด้วยระบบรางตัวนำไฟฟ้าที่ติดตั้งไปตามแนวทางวิ่ง สถานีรับส่งผู้โดยสาร 2 สถานี สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และตัวรถไฟฟ้าตัวอย่าง



รูปที่ 6.2 ระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มที่สร้างขึ้น

ในส่วนของโครงสร้างตัวรถไฟฟ้าและระบบขับเคลื่อนเพื่อใช้ทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง ที่ออกแบบสร้างขึ้นได้แสดงข้อมูลทางเทคนิคของรถไฟฟ้า ดังตารางที่ 6.1 ซึ่งระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบนี้สามารถใช้แรงดันไฟฟ้าทำงานที่ 65 % ถึง 135 % ของพิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 96 V อ้างอิงจากข้อมูลระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าในภาคผนวก ก สามารถแสดงผังระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 6.3 ดังนั้นจึงกำหนดระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 50 Hz ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าทำงาน 56 V โดยเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ พิกัดกำลังไฟฟ้า 12 kVA แรงดันไฟฟ้า 240 V/56 V จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านระบบรางตัวนำป้อนเข้าสู่ตัวรถไฟฟ้าด้วยตัวสัมผัสเคลื่อนที่ (Sliding Contact) โดยระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 56 V 50 Hz ผ่านวงจรเรียงกระแสตรงเป็น 80 V ป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 6.3 ผังระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเพื่อใช้ทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลทางเทคนิคของรถไฟฟ้า

ขนาดและน้ำหนัก	
มิติภายนอก (กว้าง × ยาว × สูง) (m)	1.17 × 2.25 × 1.03
น้ำหนักรถไฟฟ้า (kg)	350
ระบบขับเคลื่อนและระบบรองรับ	
ระบบเบรก	Disc brake
รัศมีล้อยาง (m)	0.36
ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าใช้งาน (VAC)	56
มอเตอร์ขับเคลื่อน	Induction motor
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)	15
แรงบิดสูงสุด (N.m)	150
สมรรถนะ	
น้ำหนักบรรทุก (kg)	50
อัตราเร่ง ( $m/s^2$ )	0.45
ความเร็วสูงสุด (m/s)	5.55
มุมไต่ทางชัน (%)	ไม่เกิน 5
ลักษณะการเคลื่อนที่รถไฟฟ้า	ไปและกลับ
ทางวิ่งรถไฟฟ้า	
ระยะทาง (m)	200
สถานีรับส่งผู้โดยสาร	2 สถานี คือ สถานีต้นทางและสถานีปลายทาง



### 6.2.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับเก็บผลการทดสอบ ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการบันทึกค่าความเร็วและค่าระดับความชันทางวิ่งของรถไฟฟ้า พร้อมทั้งบันทึกค่าปริมาณทางไฟฟ้า โดยสามารถแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์และเครื่องมือได้ดังตารางที่ 6.2

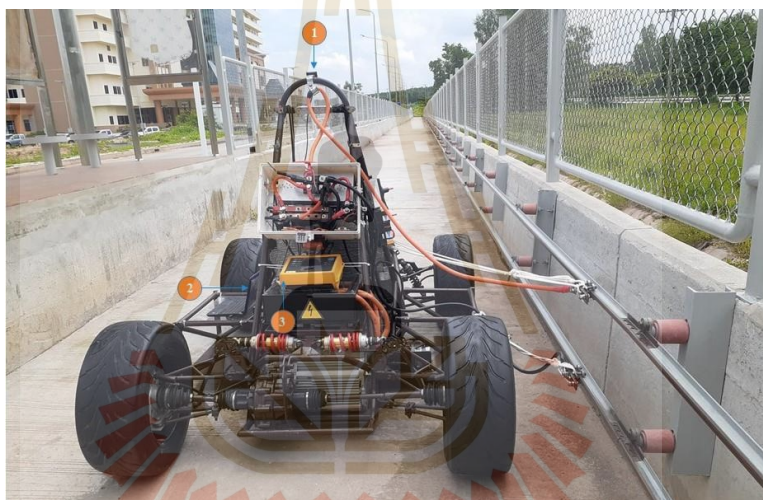
ตารางที่ 6.2 รายละเอียดอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับใช้วัดและเก็บข้อมูลต่าง ๆ

เครื่องมือ	คุณลักษณะ	รูปภาพ
SKYLAB GPS Model SKM55UU	เครื่องบันทึกข้อมูลทำหน้าที่อ่านค่าความเร็วของรถไฟฟ้าและระดับความชันทางวิ่ง แปรค่าจัดทำรายงานข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์ Visual GPS	
เครื่องวิเคราะห์คุณภาพและพลังงานไฟฟ้า Fluke Model 1735	เครื่องบันทึกข้อมูลปริมาณทางไฟฟ้า บันทึกเชิงเวลาทุก ๆ 200 ms วิเคราะห์และจัดทำรายงานข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์ Power Log 4.0	
คอมพิวเตอร์พกพา Lenovo ThinkPad X280	CPU Intel Core i5-8350U 1.70GHz Ram 8 GB SSD 512 GB	

#### 6.2.4 วิธีการทดสอบ

วิธีทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับรถไฟฟ้าเพื่อบันทึกข้อมูลมีรายละเอียดดังนี้

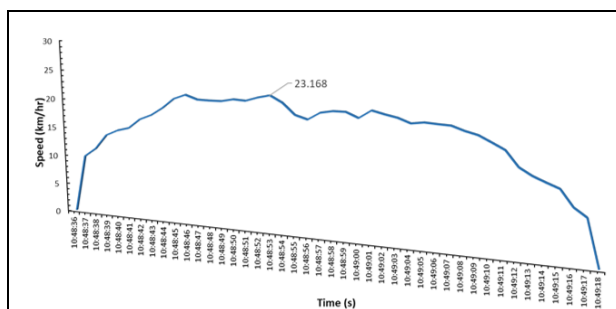
1. ทำการติดตั้งอุปกรณ์จีพีเอสบนตำแหน่งที่ 1 พร้อมคอมพิวเตอรืแบบพกพาที่ยึดติดบนตำแหน่งที่ 2 และเครื่องวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าบนตำแหน่งที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 6.4
2. ดำเนินการจ่ายระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนผ่านรางตัวนำ
3. เริ่มบันทึกค่าในโปรแกรม Visual GPS ของคอมพิวเตอรืแบบพกพาและเครื่องวิเคราะห์คุณภาพและพลังงานไฟฟ้า
4. กำหนดให้รถไฟฟ้าทำงานเคลื่อนที่บนทางวิ่งในลักษณะไปและกลับที่ความเร็วสูงสุดเป็น 20 km/h



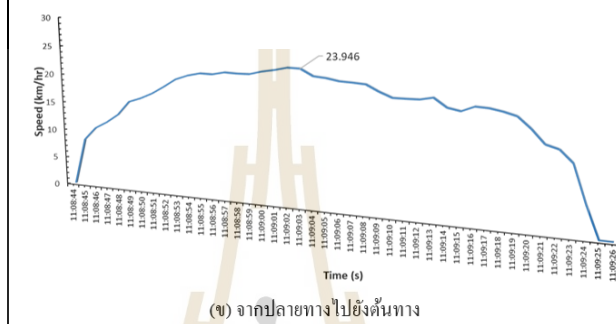
รูปที่ 6.4 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์จีพีเอสและเครื่องวิเคราะห์ทางไฟฟ้าบนรถไฟฟ้าย่อย

#### 6.2.5 ข้อมูลจากการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

ผลการบันทึกความเร็วของรถไฟฟ้าเทียบกับเวลา ได้จากการวัดโดยอุปกรณ์จีพีเอส และแปรค่าจัดทำข้อมูลด้วยโปรแกรม Visual GPS จะได้โครงร่างความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเทียบเวลา โดยรูปที่ 6.5 (ก) แสดงรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากทางวิ่งต้นทาง เริ่มที่เวลา 10:48:35 และสิ้นสุดที่ปลายทางเวลา 10:49:17 รวมระยะเวลา 42 s เป็นระยะทาง 212.012 m ให้ความเร็วสูงสุดและความเร็วเฉลี่ยเป็น 23.168 km/h และ 17.663 km/h ตามลำดับ จากนั้นรูปที่ 6.5 (ข) แสดงการเคลื่อนที่จากทางวิ่งปลายทางเริ่มที่เวลา 11:08:43 และสิ้นสุดที่ต้นทางเวลา 11:09:28 รวมระยะเวลา 42 s เป็นระยะทาง 210.816 m ให้ความเร็วสูงสุดและความเร็วเฉลี่ยเป็น 23.946 km/h และ 17.567 km/h ตามลำดับ

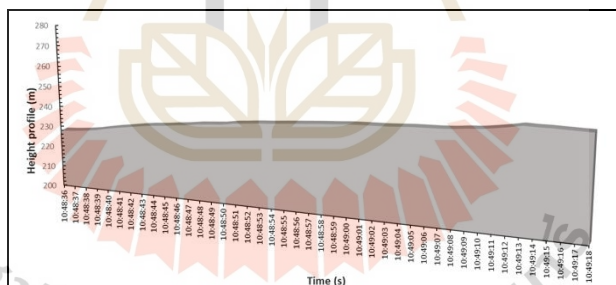


(ก) จากคันทางไปยังปลายทาง

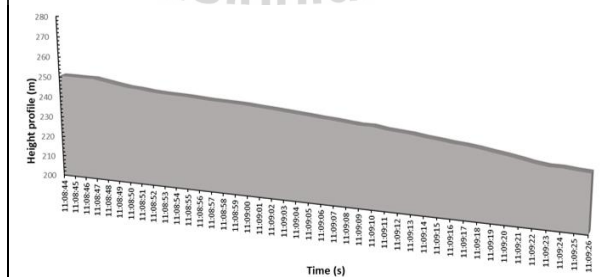


(ข) จากปลายทางไปยังคันทาง

รูปที่ 6.5 ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า



(ก) จากคันทางไปยังปลายทาง



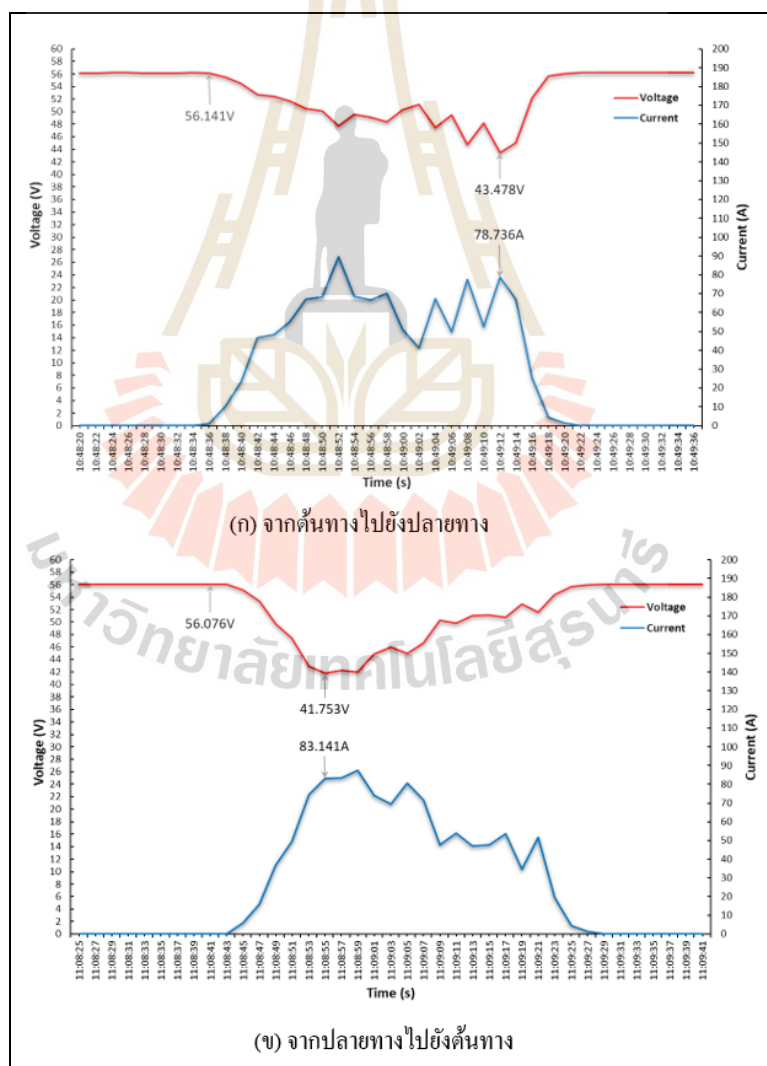
(ข) จากปลายทางไปยังคันทาง

รูปที่ 6.6 ระดับความชันของทางวิ่ง

จากรูปที่ 6.6 แสดงระดับความลาดชันของทางวิ่งขณะทดสอบรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปและกลับพบว่า ความลาดชันของทางวิ่งที่ระยะทางของการทดสอบการเคลื่อนที่มีค่าสูงสุด 250.60 m

### 6.2.6 ผลการบันทึกวัดค่าทางไฟฟ้า

จากการทดสอบระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนที่สร้างขึ้น ป้อนไฟฟ้าผ่านรางตัวนำเพื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าไปตามระยะทาง และบันทึกผล โดยแสดงการจำแนกชุดข้อมูลในภาคผนวก ก นำเสนอเป็นเส้นกราฟ ได้แก่ ลักษณะแรงดันและกระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าตกและค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้า ค่าความผิดเพี้ยนรวม (THD) ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน และการใช้พลังงานไฟฟ้า สามารถแสดงผลกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 6.7 เส้นกราฟแรงดันและกระแสไฟฟ้า ขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่

ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับรถไฟฟ้าขับเคลื่อนไปบนทางวิ่ง ดังเส้นกราฟในรูปที่ 6.7 (ก) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงไปตามระยะทางวิ่ง โดยเริ่มให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ออกจากต้นทาง ณ เวลา 10:48:34 น. เมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ใกล้ถึงปลายทางสถานี ณ เวลา 10:49:12 น. พบว่า แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด 43.478 V จากแรงดันไฟฟ้าปกติ 56.141 V ส่งผลให้กระแสไฟฟ้า ณ เวลานั้น มีค่าเป็น 78.736 A จากนั้นดำเนินการกลับทิศทางของรถไฟฟ้าเพื่อเคลื่อนที่กลับไปยังต้นทาง โดยเริ่มให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ออกจากปลายทางสถานี ณ เวลา 11:08:43 ขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปได้ระยะเวลา 11:08:55 น. พบว่า แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด 41.753 V จากแรงดันไฟฟ้าปกติ 56.141 V ส่งผลให้กระแสไฟฟ้า ณ เวลานั้น มีค่าเป็น 83.141 A ดังแสดงเส้นกราฟในรูปที่ 6.7 (ข) เมื่อนำข้อมูลจากการบันทึกของเครื่องวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าและแปรค่าเพื่อประเมินผลของเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้า จากสมการที่ 6.1 และสมการที่ 6.2

$$\Delta V = V_S - V_T \quad (6.1)$$

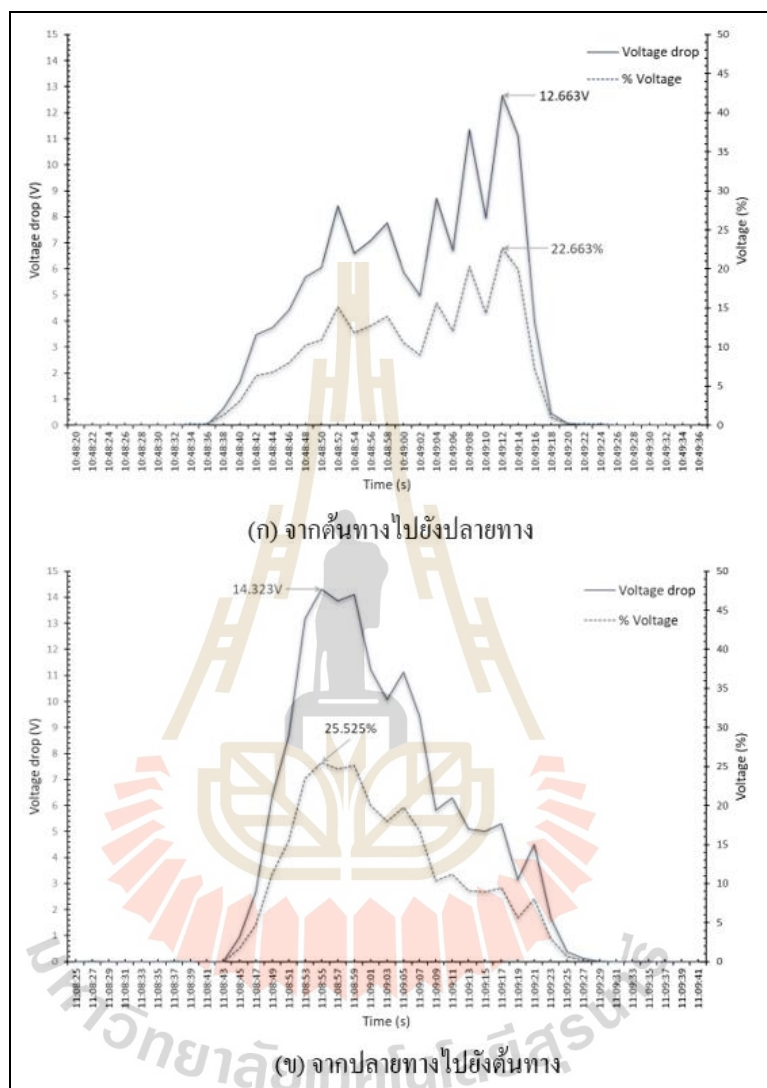
$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_S} \times 100 \quad (6.2)$$

โดยที่	$\Delta V$	แทน แรงดันไฟฟ้า, (V)
	$\varepsilon$	แทน เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้า, (%)
	$V_S$	แทน แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ขั้วสถานีจ่ายไฟฟ้า, (V)
	$V_T$	แทน แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ขั้วสัมผัสของรถไฟฟ้า, (V)

เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าทำงานตามมาตรฐาน กรณีใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 50 Hz ขอมให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกสูงสุดได้ 30 % (ชนิดช้อย, 2560) จากการประเมินพบว่าแรงดันไฟฟ้าตกสูงสุด และเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าสูงสุด ขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปยังปลายทางเป็น 12.663 V และ 22.663 % ตามลำดับ จากนั้นรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปยังต้นทางมีค่าแรงดันไฟฟ้าตกสูงสุด และเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าสูงสุดเป็น 14.323 V และ 25.525 % ตามลำดับ ดังแสดงกราฟในรูปที่ 6.8 จากผลการประเมินเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้ามีค่าไม่เกิน 30 % ถือว่ามีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป็นไปตามมาตรฐานและจากการหาเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าตกเฉลี่ย ขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปยังปลายทางและเคลื่อนที่ไปยังต้นทางมีค่า เป็น 9.336 % และ 10.923 % ตามลำดับ

นอกจากนี้ได้แสดงค่าความผิดพลาดรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้า เมื่อพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด ขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ใกล้ถึงสถานี ปลายทาง ณ เวลา 10:49:12 น.

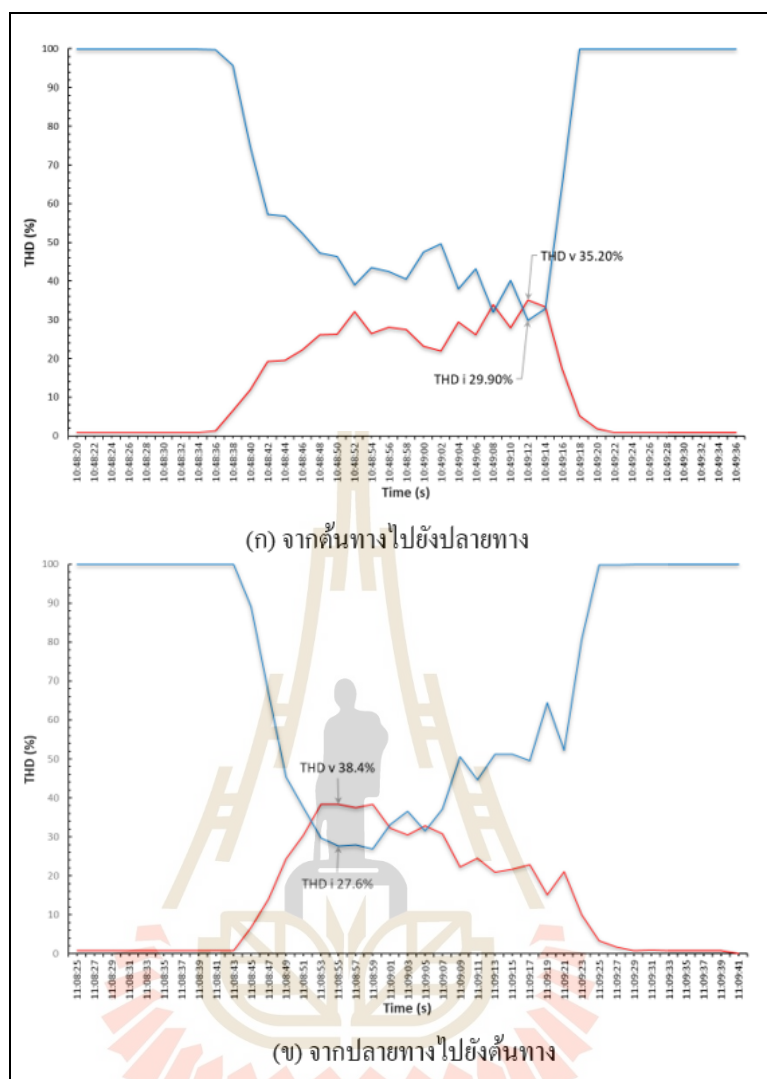
ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดเพี้ยนฮาร์มอนิกสักรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้า เป็น 35.20 % และ 29.90 % ตามลำดับ ดังแสดงกราฟในรูปที่ 6.9 (ก)



รูปที่ 6.8 แรงดันไฟฟ้าตกและเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าขณะทดสอบ

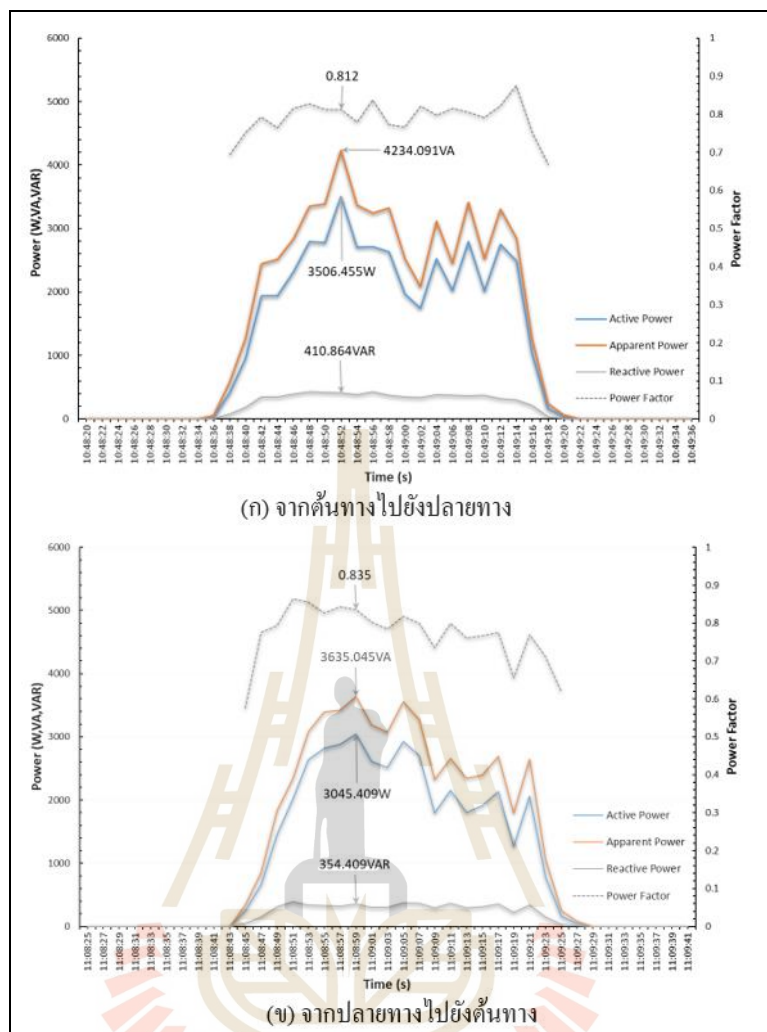
จากนั้นกลับทิศทางของรถไฟฟ้าให้เคลื่อนที่กลับไปยังต้นทาง เมื่อขณะเคลื่อนที่ไปถึงเวลา 11:08:55 น. พบว่า แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดมีผลให้ค่าความผิดพลาดเพี้ยนฮาร์มอนิกสักรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเป็น 38.40 % และ 27.60 % ตามลำดับ ดังแสดงกราฟในรูปที่ 6.9 (ข)





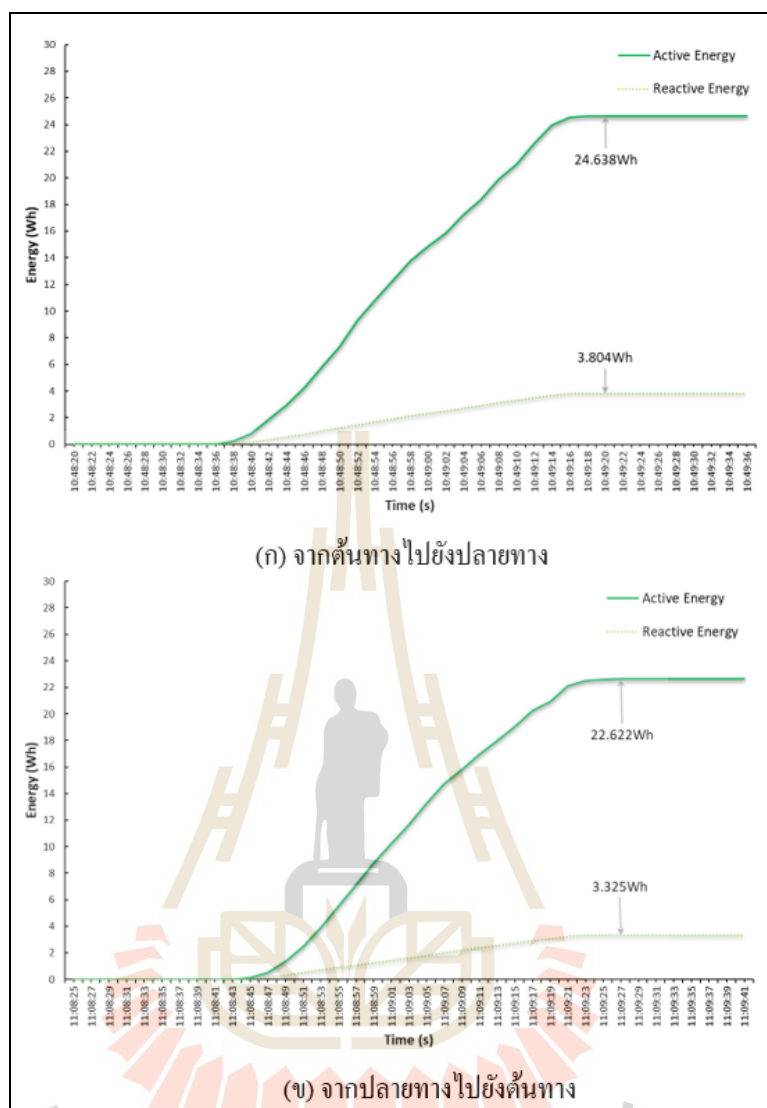
รูปที่ 6.9 ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.10 แสดงความต้องการของกำลังไฟฟ้าไปขับเคลื่อนรถไฟฟ้า เพื่อให้เคลื่อนที่จากต้นทางไปยังปลายทาง ในรูปที่ 6.10 (ก) ขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปเพื่อให้ได้ความเร็วที่กำหนด พบว่า ณ เวลา 10:48:52 น. ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด ได้แก่ กำลังปรากฏ กำลังจริง กำลังต้านกลับ และค่าตัวประกอบกำลัง มีค่า 4,234.091 VA, 3,506.455 W, 410.864 VAR และ 0.812 ตามลำดับ จากนั้นดำเนินการกลับทิศทางรถไฟฟ้าให้เคลื่อนที่จากปลายทางไปยังต้นทาง แสดงดังรูปที่ 6.10 (ข) ขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปเพื่อให้ได้ความเร็วที่กำหนด พบว่า ณ เวลา 11:08:59 น. ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 6.10 กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า

ได้แก่ กำลังไฟฟ้าปรากฏ กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าต้านกลับ และค่าตัวประกอบกำลัง มีค่าเท่ากับ 3,65.045 VA, 3,045.409 W, 354.409 VAR และ 0.835 ตามลำดับ การใช้พลังงานไฟฟ้านำเสนอในรูปที่ 6.11 พบว่า มีการใช้พลังไฟฟ้าทั้งขาไปและขากลับ เป็น 24.638 Wh และ 22.622 Wh ตามลำดับ



รูปที่ 6.11 การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

### 6.3 ยืนยันผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าเทียบกับผลการทดสอบจริง

#### 6.3.1 แบบจำลองระบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอทีเอ็ม

อ้างอิงแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าที่นำเสนอในบทที่ 4 เมื่อกำหนดช่วงเวลาการคำนวณความเร็วและตำแหน่งขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ เมื่อกำหนดให้ช่วงเวลาในการคำนวณมีค่าเป็น  $\Delta t$  ให้  $v$  แทน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในหน่วย m/s และ  $a$  แทน ความเร่งในการเคลื่อนที่ในหน่วย  $m/s^2$  และ  $M_{eff}$  แทน มวลประสิทธิผล การคำนวณเริ่มจากให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งที่สถานีคันททาง รถไฟฟ้าจะเร่งเครื่องทำความเร็วเข้าสู่โหมดเร่งด้วยความเร็วคงที่แรงฉุดของรถไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้

$$F_{TE} = M_{eff} a + F_R \quad (6.3)$$

จากนั้นคำนวณความเร็วและตำแหน่งที่รถไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ในช่วงเวลา  $\Delta t$  ถัดไป โดยใช้สมการที่ 6.4 และสมการที่ 6.5

$$v_{k+1} = v_k + a\Delta t \quad (6.4)$$

$$d_{k+1} = d_k + v_k\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 \quad (6.5)$$

โดยที่  $v_{k+1}$  และ  $v_k$  แทน ความเร็วรถไฟฟ้ารอบปัจจุบันและรอบก่อนหน้า

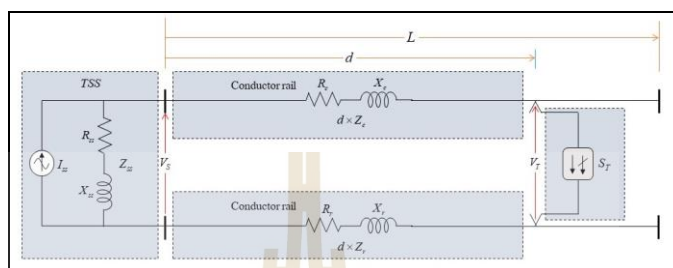
$d_{k+1}$  และ  $d_k$  แทน ตำแหน่งรถไฟฟ้ารอบปัจจุบันและรอบก่อนหน้า

การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ (Tractive Power) จะขึ้นอยู่กับค่าแรงฉุดรอบปัจจุบันของรถไฟฟ้า  $F_{TE(k+1)}$  ในหน่วย  $N$  ความเร็วรอบปัจจุบันของรถไฟฟ้า  $v$  ในหน่วย  $m/s$  และประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจะได้กำลังงานไฟฟ้ารอบปัจจุบันที่รถไฟฟ้ารับไฟฟ้าจากรางตัวนำ  $P_{T(k+1)}$  ในหน่วย  $W$  หาได้จากสมการที่ 6.6

$$P_{T(k+1)} = \frac{F_{TE(k+1)} \times v_{(k+1)}}{\eta_i} \quad (6.6)$$

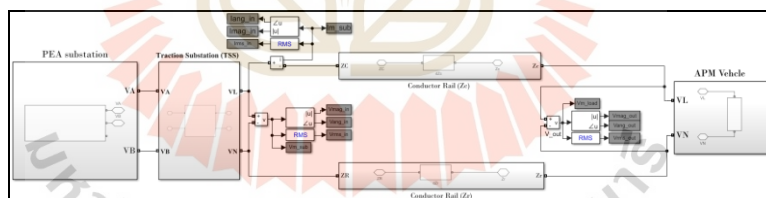
การหาผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าจะดำเนินการอย่างต่อเนื่องทุกช่วงเวลาคำนวณ ตำแหน่งของรถไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่รับไฟฟ้าจากรางตัวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามโหมดการทำงานของรถไฟฟ้าที่ตามลักษณะความเร็วที่ออกแบบไว้ อาศัยการควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control) จะคำนวณค่าความเร่งจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วจริงของรถไฟฟ้ากับความเร็วอ้างอิง การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า มีการทำงาน 3 โหมด คือ โหมดวิ่ง โหมดเบรก และโหมดหยุดที่สถานี โดยรายละเอียดของ โหมดวิ่งทำหน้าที่เริ่มต้นคำนวณและควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ โหมดเบรกทำหน้าที่ลดความเร็วของรถไฟฟ้าสำหรับเข้าจอดที่สถานี และโหมดหยุดที่สถานีทำหน้าที่นับเวลาหยุดที่สถานีให้ครบ Dwell Time

การวิเคราะห์ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะอาศัยการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวิธีโนด (Node Analysis) ดังแสดงในรูปที่ 6.12 สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ระบบรางตัวนำ และส่วนตัวรถไฟฟ้า โดยทั้งสามส่วนนี้จะพิจารณาการคำนวณแรงดันไฟฟ้า อาศัยแบบจำลองโหนดรถไฟฟ้าในรูปแบบกำลังไฟฟ้า (Power Model)



รูปที่ 6.12 วงจรสมมูลระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

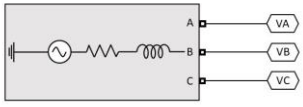

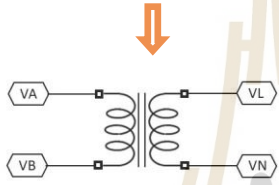

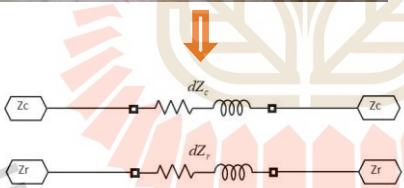

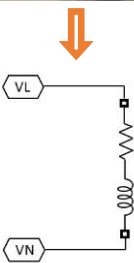
การสร้างวงจรจำลองระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนจะสร้างผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับซิมมูลิงก์บนโปรแกรมแมทแลป ดังแสดงในรูปที่ 6.11 ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ชุดบล็อกของสถานีไฟฟ้ากระแสสลับ ชุดบล็อกกรางตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้า และชุดบล็อกของรถไฟฟ้า ตามลำดับ



รูปที่ 6.13 การสร้างแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มบนซิมมูลิงก์ของโปรแกรมแมทแลป

วงจรจำลองบนซิมมูลิงก์ของโปรแกรมแมทแลปในรูปที่ 6.13 ใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าของซิมมูลิงก์ โดยวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้า ( $V_{SS}$  และ  $I_{SS}$ ) และวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ขั้วรับของตัวรถไฟฟ้า ( $V_r$ ) เพื่อส่งข้อมูลจากการวัดไปคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในโปรแกรมแมทแลปต่อไป การจำลองบนซิมมูลิงก์จะใช้ระยะเวลาจำลองผล (Simulation Time) จาก 0-0.2 s ต่อหนึ่งรอบระยะเวลาคำนวณ (Time Step:  $\Delta t$ ) ในโปรแกรมแมทแลป กำหนดการหาผลเฉลยในซิมมูลิงก์เป็นแบบอัตโนมัติ (Automatic Solver) โดยคำนวณหาค่าต่าง ๆ ในสมการที่ 6.7 ถึงสมการที่ 6.18 และพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ถูกแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์

Component	Simulink Modeling	Parameters
		Phase-to-phase voltage = 22 kV Frequency = 50 Hz
Traction Substation	 	Power and frequency $P = 50\text{kVA}$ , $f = 50\text{ Hz}$ Winding 1                      Winding 2 $V1 = 22\text{ kV}_{\text{rms}}$ $V2 = 56\text{ V}_{\text{rms}}$ $R1 = 0.1007\text{e-}3\ \Omega$ $R2 = 0.075\ \Omega$ $L1 = 3.205\text{e-}6\ \text{H}$ $L2 = 0.260\text{e-}3\ \text{H}$
Conductor Rail	 	Resistance = $0.148\ \Omega/\text{km}$ Impedance = $0.253\ \Omega/\text{km}$ อ้างอิงจากภาคผนวก ข.
APM Vehicle	 	Nominal voltage $V_n = 56\text{ V}_{\text{rms}}$ Nominal frequency $f = 50\text{ Hz}$ Load type : constant PQ



โดยรูปแบบสมการที่ใช้ในการคำนวณทางไฟฟ้าร่วมกับซิมมูลิงก์ แสดงได้ดังนี้

$$V_{SS(k+1)} = V_{SS(end)} \cdot (\cos \phi + j \sin \phi) \quad (6.7)$$

$$I_{SS(k+1)} = I_{SS(end)} \cdot (\cos \phi + j \sin \phi) \quad (6.8)$$

$$V_{tr(k+1)} = V_{tr(end)} \cdot (\cos \phi + j \sin \phi) \quad (6.9)$$

เมื่อ	$V_{SS(k+1)}$	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ารอบปัจจุบันของสถานีจ่ายไฟฟ้าในโปรแกรมแมทแลป, ( $V_{rms}$ )
	$V_{SS(end)}$	คือ แรงดันไฟฟ้าค่าสุดท้ายของสถานีจ่ายไฟฟ้าในซิมมูลิงก์แต่ละรอบ, ( $V_{rms}$ )
	$I_{SS(k+1)}$	คือ ค่ากระแสไฟฟ้ารอบปัจจุบันของสถานีจ่ายไฟฟ้าในโปรแกรมแมทแลป, ( $A_{rms}$ )
	$I_{SS(end)}$	คือ กระแสไฟฟ้าค่าสุดท้ายของสถานีจ่ายไฟฟ้าในซิมมูลิงก์แต่ละรอบ, ( $A_{rms}$ )
	$V_{tr(k+1)}$	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ารอบปัจจุบันของรถเอพีเอ็มในโปรแกรมแมทแลป, ( $V_{rms}$ )
	$V_{tr(end)}$	คือ แรงดันไฟฟ้าค่าสุดท้ายของรถเอพีเอ็มในซิมมูลิงก์แต่ละรอบ, ( $V_{rms}$ )
	$\phi$	คือ มุมเฟสทางไฟฟ้า, (degree)

การคำนวณผลเฉลยของกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า สามารถพิจารณาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$S_{SS} = V_{SS(k+1)} \cdot I_{SS(k+1)}^* \quad (6.10)$$

$$S_{tr} = V_{tr(k+1)} \cdot I_{SS(k+1)}^* \quad (6.11)$$

$$P_{SS(k+1)} = \text{Re}(S_{SS}) \quad (6.12)$$

$$Q_{SS(k+1)} = \text{Im}(S_{SS}) \quad (6.13)$$

$$P_{tr(k+1)} = \text{Re}(S_{tr}) \quad (6.14)$$

$$Q_{tr(k+1)} = \text{Im}(S_{tr}) \quad (6.15)$$

$$P_{loss(k+1)} = P_{SS(k+1)} - P_{tr(k+1)} \quad (6.16)$$

$$E_{SS(k+1)} = E_{SS(k)} + P_{SS(k+1)} \cdot \Delta t \quad (6.17)$$

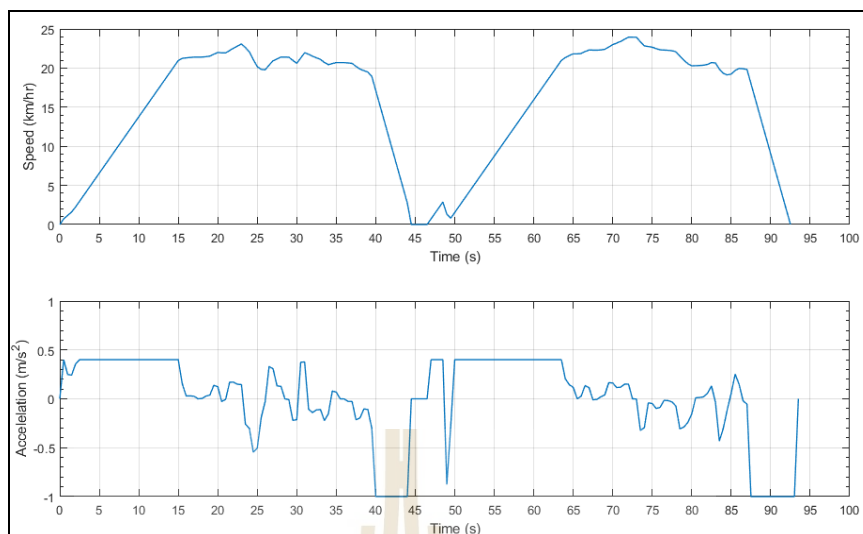
$$E_{loss(k+1)} = E_{loss(k)} + P_{loss(k+1)} \cdot \Delta t \quad (6.18)$$

เมื่อ	$S_{SS}, S_{tr}$	คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่สถานีจ่ายไฟฟ้าและที่รถเอเอ็ม, (VA)
	$P_{SS(k+1)}, P_{tr(k+1)}$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงรอบปัจจุบันในโปรแกรมแมทแลป ที่สถานีจ่ายไฟฟ้าและที่รถเอเอ็ม, (W)
	$Q_{SS(k+1)}, Q_{tr(k+1)}$	คือ กำลังไฟฟ้าด้านกลับรอบปัจจุบันในโปรแกรมแมทแลป ที่สถานีจ่ายไฟฟ้าและที่รถเอเอ็ม, (VAR)
	$P_{loss(k+1)}$	คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียรอบปัจจุบันในโปรแกรมแมทแลป, (W)
	$E_{SS(k+1)}, E_{SS(k)}$	คือ พลังงานไฟฟ้ารอบปัจจุบันและรอบก่อนหน้าในโปรแกรมแมทแลป ที่สถานีจ่ายไฟฟ้า, (Wh)
	$E_{loss(k+1)}, E_{loss(k)}$	คือ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรอบปัจจุบันและรอบก่อนหน้าในโปรแกรมแมทแลป, (Wh)

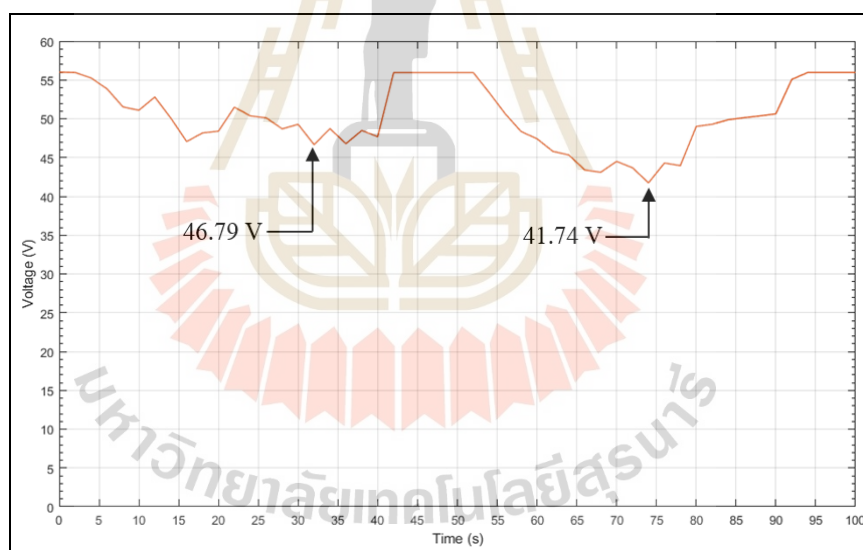
### 6.3.2 ผลการจำลอง

การจำลองผลจะแสดงเป็นสองส่วนหลัก คือ (1) การเคลื่อนที่และสมรรถนะของรถไฟฟ้า คือ ความเร็ว อัตราเร่ง และกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน (2) จำนวนผลการไหลของกำลังไฟฟ้าในวงจรจำลองผล คือ ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และการใช้พลังงานไฟฟ้า

ผลข้อมูลการเคลื่อนที่จากการวัดจริงถูกนำเสนอเป็นกราฟบนโปรแกรมสำเร็จรูปแมทแลป ซึ่งแสดงลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปและกลับเทียบกับระยะเวลา แสดงดังรูปที่ 6.14 มีความเร็วสูงสุด 23.946 km/h ด้วยอัตราเร่ง 0.45 m/s<sup>2</sup>



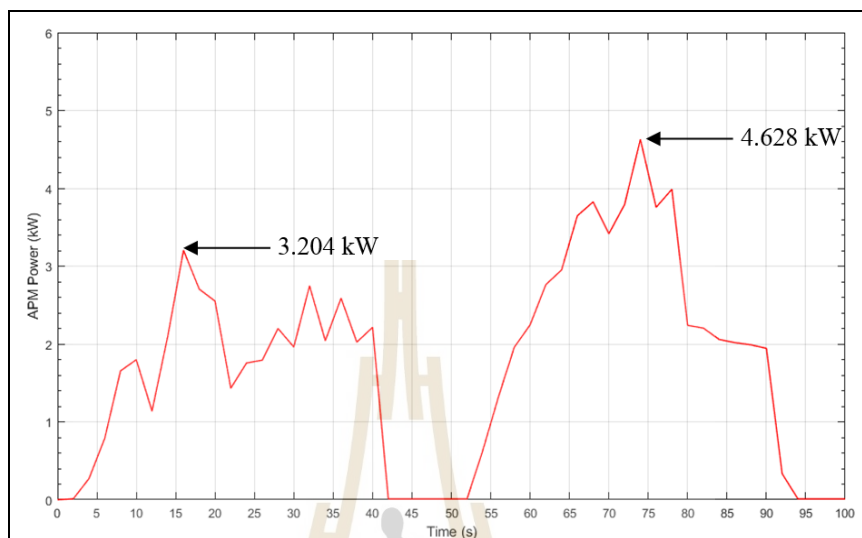
รูปที่ 6.14 ลักษณะความเร็วและอัตราเร่ง



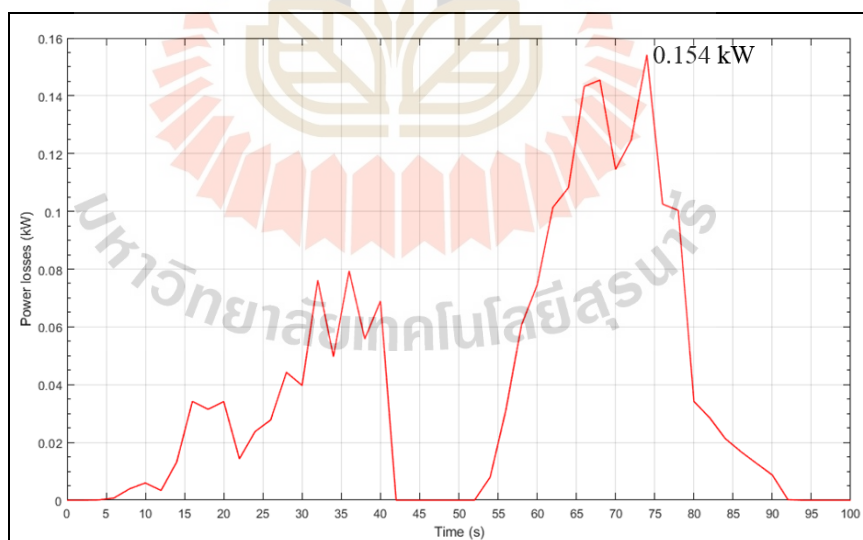
รูปที่ 6.15 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าจากการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์

ลักษณะทางไฟฟ้าจากการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ นำเสนอผลของการรักษา ระดับแรงดันไฟฟ้า ถูกแสดงในรูปที่ 6.15 โดยกราฟไฟฟ้าขับเคลื่อนจากทางวิ่งต้นทางไปยังปลายทาง จากระยะเวลา 0-42 s แสดงให้เห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่เวลา 36 s มีค่าเป็น 46.79 V จากระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ 56.141 V จากนั้นเมื่อรถไฟจะขับเคลื่อนจากทางวิ่งปลายทางไปยังต้น

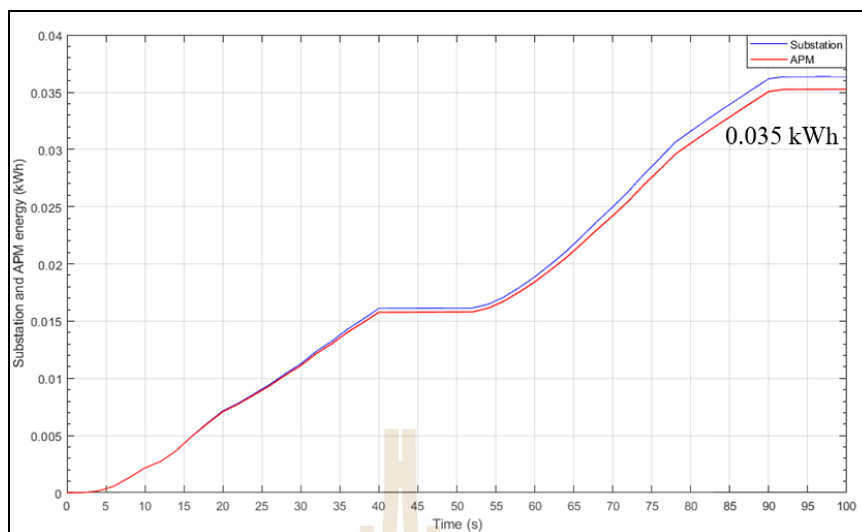
ทางจากระยะเวลา 52-96 s จะเห็นว่าที่เวลา 74 s ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดมีค่าเป็น 41.74 V  
จากระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ 56.076 V



รูปที่ 6.16 กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนจากการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 6.17 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 6.18 พลังงานไฟฟ้าจากการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์

ผลของกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนแสดงในรูปที่ 6.16 โดยรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากทางวิ่งต้นทางไปยังปลายทางระยะเวลา 0-42 s จะเห็นว่าขณะรถไฟฟ้าทำความเร่งให้ได้ความเร็วที่กำหนดที่เวลา 36 s ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าสูงสุดเป็น 3.204 kW จากนั้นเมื่อรถไฟฟ้าขับเคลื่อนจากทางวิ่งปลายทางไปยังต้นทางระยะเวลา 52-96 s และเช่นเดียวกันขณะรถไฟฟ้าทำความเร่งให้ได้ความเร็วที่กำหนดที่เวลา 74 s ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าสูงสุดเป็น 4.628 kW และกำลังไฟฟ้าสูญเสียค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยเป็น 0.154 kW และ 0.039 kW ตามลำดับ ดังรูปที่ 6.17 และการใช้พลังงานไฟฟ้าขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ในรอบเป็น 0.035 kWh ดังรูปที่ 6.18

### 6.3.3 ยืนยันการจำลองผลของแรงดันไฟฟ้าเทียบกับผลวัดจริง

ผลของลักษณะแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากผลการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบกับผลจากการวัดจริง โดยความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองจะอาศัยค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error) หรือ Percent Error (% Error) เป็นการหาค่าความคลาดเคลื่อนด้วยการเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าจริงในแต่ละค่าที่ทำนายและแปลงอยู่ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ สำหรับการวัดค่าความแม่นยำจากวิธีนี้ยิ่งค่าที่ได้มีค่าน้อย นั่นหมายความว่าแบบจำลองที่ได้จะมีความแม่นยำสูง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 6.19

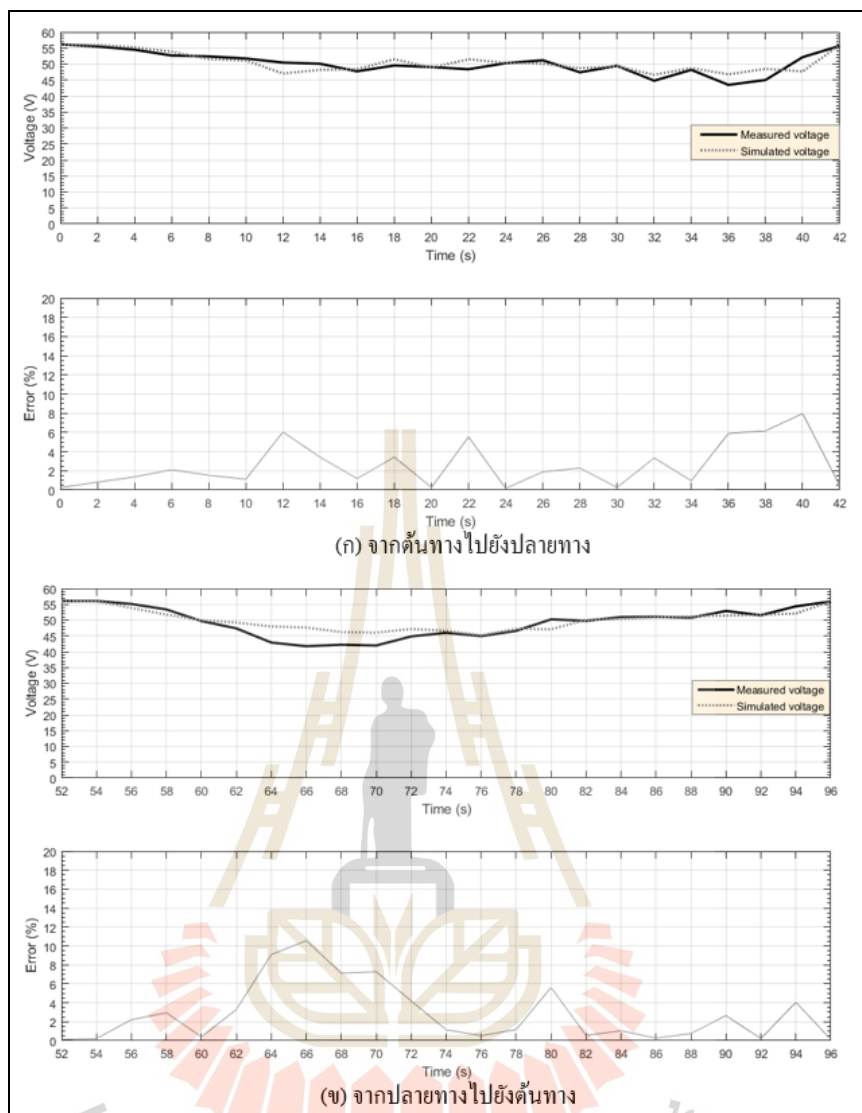
$$\text{Percent Error} = \frac{|\hat{X}_t - X_t|}{X_t} \times 100 \quad (6.19)$$

เมื่อ  $\hat{X}_t$  แทน ค่าทำนายผลจากแบบจำลอง ณ เวลา  $t$  ใด ๆ  
 $X_t$  แทน ค่าผลจากการวัดจริง ณ เวลา  $t$  ใด ๆ

ตารางที่ 6.4 ผลประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง

เคลื่อนที่จากต้นทางไปปลายทาง				เคลื่อนที่จากปลายทางไปต้นทาง			
เวลา (s)	ผลวัดจริง (V)	ผลจำลอง (V)	ความคลาดเคลื่อน (%)	เวลา (s)	ผลวัดจริง (V)	ผลจำลอง (V)	ความคลาดเคลื่อน (%)
0	56.141	56.141	0.000	52	56.076	56.076	0.000
2	55.501	55.961	0.819	54	56.076	55.952	0.221
4	54.481	55.250	1.369	56	55.122	53.879	2.216
6	52.665	53.852	2.114	58	53.397	51.745	2.946
8	52.390	51.527	1.537	60	49.724	49.955	0.411
10	51.724	51.090	1.129	62	47.398	49.243	3.290
12	50.456	47.059	6.05	64	42.903	48.000	9.089
14	50.090	48.172	3.416	66	41.7530	47.676	10.562
16	47.725	48.398	1.198	68	42.223	46.222	7.131
18	49.555	51.485	3.437	70	41.975	46.056	7.277
20	49.058	48.903	0.276	72	44.850	47.204	4.197
22	48.378	51.485	5.534	74	46.000	46.645	1.150
24	50.273	50.369	0.170	76	44.955	45.252	0.529
26	51.175	50.113	1.891	78	46.614	47.269	1.168
28	47.411	48.694	2.285	80	50.260	47.110	5.617
30	49.437	49.283	0.274	82	49.790	50.100	0.552
32	44.785	46.662	3.343	84	50.979	50.393	1.045
34	48.182	48.725	0.967	86	51.070	50.921	0.265
36	43.478	46.785	5.890	88	50.770	51.193	0.754
38	45.020	48.486	6.173	90	52.913	51.428	2.648
40	52.155	47.685	7.962	92	51.567	51.693	0.224
42	55.684	55.944	0.463	94	54.377	52.100	4.060
44	56.076	55.950	0.224	96	55.994	55.960	0.112





รูปที่ 6.19 เส้นกราฟเปรียบเทียบผลแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้กับผลการจำลอง

จากข้อมูลผลวัดจริงและผลจากแบบจำลองนำเสนอลักษณะแรงดันไฟฟ้าของระบบ รถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ประเมินค่าความคลาดเคลื่อนแบบจำลองในสมการที่ 6.20 สามารถแสดงผลได้จาก ตารางที่ 6.3 และแสดงกราฟเปรียบเทียบผลของแรงดันไฟฟ้า ในรูปที่ 6.19 เมื่อขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ จากต้นทาง ไปยังปลายทาง และจากปลายทางกลับไปยังต้นทาง พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนจาก แบบจำลองมีค่าสูงสุดเป็น 7.962 % และ 10.562 % ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน จากแบบจำลอง มีค่าเป็น 2.468 % และ 2.852 % ตามลำดับ จากการพิจารณาเส้นกราฟแรงดัน ไฟฟ้าที่ ได้จากการจำลองมีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกับผลการวัดจริง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ที่พัฒนาขึ้น เกิดจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น

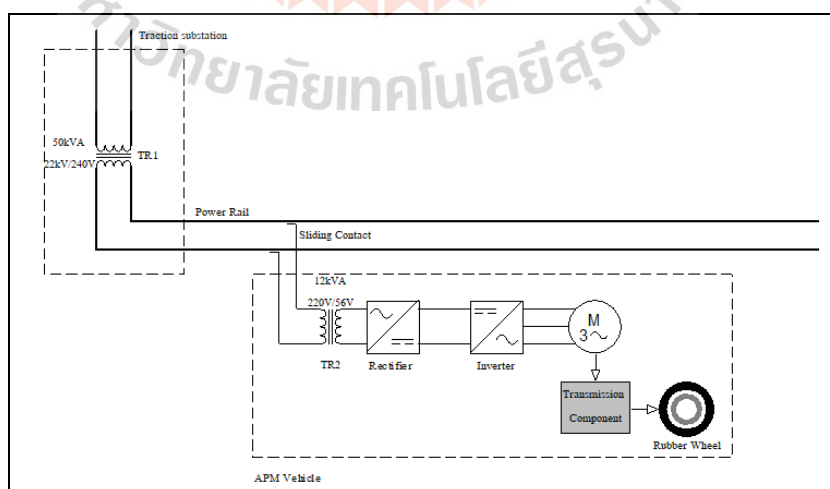
1. ความแม่นยำการเก็บข้อมูลจากการวัดความเร็วของรถไฟ และระดับทางชันของทางวิ่ง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากสาเหตุของสัญญาณ GPS ที่ไม่มีความเสถียรเนื่องจากแนวทางวิ่งของรถไฟมีระยะทางสั้น

2. การควบคุมความเร็วของรถไฟต่างกัน ซึ่งในโปรแกรมใช้วิธีควบคุมแบบพื้นฐานจะเห็นได้ว่าลักษณะการคำนวณจังหวะควบคุมความเร็วอาจไม่ตรงกับความเป็นจริง โดยสภาวะการเร่งความเร็วจะใช้พลังงานตามปกติ สภาวะลดความเร็วจะดึงโหลดน้อยในโปรแกรมเสมือนใช้พลังงานเพื่อเอาชนะแรงโน้มถ่วงกับแรงต้าน แต่สภาวะเร่งความเร็วของการทดสอบจริงจะไม่สามารถควบคุมได้ และการเบรคในโปรแกรมไม่เสมือนจริง

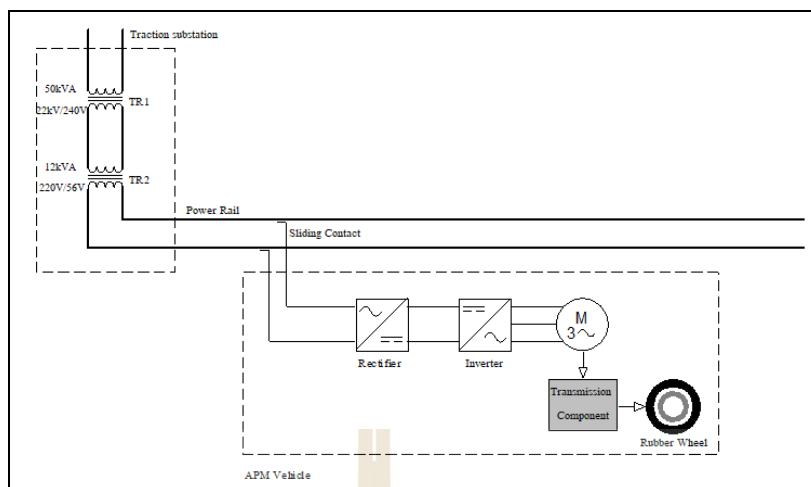
3. เนื่องด้วยข้อจำกัดของคุณลักษณะมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อน

#### 6.4 แนวทางการแก้ปัญหาทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

สถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสลดระดับแรงดัน 22 kV เป็น 240 V ป้อนผ่านรางตัวนำจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าของรถไฟ ที่มีหม้อแปลงลดระดับแรงดัน 240 V เป็น 56 V ติดตั้งยึดติดบนตัวรถไฟฟ้าป้อนให้กับระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 6.20 ทดสอบจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าของรถไฟพบว่า มีกระแสไฟฟ้าวูไปสู่อำตรองของรถไฟ ซึ่งสาเหตุเกิดจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากหม้อแปลงลดระดับแรงดันเข้าสู่ตัวโครงของรถไฟ จากการวัดแรงดันไฟฟ้ตกคร่อมที่โครงของรถไฟกับรางตัวนำนิวทรัล และพื้นทางวิ่งพบว่า มีค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำประมาณ 15 V ถือว่าเป็นแรงดันสัมผัสซึ่งจะเป็นอันตรายต่อบุคคล



รูปที่ 6.20 ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับก่อนปรับปรุง



รูปที่ 6.21 ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับหลังปรับปรุง

ผลของกระแสไฟฟ้ารั่วเข้าสู่ตัวโครงของรถไฟฟ้า การแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้านี้ เมื่อพิจารณาหม้อแปลงลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งบนตัวรถไฟฟ้ามีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้าไปสู่ตัวโครงรถไฟฟ้า โดยทำการย้ายหม้อแปลงดังกล่าวไปติดตั้งที่สถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนป้อนระดับแรงดันทำงาน 56 V ผ่านรางตัวนำจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าของรถไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 6.21 หลังจากนั้นทำการทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าหลังการปรับปรุงให้กับระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าพบว่า ไม่มีกระแสไฟฟ้ารั่วไปสู่ที่ตัวโครงของรถไฟฟ้า ยืนยันด้วยการวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่โครงรถไฟฟ้ากับรางตัวนำของนิวทรัลและพื้นทางวิ่ง มีค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ การปรับปรุงครั้งนี้ทำให้ระบบจ่ายไฟฟ้าป้อนให้กับระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามีความปลอดภัยทางไฟฟ้าขึ้น

## 6.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 นี้ได้กล่าวถึง การทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังที่ออกแบบและสร้างขึ้นป้อนให้กับรถไฟฟ้า โดยกำหนดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าบนเส้นทางวิ่งในโหมดการทำงานวิ่งไปและกลับ บันทึกผลลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแปรข้อมูลเป็น โครงร่างความเร็วในการทำงานของรถไฟฟ้า และผลการทดสอบของคุณภาพทางไฟฟ้าถูกจำแนกเป็นชุดข้อมูลเพื่อนำเสนอเป็นเส้นกราฟ ได้แก่ ลักษณะแรงดันและกระแสไฟฟ้า เปอร์เซนต์แรงดันไฟฟ้า ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน และการใช้พลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อน ตามลำดับ จากนั้นยืนยันผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์เทียบกับผลการวัดจริงพบว่า ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มไปทางเดียวกับผลการวัดจริง มีค่า

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งถือว่ายอมรับได้ นอกจากนี้ได้กล่าวถึงแนวทางการแก้ปัญหาทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง



## บทที่ 7

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุป

งานวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบสร้างระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม และพัฒนาโปรแกรมจำลองผลของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ได้เริ่มศึกษาจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมา ได้แก่ การนำคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณผ่านการสร้างแบบจำลองของระบบในภาพรวมเพื่อใช้ประเมินการออกแบบวางแผนระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม โครงการวิจัยการออกแบบสร้างและติดตั้งระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ท้ายสุดได้สำรวจข้อมูลของระบบไฟฟ้าเอพีเอ็มของแต่ละบริษัทผู้ผลิต ผลงานวิจัยต่าง ๆ ข้างต้น ถือว่าเป็นพื้นฐานและองค์ความรู้สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัยในงานวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งถูกนำเสนอในบทที่ 2 ส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มของต่างประเทศและในประเทศไทย หลักการของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน และการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นเนื้อหาในบทที่ 3 แบบจำลองระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม นำเสนอในบทที่ 4 แสดงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มรวมถึงการคำนวณสมรรถนะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเอพีเอ็มจำลองผลระบบ โดยการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า อาศัยชุดคำสั่งโปรแกรมแมทแลปเชื่อมโยงการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ด้วยวงจรจำลองผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับซิมูลิงก์ในโปรแกรมแมทแลป เพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังในระบบไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม อย่างไรก็ตามการยืนยันผลด้วยการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ อาจไม่เพียงพอ ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ออกแบบระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มแสดงในบทที่ 5 ประกอบด้วย แนวการวางทางวิ่งพร้อมระบบรางตัวนำที่ติดตั้งไปตามทางวิ่งรถไฟฟ้า มีระยะทาง 200 m สถานีผู้โดยสาร 2 สถานี ลักษณะตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย วงจรจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าและอุปกรณ์บนตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม และวงจรจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์สนับสนุนการทำงานของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม นอกจากนี้ได้ออกแบบระบบการต่อลงดินของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังเพื่อความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน

จากระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มที่ออกแบบสร้างขึ้นทำการทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ซึ่งนำเสนอในบทที่ 6 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการจ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็มขณะขับเคลื่อนให้รถไฟฟ้าทำงานวิ่งไปตามเส้นทางที่กำหนดใน

ลักษณะวิ่งไปและกลับพบว่า ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับแรงดันไฟฟ้าทำงานยอมให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกสูงสุดไม่เกิน 30 % จากนั้นได้ยืนยันผลเฉลยของแรงดันไฟฟ้าจากการจำลองผลบนคอมพิวเตอร์เทียบกับผลทดสอบจริงพบว่า ค่าความคาดเคลื่อนจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีความคาดเคลื่อนค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยเป็น 10.562 % และ 2.852 % ตามลำดับ ซึ่งถือว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องแม่นยำที่ยอมรับได้ ในลำดับท้ายสุดได้นำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสม ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้งานกับระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มได้จริง

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิทยานิพนธ์ที่ได้นำเสนอนี้ แม้ว่าระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังที่ออกแบบสร้างขึ้นจะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านรางตัวนำป้อนเข้ามายังตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็มทำงานขับเคลื่อนบนเส้นทางวิ่งตามข้อกำหนดได้แล้วก็ตาม แต่ยังมีประเด็นที่สามารถพิจารณาศึกษาเพิ่มเติมขึ้นได้อีก ดังนี้คือ

1. ระบบความปลอดภัยทางไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็มได้แก่ ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนผ่านรางตัวนำและระบบไฟฟ้าในตัวรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม เมื่อพิจารณาการจ่ายไฟฟ้ากำลังที่ระดับแรงดันสูง เพื่อการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น ค่ากระแสที่สูงนี้มีผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าให้เกิดขึ้นในบริเวณต่าง ๆ รวมทั้งสร้างปัญหาของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กให้เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบควบคุมของรถไฟฟ้า ดังนั้นควรศึกษาการออกแบบระบบความปลอดภัยทางไฟฟ้า โดยต้องป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อบุคคลจากการสัมผัสโดยตรงที่เกิดได้หลายรูปแบบและโดยทางอ้อม

2. สืบเนื่องในข้อ 1 ในกรณีของระบบรางตัวนำป้อนให้กับรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ ซึ่งไม่มีการต่อตัวนำกับโครงรถไฟฟ้าลงดิน ดังนั้นควรเพิ่มการออกแบบติดตั้งรางตัวนำเพิ่มสำหรับระบบการต่อลงดินสัมผัสกับโครงรถไฟฟ้า

3. ศึกษาโครงสร้างรูปแบบระบบการจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสตรงให้กับรถไฟฟ้าเอพีเอ็มเพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนในการวางแผนและประเมินระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม สำหรับการออกแบบสร้างระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าเอพีเอ็มที่มีความเหมาะสม และประหยัดพลังงานไฟฟ้าต่อไป

4. การพัฒนาโปรแกรมจำลองผลสำหรับระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม ควรได้รับการศึกษาและพัฒนาอย่างละเอียด โดยพิจารณาวิธีการควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในรูปแบบพลวัตของระบบให้มีความแม่นยำมากขึ้น



## รายการอ้างอิง

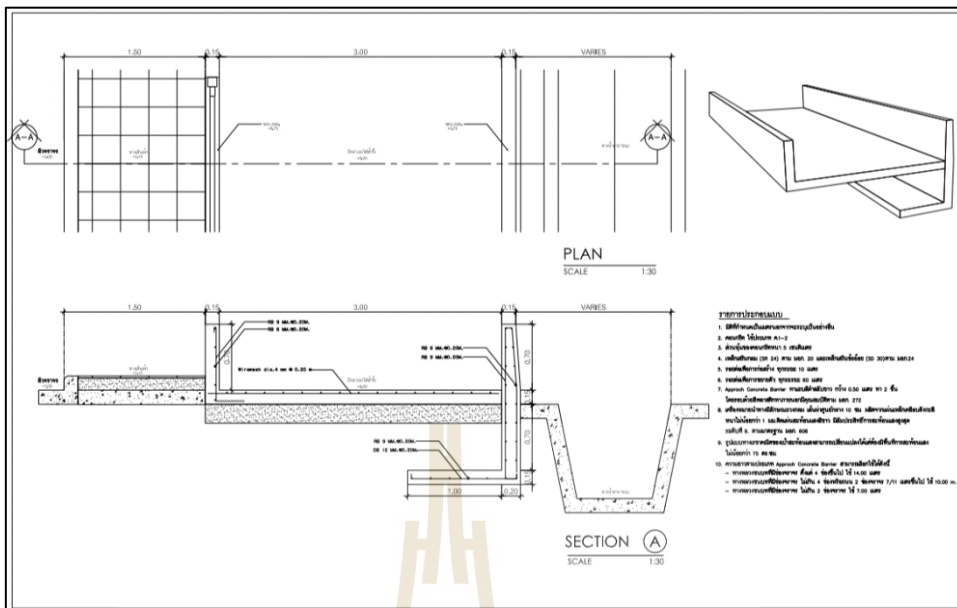
- ชนิดชัย กุลวรรณิขพงษ์ (2560). ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ และคณะ (2560). คู่มือการต่อลงดิน. แผนกราฟฟิกจำกัด. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- รายงานการศึกษาและวิเคราะห์ (2553). โครงการพัฒนาท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ. บริษัทท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน).
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2557). มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2556. พิมพ์ครั้งที่ 2.
- สำนักการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร (2560). โครงการระบบขนส่งมวลชนขนาดรองสายสีทอง.
- Anagnostopoulos, G. (1981). Interim Assessment of the VAL Automated Guideway Transit System. **U.S. Department of Transportation. Transportation Systems Center Cambridge.**
- Akira Nehashi. (2001). New Types of Guided Transport. **Japan Railway and Transport Review**, 26: 58-67 P.
- CONDUCTIX wampfler, Heavy-Duty Conductor Rail Copper Head. [On-line serial], Retrieved August 9, 2019 from the World Wide Web: <https://www.conductix.us/en>.
- George H. Williams. (1980). Simulation Models for the Electric Power Requirements in a Guideway Transit System. **U.S. Department of Transportation.**
- Hiroyuki Mochidome., et al (2003). Automated People Mover System “Crystal Mover” for Singapore’s LTA. **Technical Review**, Vol. 40, No.3: 1-10 P.
- Horst, G. and Hermann, Z. (1980). Development Status of Automated Guideway Transit (AGT) Systems in Europe and Japan. **Vehicular Technology Society IEEE**: 1-9 P.
- Fluke Corporation. (2010). Electrical Installation Tester.
- Kassu, B. (2017). **Assessment and Mitigation of Voltage Drops on Traction Lines: Case Study of Sebeta-Adama Line.** Ph.D. Thesis, Addis Ababa University, Addis Ababa Ethiopia.

- Khemkladmuk, B., Leeton, U. and Kulworawanichpong, T. (2018). A Study Control Speed Profile Optimization for Automated People Mover. **International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering, Volume-6, Issue6**: 28-31 P.
- Kulworawanichpong, T. (2003). **Optimising AC Electric Railway Power Flows with Power Electronic Control**. Ph.D. Thesis. University of Birmingham. UK. November.
- MARCH, MHS Rigid Conductor Bar Series. [On-line serial], Retrieved August 9, 2019 from the World Wide Web: <http://www.march-china.com>.
- Lea+Elliott. (2008). Dellas Love Field People Mover Connector Feasibility Study. Transportation Consultants.
- Lea+Elliott. (2010). Guidebook for Planning and Implementing Automated People Mover Systems at Airports. **Transportation Research Board**.
- Raney, S., and Young, S. (2005). Morgantown People Mover-Updated Description. **In Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting**, 1-12 P.
- Rongfang Liu. (2017). Automated Transit Planning Operation and Applications. **The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc**, 47-61 P.
- Sakita, T., and Oda, Y. (2007). First Transportation Project APM System for Hong Kong International Airport. **IHI Engineering Review**, Vol.40, No.1: 42-45 P.
- Shunying Xia., et al (2019). Optimization Design of Traction Substation in APM Traction Power Supply System based on Adaptive Particle Swarm Algorithm. **In Proceedings of the IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems**, 199-204 P.
- Steve, R., and Stan, Y. (2005). Morgantown People Mover-Updated Description. **Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C.:**1-12 P.
- Toshio, H., Kazutaka, Y., and Arata, M. (2009). “Crystal Mover” Automated People Mover for Miami International Airport. **Mitsubishi Heavy Industries Technical Review**, Vol.46 No.1: 23-25 P.
- Yasu Oura, Yoshifumi Mochinga, and Hiroki Nagasawa. (1998). Railway Electric Power Feeding Systems. **Japan Railway and Transport Review** 16, 48-58 P.
- Yi-Dar Lin and Antonio A. Trani. (2000). Airport Automated People Mover Systems Analysis with a Hybrid Computer Simulation Model. **Transportation Research Record**, 45-57 P.

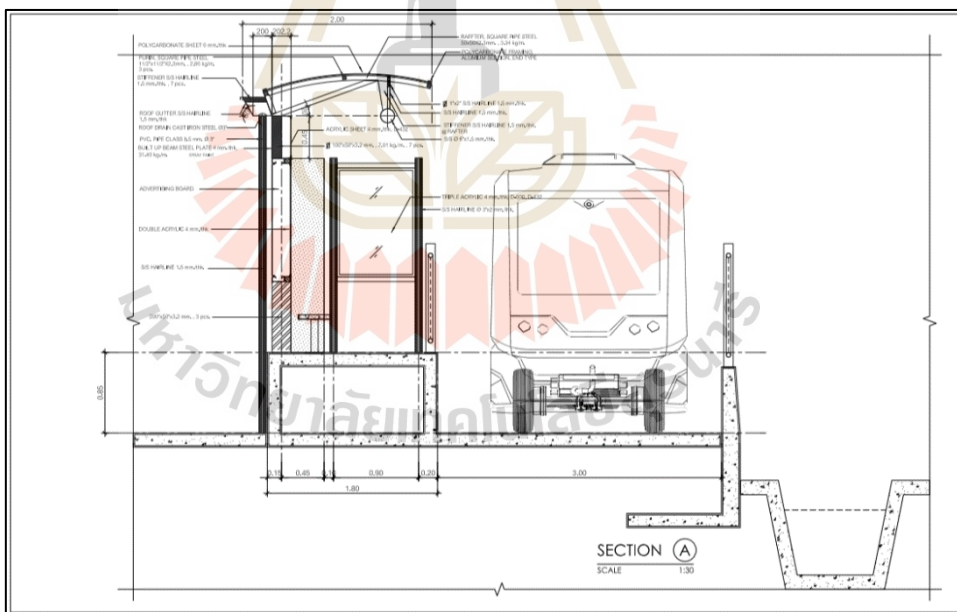
ภาคผนวก ก

แบบโครงสร้างและภาพประกอบของระบบรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

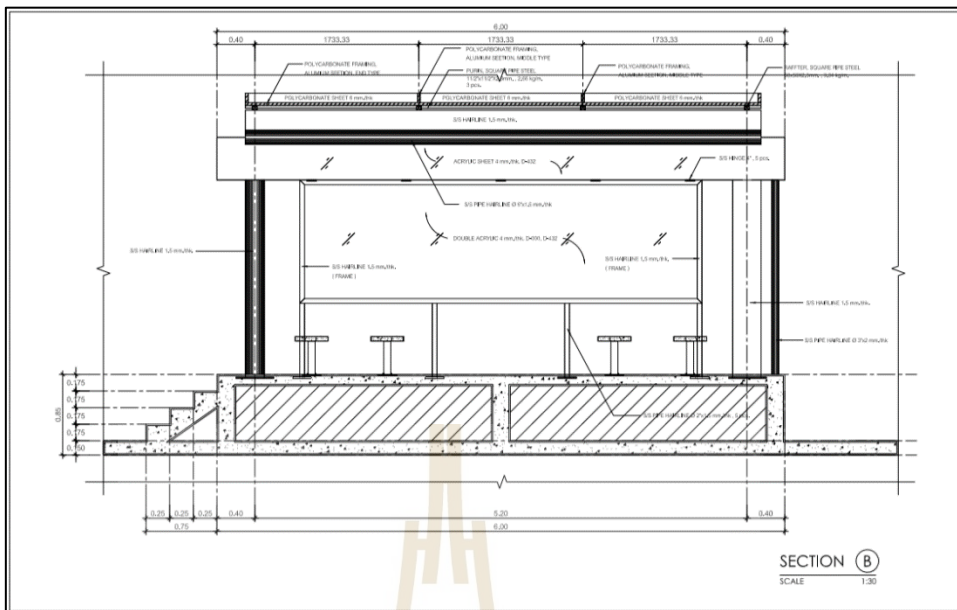
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



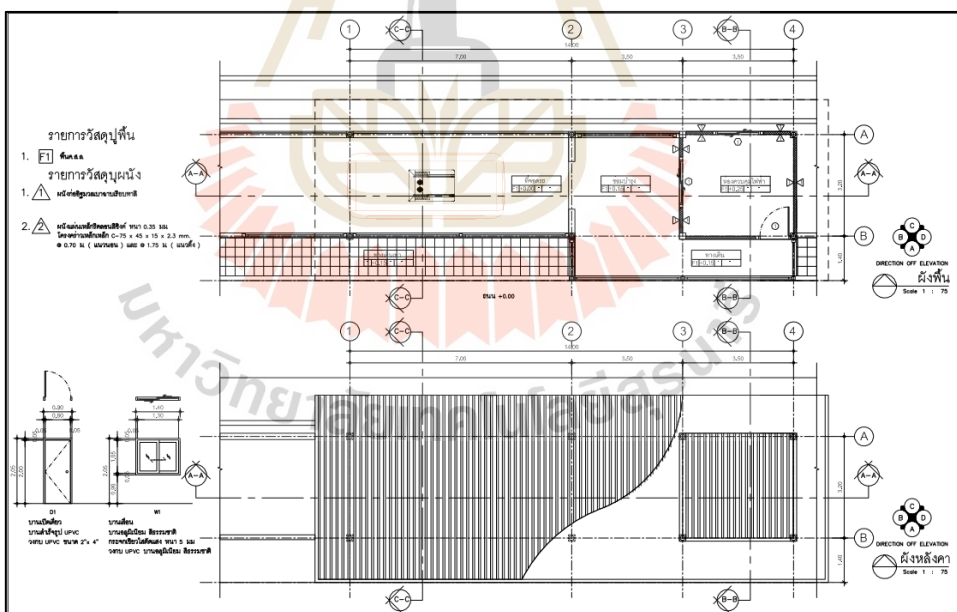
รูปที่ ก.1 ทางวิ่งของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม



รูปที่ ก.2 สถานีผู้โดยสารและทางวิ่งของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม



รูปที่ ก.3 สถานีรับส่งผู้โดยสาร



รูปที่ ก.4 ศูนย์กลางระบบควบคุมและสถานีจ่ายไฟฟ้ากำลัง







รูปที่ ก.7 รูปภาพสถานีรับส่งผู้โดยสารต้นทาง



รูปที่ ก.8 รูปภาพทางวิ่งนำทางและรางตัวนำส่งจ่ายไฟฟ้า





รูปที่ ก.9 รูปภาพสถานีรับส่งผู้โดยสารปลายทาง



รูปที่ ก.10 รูปภาพระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ ก.11 รูปภาพตู้ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง



ภาคผนวก ข

ข้อมูลจำเพาะของรางตัวนำไฟฟ้า

## ข.1 ระบบรางตัวนำ

### 技术参数

- 必须为承受预期的电力负荷提供足够的安培容量：
- 总安培负载是把标称的额定负载电流总值用负载循环(ED)和一个非同时操作的不同时率进行折算之后来确定。
- 起重机电动机的平均负载循环通常在40%到60%之间，并取决于应用类型。
- 当同一滑道上有一台以上起重机时，可以使用一个数值
- 在0.4到0.7之间的不同时率。

Duty cycle	f <sub>co</sub>
100%	1.00
80%	0.90
60%	0.78
50%	0.71
40%	0.63

#### 举例

3台起重机，每台的 $I_n=300$ 安培  
 滑道长度：100米(330')  
 假定负载循环：60%(ED)  
 假定不同时率：0.7  
 每台起重机的安培负载： $I_n \times fED=300$ 安培  $\times$  0.78=234安培  
 3台起重机的安培负载：234安培  $\times$  3=702安培  
 使用时的总安培负载  
 不同时率为0.7：702安培  $\times$  0.7=491.4安培  
 选用的导线：MHS-50/500A-FE； MHS-30/500A-AL。

### Technology parametric

Must provide sufficient ampacity to withstand the expected power load  
 The total ampere load is the total value of the nominal rated load current with a duty cycle and not at the same time the rate of a non-simultaneous operation later determined to be discounted  
 The average duty cycle of the motor crane usually between 40% and 60%, and depending on the type of application  
 When there is more than one crane on the same slide, you can use a value between 0.4 to 0.7

#### Example

Three cranes each  $I_n=300A$   
 Track length  
 Assumed duty cycle  
 Assumed rate  
 Amp load for each crane  
 Amp load for three cranes  
 Total working amp load  
 Rate  
 The chosen conductor bar

### 其他标准

选择导线横面以承受计算出的总安培负载，并且兼顾到推算出的电压降应该保持在电动机制造商所设定的限度之内。万一电压超出了限度，导线的尺寸或馈电点的数目应该能够随之增加。用于非常高的安培负载时，应该有必要配备应急电缆。

通过对应用类型及环境类型（诸如：重型负载或者轻型负载的工作、腐蚀、热、湿度、内部标准）的考虑来指定正确的迈茨刚体导线。

### Other criteria

Select conductor cross faces to withstand the calculated total ampere load, and the inferred voltage drop should be kept within the limits set by the motor manufacturer. In case the voltage exceeds the limit, the size of the number of wires or the feeding point can be increased. Amp for very high load, there should be equipped with necessary emergency cable.

Specify the correct bars of March the rigid body through the type of application and the type of environment (heavy work load or light load, corrosion, heat, humidity and internal standard).

### 用于推算电压降的公式 Formula for Voltage Drop Calculation

交流电 (AC):  $\Delta \mu = \sqrt{3} \times I \times l \times Z$

直流电 (DC):  $\Delta \mu = 2 \times I \times l \times R$

$\Delta \mu$  = 电压降 (伏特) Voltage drop [V]

R = 电阻[欧姆/米]Resistance[Ohm/m]

I = 安培负载[安培]Ampere load[A]

l = 从馈电点到导线末端的长度[米]

Length from power feed to end of conductor[m]

Z = 阻[欧姆/米]Impedance[Ohm/m]

L = 系统长度[米]System length[m]

### 有效长度 Effectice length

l = L电力馈电点位于系统的末端

Power feed located at the end of the system

l = L/2电力馈电点位于系统的中点

Power feed located at the mid-point of the system

l = L/4电力馈电点同时位于系统的两末端

Power feed located at both ends of the system

l = L/6电力馈电点位于距离系统任何一端的L/6处

Power feed located at L/6 from each end of the system

型号 Type	安装底座规格 Installation base specification (mm)	最大连续电流 Maximum Continuous Amperage (A)	电阻 Resistance Ω/1000m	阻抗* Impedance Ω/1000m
MHS-14200A-FE	20	200	0.506	0.573
MHS-25320A-FE	20	320	0.388	0.458
MHS-30400A-FE	20	400	0.251	0.336
MHS-50500A-FE	35	500	0.148	0.253
MHS-100830A-FE	35	630	0.096	0.214
MHS-150700A-FE	35	700	0.076	0.203
MHS-200800A-FE	35	800	0.072	0.194
MHS-3001000A-FE	35	1000	0.051	0.182
MHS-4001200A-FE	45	1200	0.048	0.174
MHS-5001350A-FE	45	1350	0.040	0.169
MHS-6501600A-FE	45	1600	0.035	0.165
MHS-7002000A-FE	70	2000	0.032	0.160
MHS-7502300A-FE	70	2300	0.028	0.156
MHS-8002600A-FE	70	2600	0.025	0.151
MHS-9003000A-FE	70	3000	0.020	0.148
MHS-200720A-CU	20	720	0.088	0.227
MHS-4001100A-CU	35	1100	0.045	0.197
MHS-7501600A-CU	45	1600	0.030	0.187
MHS-8002000A-CU	45	2000	0.023	0.168
MHS-9002600A-CU	45	2600	0.018	0.160

高达4000安培, 可选专用的导电轨。

Reach up to 4000 Amp, choose special conductor rail

型号 Type	安装底座规格 Installation base specification (mm)	最大连续电流 Maximum Continuous Amperage (A)	电阻 Resistance Ω/1000m	阻抗* Impedance Ω/1000m
MHS-14200A-AL	20	450	0.183	0.255
MHS-20300A-AL	35	600	0.101	0.227
MHS-30500A-AL	35	700	0.091	0.220
MHS-50700A-AL	35	800	0.072	0.207
MHS-60800A-AL	45	800	0.071	0.0201
MHS-100900A-AL	45	900	0.060	0.193
MHS-1501000A-AL	45	1000	0.051	0.188
MHS-2001100A-AL	45	1100	0.045	0.184
MHS-3001300A-AL	45	1300	0.035	0.177
MHS-4001600A-AL	45	1500	0.030	0.172
MHS I - 30500A-AL	35	500	0.063	0.187
MHS I - 70800A-AL	45	800	0.046	0.184
MHS II - 1501100A-AL	45	1100	0.042	0.181
MHS II - 2001600A-AL	45	1600	0.038	0.179
MHS II - 3002000A-AL	70	2000	0.032	0.174
MHS-400800A-AL	35	680	0.076	0.287
MHS-5001100A-AL	35	1100	0.062	0.258
MHS-6001350A-AL	45	1350	0.056	0.225
MHS-12001600A-AL	45	1600	0.042	0.191
MHS-15732000A-AL	70	2000	0.034	0.182
MHS-2102600A-AL	70	2600	0.030	0.164
MHS-3022900A-AL	70	2900	0.022	0.162

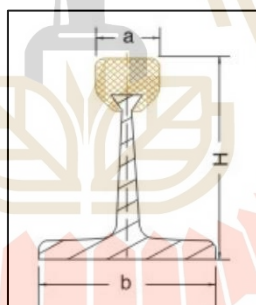


## ข.2 ส่วนประกอบระบบรางตัวนำ

ระบบรางตัวนำ ประกอบไปด้วย (1) Steel Copperhead Conductor Bar and Accessories (2) Expansion Joint (3) Rigid Joint (4) Feeder Clamp และ (5) Insulator สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ตารางที่ ข.1 รายละเอียดของ Steel Copperhead Conductor Bar and Accessories

Type	Copper Cross Section (mm <sup>2</sup> )	Steel Cross Section (mm <sup>2</sup> )	Equivalent Total Copper (mm <sup>2</sup> )	H (mm)	a (mm)	b (mm)	Weight (kg/m)	Max Continuous (A)
MHS - 50/500A-FE	50	266	88	43.1	14.6	35	3.20	500

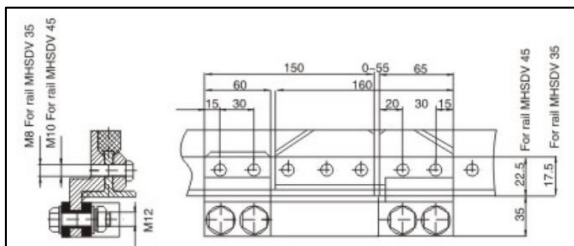


รูปที่ ข.1 มิติของ Steel Copperhead Conductor Bar and Accessories

ตารางที่ ข.2 รายละเอียดของ Expansion Joint

Type	Material	Weight (kg)
MHSDV 35/50	Brass	1.15

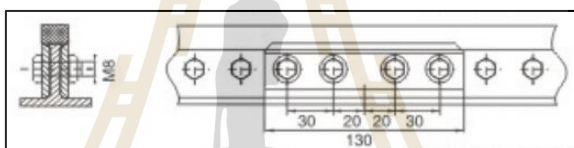




รูปที่ ข.2 มิติของ Expansion Joint

ตารางที่ ข.3 รายละเอียดของ Rigid Joint

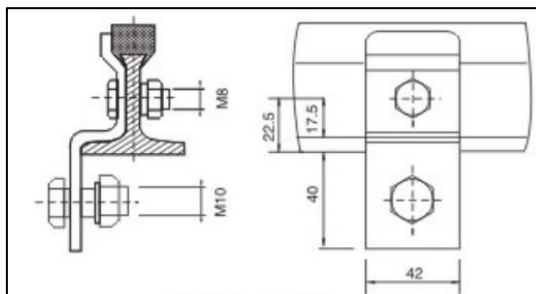
Type	Material	Weight (kg)
MHSFV 35/50 -200	Brass	0.42



รูปที่ ข.3 มิติของ Rigid Joint

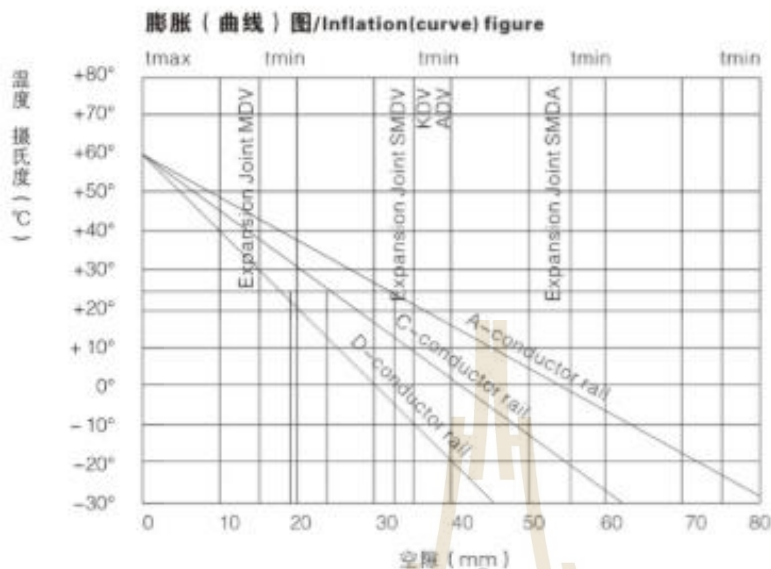
ตารางที่ ข.4 รายละเอียดของ Feeder Clamps

Type	Material	Weight (kg)
MHSCu 35/200	Copper	0.22



รูปที่ ข.4 มิติของ Feeder Clamps

## 钢体滑触线的安装/Installation of Copperhead Conductor bar



### 膨胀(曲线)图/Inflation(curve) figure

该图显示不同导电轨的标定线, 前提是将膨胀接头之间的间隔距离认作为42米。

The picture shows different calibration line of guide rail, the premise is regard the distance between the expansion joint as 42 meters.

由于调整空隙值 (即横坐标左右移动) 将会导致标定线上相应的点 (纵坐标上下) 平行移动, 一直可以向上移到图中现有的环境最高预期温度的那一点。

Due to adjust the gap value will lead to calibration line parallel to the corresponding point move, still can move up to the figure of the existing maximum expected temperature environment.

所以可以 (在温度坐标轴/纵坐标轴上) 把安装过程中的实际环境温度作为起点, 向右 (作水平线) 与标定线相交。沿纵轴 (方向) 向下 (投影, 在空隙值轴上/横坐标轴上) 读取以毫米为

举例:

环境温度: 25℃

MHSFE导轨的空隙=19毫米

MHSCU导轨的空隙=24毫米

MHSAL导轨的空隙=33毫米

So you can put the actual environment temperature as a starting point in the process of installation, followship with calibration line to the right. Read down along the longitudinal axis.

For example:

Environment Temperature: 25c

MHSFE gap of conductor bar=19mm

MHSCU gap of conductor bar=24mm

MHSAL gap of conductor bar=33mm

把托架安装到横梁或桁架上, 焊接固定或者用螺钉固定, ANF、ANL、ANT型导轨按2米 (6'-6") 的中心间距来固定; 其中他所有型号的导轨按2.5米 (8'-8") 的中心间距来固定。

To install brackets in beams or yan rack, welding of fixed or with screws. ANF, ANL, ANT series conductor bar fixed according to the center of the 2 m spacing, other series fixed according to 2.5m center spacing.

ANF、ANL、ANT型导轨的标准间距是150毫米 (6')、最小间距 (6')、最小间距是120毫米 (5')

用于高电压设备: 大约是250毫米

The standard spacing of ANF, ANL, ANT series conductor is 150mm, the minimum spacing is 120mm. Used for high voltage equipment: about 250mm.

■ 用螺钉把绝缘体/导轨的支架固定到托架上，固定用的螺钉要“手工上紧”。

The insulator with screw/guide bracket fixed to the bracket, fixed with screw to tightening up "by hand".

一般配置见图A。

The general configuration as shown in figure A

把导体放置进绝缘体时，一定要确保对导轨的支撑是“可滑动的紧固”，以容许膨胀和收缩（发生时能自动进行调整）。

When the conductor is placed into the insulators, it is important to ensure that support for the guide rail is "tightening up" on slide, to allow the expansion and contraction.

当把支柱螺钉旋到钢托架上的时候，不要改变位置（不要转动导轨支架）。

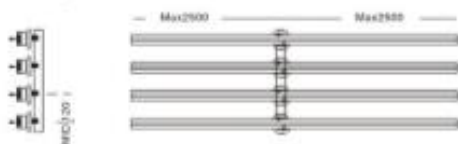
When the pillar screw whorl on steel bracket, don't change position.

■ 使用刚性接头或膨胀接头通过每段6米部件末端预设好的小孔来连接。当系统整体长度达100米（330'）时不需要使用膨胀接头。当滑行路程更长时，每间隔6个6米的标准长度使用一个膨胀接头。在特别炎热的环境以及温度强烈波动的场所，间距需减到28米（92'）。关于间隙的调整设定见左侧的图表和举例。

Using rigid joint or expansion joint by 6 m parts at the end of each preset holes to link. When the system is the overall length of 100 meters do not need to use the expansion joint, when the sliding distance is longer, 6 the standard length of 6 meters intervals using an expansion joint. In the special environment and temperature of the hot strong fluctuations, spacing should be cut to 28 m. About the clearance adjustment Settings according to the left side of the chart and an example.

在每个膨胀接头的附近(相距大约250毫米处)另外加装一个绝缘体/导轨支架。

Near each of the expansion joint installed an insulator/guide bracket.



图A

■ 用于“可控滑行”的导轨，应通过的滑道中间绝缘体的邻近位置或者在两个膨胀接头的中间位置安装两个定位夹，同时在两个方向上予以固定。（见图B+C）

Conductor bar for "slide controlled", should be in the middle of the through the sideway of insulator adjacent location or position in the middle of the two expansion joint installed two positioning clamp, shall be fixed in two directions at the same time. (according to figure B+C)

■ 在馈电点安装馈电线夹。用螺钉固定到轨腰上，并braise到铜头上。

Install feeder clamp in feed point to rail waist with screws, and fixed to the copper head

■ 准备好与正常工作高度配套的“集电器托架”，固定好“集电器”的柱状螺栓/双头螺栓，把“集成电路电器”牢固地安装好。

Prepared collector bracket, which highly necessary to daily work, fixed "collector" columnar/stud bolts, installed integrated circuit electronics firm.



图B



图C

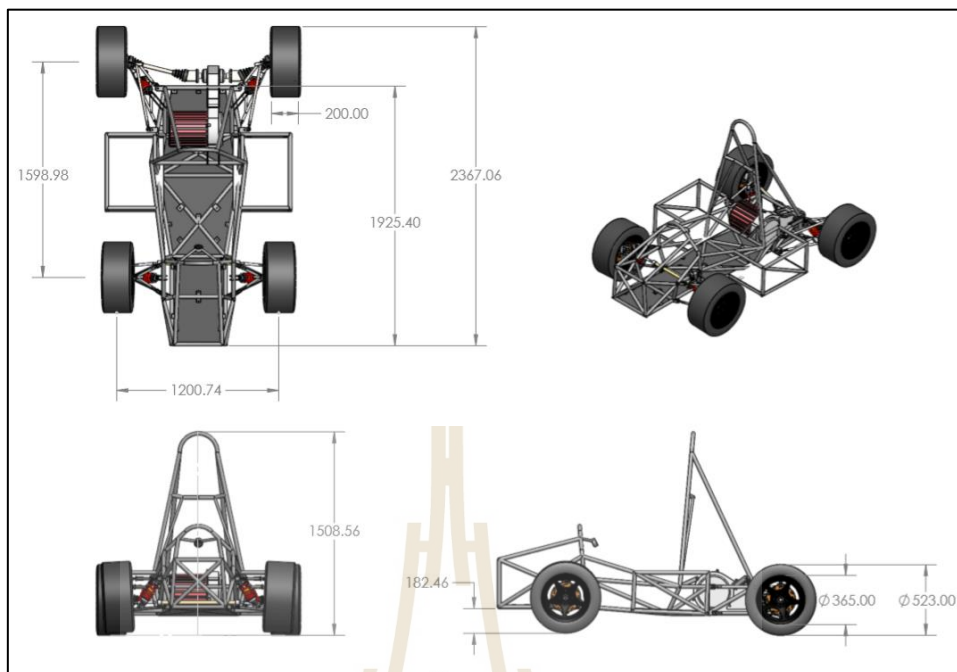
#### 符号/Symbol

- 刚性接头/Rigid Joint
- = 膨胀接头/Expansion Joint
- 绝缘体/Insulators
- ⊗ 带有定位夹的绝缘体  
Insulators with Positioning clamp

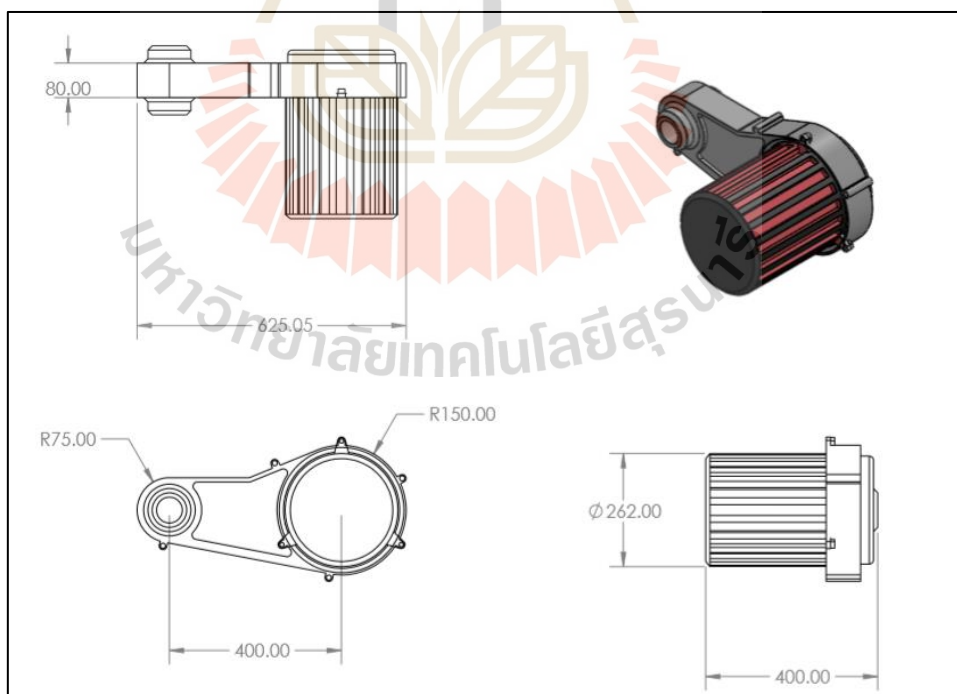


ภาคผนวก ค

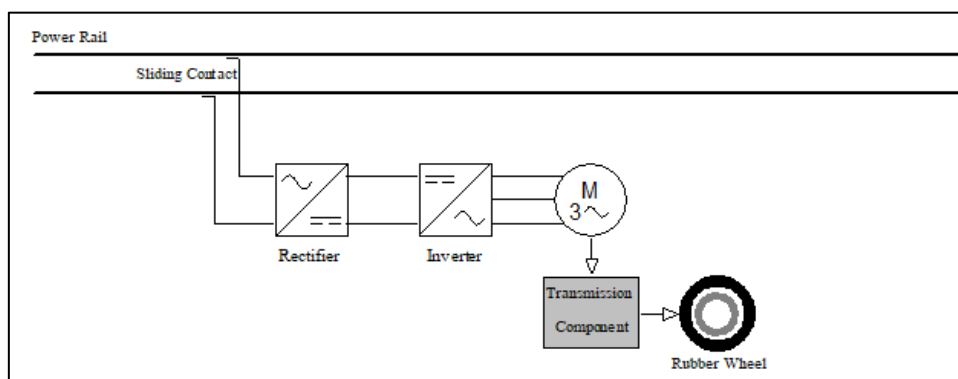
แบบโครงสร้างและระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าของรถไฟฟ้า



รูปที่ ค.1 มิติของรถไฟฟ้าล้อยาง



รูปที่ ค.2 มิติของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า



รูปที่ ค.3 แผนภาพระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเอพีเอ็ม

ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่นำเสนอในรูปที่ ค.3 ประกอบไปด้วย ตัวสัมผัสเคลื่อนที่ ชุดวงจรเรียงกระแส ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ และมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส การทำงานของระบบ โดยจะรับกระแสไฟฟ้าจากตัวสัมผัสเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงป้อนให้กับชุดวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายสามเฟสป้อนให้กับมอเตอร์ขับเคลื่อนต่อไป

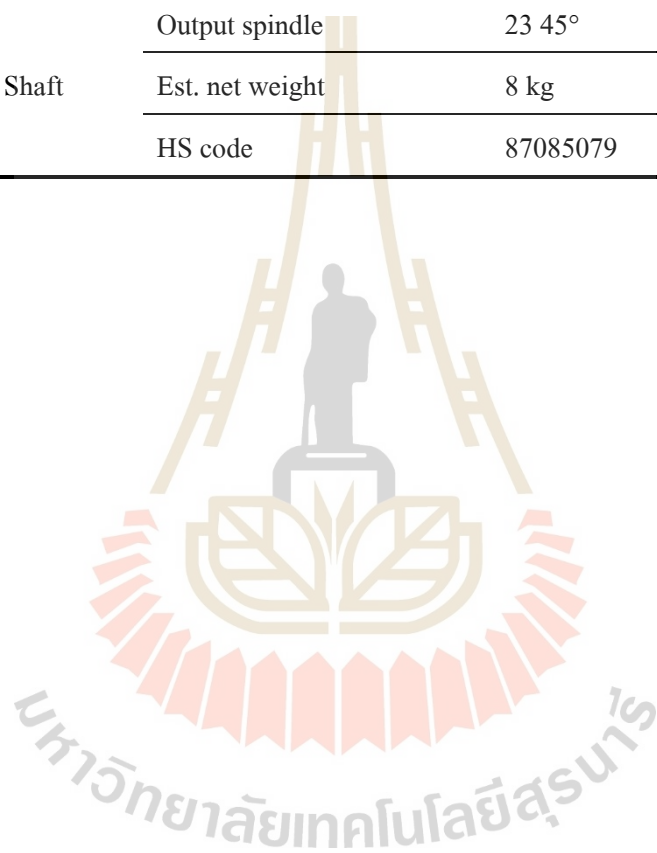


ตารางที่ ค.1 ข้อมูลทางเทคนิคระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า

Item	Specification	
Motor	Rated power	15 kW
	DC voltage	108 V
	Rated frequency	89 Hz
	Rated speed	2200 RPM
	Max. speed	6500 RPM
	Speed sensor	60 Pulse signals
	Protection grade	IP55
	Insulation grade	H
	Max. torque	150 N.m
	Size	Φ262* 290 mm
	Net weight	45 kg
	HS code	85015200
	Inverter	Rated voltage
Voltage range		65%~135%
Rated output current		60A~110A
Maximum output current		500A
Digital input		8
Analog input		2
Protection grade		IP65
Ambient temperature		-40 °C~50 °C
Control mode		Vector control
Communication mode		/
Size (L*W*H) mm		328*253*113
Net weight		7 kg
HS code		85371090

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลทางเทคนิคระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า (ต่อ)

Item	Specification	
Gearbox	Ratio	6:1
	Speed capacity	8000 RPM
	Torque capacity	400 N.m
	Noise	≤ 65 dB
	HS code	87085079
Driving Shaft	Output spindle	23 45°
	Est. net weight	8 kg
	HS code	87085079





ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟฟ้า

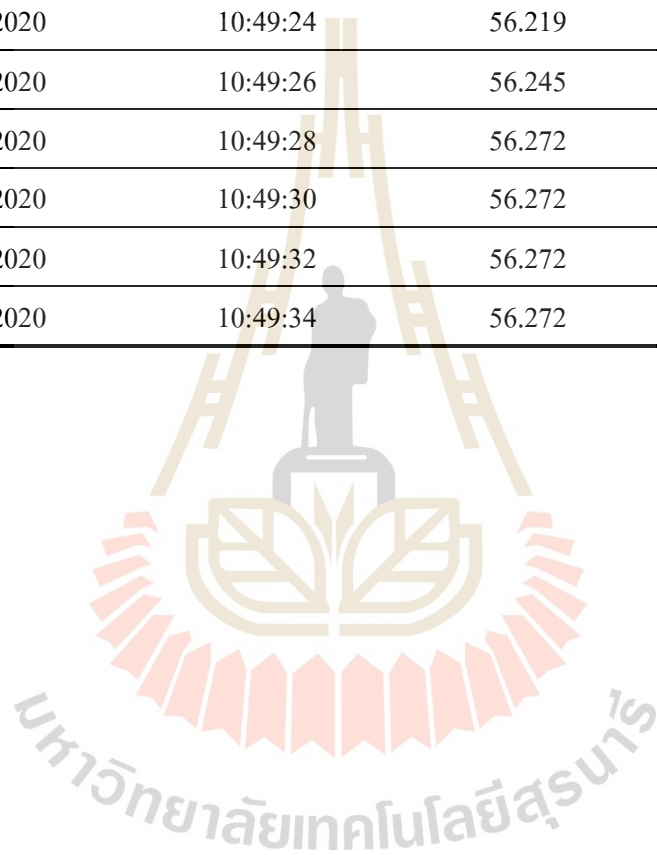
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.1 ผลของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ขณะเคลื่อนที่จากต้นทางไปยังปลายทาง

Date	Time	Voltage (V)	Current (A)
19/07/2020	10:48:20	56.219	0.041
19/07/2020	10:48:22	56.219	0.041
19/07/2020	10:48:24	56.219	0.041
19/07/2020	10:48:26	56.219	0.041
19/07/2020	10:48:28	56.193	1.377
19/07/2020	10:48:30	56.193	0.014
19/07/2020	10:48:32	56.219	0
19/07/2020	10:48:34	56.193	0
19/07/2020	10:48:36	56.219	6.014
19/07/2020	10:48:38	55.749	15.723
19/07/2020	10:48:40	54.991	30.232
19/07/2020	10:48:42	53.841	59.441
19/07/2020	10:48:44	53.423	68.7
19/07/2020	10:48:46	53.135	69.259
19/07/2020	10:48:48	52.822	94.377
19/07/2020	10:48:50	53.109	96.927
19/07/2020	10:48:52	51.358	117.81
19/07/2020	10:48:54	52.011	102.52
19/07/2020	10:48:56	54.155	84.832
19/07/2020	10:48:58	51.515	119.8
19/07/2020	10:49:00	52.952	74.468
19/07/2020	10:49:02	53.632	62.795
19/07/2020	10:49:04	51.567	118.87
19/07/2020	10:49:06	51.149	64.35
19/07/2020	10:49:08	50.208	100.95
19/07/2020	10:49:10	49.79	72.805
19/07/2020	10:49:12	49.267	119.51

ตารางที่ ง.1 ผลของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ขณะเคลื่อนที่จากต้นทางไปยังปลายทาง (ต่อ)

Date	Time	Voltage (V)	Current (A)
19/07/2020	10:49:14	52.56	112.62
19/07/2020	10:49:16	55.618	49.936
19/07/2020	10:49:18	55.775	4.841
19/07/2020	10:49:20	56.245	3.614
19/07/2020	10:49:22	56.219	0
19/07/2020	10:49:24	56.219	0
19/07/2020	10:49:26	56.245	0.014
19/07/2020	10:49:28	56.272	0
19/07/2020	10:49:30	56.272	0.014
19/07/2020	10:49:32	56.272	0
19/07/2020	10:49:34	56.272	0.014



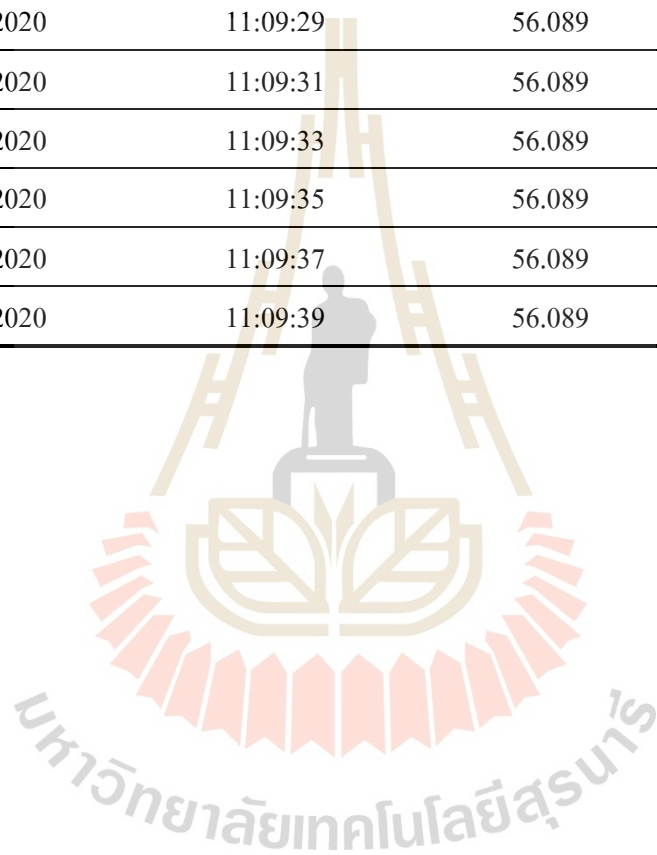
ตารางที่ ง.2 ผลของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ขณะเคลื่อนที่จากปลายทางไปยังต้นทาง

Date	Time	Voltage (V)	Current (A)
19/07/2020	11:08:25	56.089	0.014
19/07/2020	11:08:27	56.089	0.014
19/07/2020	11:08:29	56.089	0.014
19/07/2020	11:08:31	56.089	0.014
19/07/2020	11:08:33	56.115	0.232
19/07/2020	11:08:35	56.089	0.041
19/07/2020	11:08:37	56.089	0
19/07/2020	11:08:39	56.089	0.014
19/07/2020	11:08:41	56.089	0
19/07/2020	11:08:43	56.089	0
19/07/2020	11:08:45	56.089	10.323
19/07/2020	11:08:47	54.285	31.65
19/07/2020	11:08:49	50.757	43.718
19/07/2020	11:08:51	49.79	56.659
19/07/2020	11:08:53	48.169	114.464
19/07/2020	11:08:55	45.713	124.05
19/07/2020	11:08:57	50.365	118.895
19/07/2020	11:08:59	46.627	112.323
19/07/2020	11:09:01	51.28	116.073
19/07/2020	11:09:03	52.978	112.718
19/07/2020	11:09:05	48.797	122.727
19/07/2020	11:09:07	52.194	106.377
19/07/2020	11:09:09	54.155	94.091
19/07/2020	11:09:11	52.848	77.905
19/07/2020	11:09:13	54.181	95.345
19/07/2020	11:09:15	53.031	89.986
19/07/2020	11:09:17	53.449	77.986



ตารางที่ ง.2 ผลของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ขณะเคลื่อนที่จากปลายทางไปยังต้นทาง (ต่อ)

Date	Time	Voltage (V)	Current (A)
19/07/2020	11:09:19	54.573	82.977
19/07/2020	11:09:21	53.37	66.914
19/07/2020	11:09:23	55.67	38.959
19/07/2020	11:09:25	55.775	5.005
19/07/2020	11:09:27	56.063	3.791
19/07/2020	11:09:29	56.089	0.014
19/07/2020	11:09:31	56.089	0.095
19/07/2020	11:09:33	56.089	0
19/07/2020	11:09:35	56.089	0
19/07/2020	11:09:37	56.089	0.014
19/07/2020	11:09:39	56.089	0

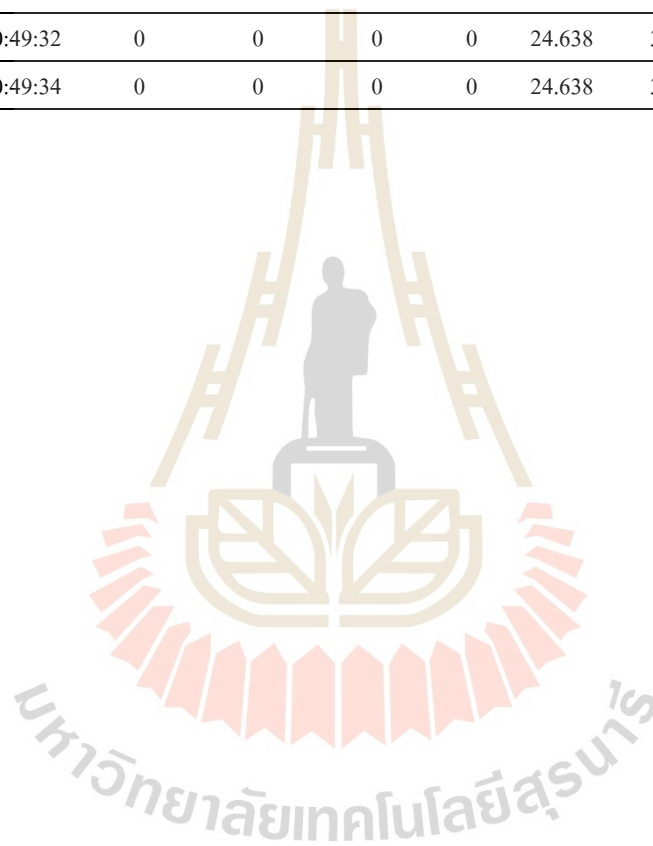


ตารางที่ ง.3 ผลของกำลังไฟฟ้า ขณะเคลื่อนที่จากต้นทางไปยังปลายทาง

Date	Time	Active Power	Apparent Power	Reactive Power	Power Factor	Active Energy	Reactive Energy	THD V	THD I
19/07/2020	10:48:20	0	3.136	0	0	0	0	0.8	99.9
19/07/2020	10:48:22	0	3.136	0	0	0	0	0.8	99.9
19/07/2020	10:48:24	0	3.136	0	0	0	0	0.8	99.9
19/07/2020	10:48:26	0	3.136	0	0	0	0	0.8	99.9
19/07/2020	10:48:28	0	3.136	0	0	0.002	0	1.1	99.9
19/07/2020	10:48:30	0	0	0	0	0.002	0	0.8	99.9
19/07/2020	10:48:32	0	0	0	0	0.002	0	0.8	99.9
19/07/2020	10:48:34	0	0	0	0	0.002	0	0.8	99.9
19/07/2020	10:48:36	228.955	335.591	43.91	0.682	0.023	0.004	4.2	99.9
19/07/2020	10:48:38	639.818	865.636	116.0	0.739	0.246	0.047	9.1	99.9
19/07/2020	10:48:40	1260.818	1630.909	238.4	0.789	0.779	0.149	14.5	82.7
19/07/2020	10:48:42	2396.182	3073.636	404.6	0.853	1.859	0.339	22.3	66.5
19/07/2020	10:48:44	2803.909	3484.500	448.5	0.868	2.941	0.529	25.5	66.7
19/07/2020	10:48:46	2907.409	3512.727	464.2	0.925	4.233	0.749	26	60.2
19/07/2020	10:48:48	3747.955	4538.318	486.1	0.908	5.786	0.986	33	59.4
19/07/2020	10:48:50	4140	4638.682	483	0.892	7.331	1.221	34.8	61.7
19/07/2020	10:48:52	4497.545	5334.955	470.5	0.907	9.282	1.449	38.8	53.8
19/07/2020	10:48:54	4362.682	4867.636	470.5	0.916	10.788	1.661	35.1	56.2
19/07/2020	10:48:56	3374.727	4002.000	467.3	0.898	12.295	1.896	33.3	67.3
19/07/2020	10:48:58	4613.591	5043.273	470.5	0.914	13.761	2.107	41.9	51.6
19/07/2020	10:49:00	3023.455	3537.818	454.8	1	14.856	2.3	32.2	61
19/07/2020	10:49:02	2722.364	3026.591	445.4	0.933	15.827	2.485	30.7	70.1
19/07/2020	10:49:04	4158.818	4764.136	464.2	0.941	17.233	2.697	43.4	55.6
19/07/2020	10:49:06	2659.636	3054.818	432.8	0.947	18.357	2.906	31.8	54.2
19/07/2020	10:49:08	3813.818	4149.409	423.4	0.919	19.912	3.107	42.2	44
19/07/2020	10:49:10	2850.955	3255.545	414	0.899	21.03	3.314	36.2	48.7
19/07/2020	10:49:12	3747.955	4287.409	407.7	0.91	22.562	3.494	45.2	45.3
19/07/2020	10:49:14	3653.864	4102.364	410.9	0.995	23.949	3.661	45.2	54.1
19/07/2020	10:49:16	2167.227	2402.455	401.5	0.902	24.526	3.781	30.4	99.9
19/07/2020	10:49:18	178.773	269.727	37.64	0.689	24.616	3.799	5.7	99.9

ตารางที่ ง.3 ผลของกำลังไฟฟ้า ขณะเคลื่อนที่จากต้นทางไปยังปลายทาง (ต่อ)

Date	Time	Active Power	Apparent Power	Reactive Power	Power Factor	Active Energy	Reactive Energy	THD V	THD I
19/07/2020	10:49:20	131.727	200.727	28.23	1	24.638	3.804	4.6	99.9
19/07/2020	10:49:22	0	0	0	0	24.638	3.804	0.8	99.9
19/07/2020	10:49:24	0	0	0	0	24.638	3.804	0.8	99.9
19/07/2020	10:49:26	0	0	0	0	24.638	3.804	0.8	99.9
19/07/2020	10:49:28	0	0	0	0	24.638	3.804	0.8	99.9
19/07/2020	10:49:30	0	0	0	0	24.638	3.804	0.8	99.9
19/07/2020	10:49:32	0	0	0	0	24.638	3.804	0.8	99.9
19/07/2020	10:49:34	0	0	0	0	24.638	3.804	0.8	99.9

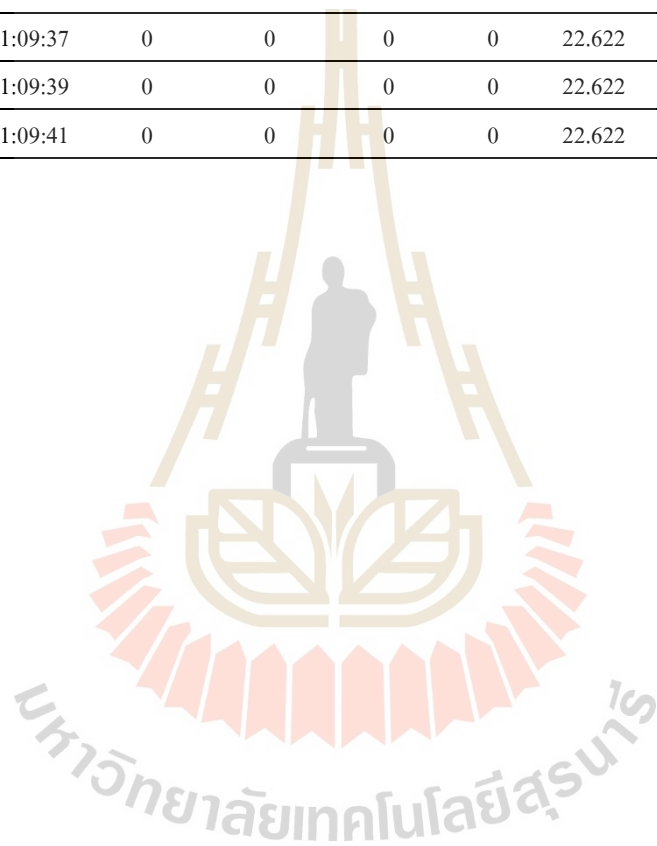


ตารางที่ ง.4 ผลของกำลังไฟฟ้า ขณะเคลื่อนที่จากปลายทางไปยังต้นทาง

Date	Time	Active Power	Apparent Power	Reactive Power	Power Factor	Active Energy	Reactive Energy	THD V	THD I
19/07/2020	11:08:25	0	0	0	0	0	0	0.9	99.9
19/07/2020	11:08:27	0	0	0	0	0	0	0.9	99.9
19/07/2020	11:08:29	0	0	0	0	0	0	0.9	99.9
19/07/2020	11:08:31	0	0	0	0	0	0	0.9	99.9
19/07/2020	11:08:33	0	12.545	3.136	0	0.001	0	1	99.9
19/07/2020	11:08:35	0	3.136	0	0	0.001	0	0.9	99.9
19/07/2020	11:08:37	0	0	0	0	0.001	0	0.9	99.9
19/07/2020	11:08:39	0	0	0	0	0.001	0	0.9	99.9
19/07/2020	11:08:41	0	0	0	0	0.001	0	0.8	99.9
19/07/2020	11:08:43	0	0	0	0	0.001	0	0.8	99.9
19/07/2020	11:08:45	417.136	561.409	97.227	0.757	0.137	0.031	10.5	99.9
19/07/2020	11:08:47	1395.682	1602.682	297.955	0.87	0.508	0.116	22.8	74.7
19/07/2020	11:08:49	1608.955	2123.318	341.864	0.845	1.316	0.29	25.8	52
19/07/2020	11:08:51	2255.045	2606.318	423.409	0.93	2.442	0.508	33.4	42.8
19/07/2020	11:08:53	3493.909	4014.545	420.273	0.887	3.912	0.697	50.6	39.1
19/07/2020	11:08:55	3729.136	4227.818	420.273	0.898	5.481	0.881	46.4	33.5
19/07/2020	11:08:57	3609.955	4190.182	401.455	0.915	7.087	1.062	46.4	44.6
19/07/2020	11:08:59	3641.318	4234.091	429.682	0.879	8.783	1.26	42.9	35.5
19/07/2020	11:09:01	3933.000	4362.682	370.091	0.926	10.237	1.43	43.6	49.7
19/07/2020	11:09:03	3907.909	4390.909	423.409	0.915	11.637	1.597	42.1	68.5
19/07/2020	11:09:05	4243.500	4688.864	420.273	0.908	13.268	1.804	42.2	38.1
19/07/2020	11:09:07	3998.864	4425.409	439.091	0.933	14.773	2.006	39.1	62
19/07/2020	11:09:09	3657.000	4168.227	423.409	0.922	15.773	2.17	37.7	75.1
19/07/2020	11:09:11	3092.455	3663.273	407.727	0.931	16.97	2.373	30.9	61.4
19/07/2020	11:09:13	3882.818	4306.227	439.091	0.948	17.975	2.538	37.2	72.8
19/07/2020	11:09:15	3980.045	4205.864	448.5	0.946	19.04	2.712	35.7	64.1
19/07/2020	11:09:17	3083.045	3779.318	451.636	0.94	20.228	2.911	30	70.7
19/07/2020	11:09:19	3490.773	4017.682	448.5	0.868	20.93	3.033	31	84.6
19/07/2020	11:09:21	2916.818	3359.045	435.955	0.945	22.081	3.223	27.1	65.6
19/07/2020	11:09:23	1608.955	2048.045	294.818	0.863	22.516	3.304	18.1	99.8

ตารางที่ ง.4 ผลของกำลังไฟฟ้า ขณะเคลื่อนที่จาปลายทางไปยังต้นทาง (ต่อ)

Date	Time	Active Power	Apparent Power	Reactive Power	Power Factor	Active Energy	Reactive Energy	THD V	THD I
19/07/2020	11:09:25	178.773	276	31.364	0.647	22.594	3.319	3.8	99.8
19/07/2020	11:09:27	131.727	210.136	28.227	1	22.622	3.325	3.1	99.9
19/07/2020	11:09:29	0	0	0	0	22.622	3.325	0.9	99.9
19/07/2020	11:09:31	0	6.273	0	0	22.622	3.325	1.2	99.9
19/07/2020	11:09:33	0	0	0	0	22.622	3.325	0.8	99.9
19/07/2020	11:09:35	0	0	0	0	22.622	3.325	0.8	99.9
19/07/2020	11:09:37	0	0	0	0	22.622	3.325	0.8	99.9
19/07/2020	11:09:39	0	0	0	0	22.622	3.325	0.8	99.9
19/07/2020	11:09:41	0	0	0	0	22.622	3.325	0.8	99.9





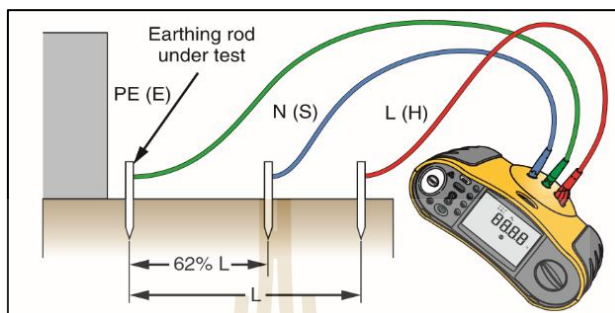
ภาคผนวก จ

ผลการวัดความต้านทานหลักดิน



### จ.1 การวัดความต้านทานของหลักดิน

การวัดความต้านทานหลักดินนำเสนอโดยวิธี 3 จุด (Three-Point or Fall of Potential Method) อาศัยเครื่องมือวัด FLUKE Model 1653B สามารถแสดงวิธีการวัดได้ดังรูปที่ จ.1




รูปที่ จ.1 การวัดความต้านทานดินของแท่งหลักดิน (ที่มา: Fluke Corporation, 2010)

จากรูปที่ จ.1 แสดงการวัดความต้านทานดินของแต่ละแท่งหลักดินโดยปักแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ทดสอบจากเครื่องมือวัดให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกับแท่งหลักดินที่จะทดสอบ ซึ่งกระแสไหลจากแท่ง E ผ่านลงดินไปยังจุดที่แท่งหลักดินปักอยู่ และจะมีแท่ง S ปักห่างจากแท่งหลักดินประมาณ 62% ของระยะห่างจากตำแหน่ง E ถึงตำแหน่ง H ค่าความต้านทานของหลักดินและดินที่ระยะดังกล่าวจะมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง สามารถทดสอบได้โดยเลื่อนแท่ง S ไปที่ตำแหน่ง 52 % และ 72 % แล้วค่าความต้านทานดินของแท่งหลักดินที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงจากตำแหน่ง 62 % ไม่เกิน 5 % ของความต้านทานดินของแท่งหลักดินถือว่าค่านั้นเหมาะสม (ประสิทธิ์ และคณะ, 2560) โดยมีเส้นทางการวัดความต้านทานหลักดิน ดังรูปที่ จ.2 รายละเอียดผลการวัดค่าความต้านทานของหลักดิน แสดงได้ดังนี้




รูปที่ จ.2 เส้นทางการวัดความต้านทานหลักดิน


ตารางที่ จ.1 ผลการวัดค่าความต้านทานหลักดิน เดือนตุลาคม 2562

<b>Earth Resistance Testing</b>						
	<b>Checking No.</b>	ERT-001	<b>Date.</b>	Oct 14, 2019	<b>Time.</b>	16.45
	<b>Project Name</b>	Design of Power Supply System for APM				
	<b>System Name</b>	Suranaree University of Technology Hospital				
<b>1. Environment Checking</b>						
<b>Weather</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Dry	<input type="checkbox"/> Wet	<input type="checkbox"/> Rain	Temperature	33 °	
<b>Soil Condition</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Dry	<input type="checkbox"/> Damp	<input type="checkbox"/> Wet			
<b>Day since last rainfall</b>	<input type="checkbox"/> Same day	<input checked="" type="checkbox"/> 1-5 days				
	<input type="checkbox"/> 5-9 days	<input type="checkbox"/> More than 20 days				
<b>2. Data of Earth Resistance Measurement</b>						
<b>Point (%)</b>	<b>E - H (m)</b>	<b>E - S (m)</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>			
1	20	0.2	1.5			
10	20	2	1.2			
20	20	4	1.5			
30	20	6	1.7			
40	20	8	1.8			
50	20	10	1.9			
60	20	12	2			
62	20	12.4	2.0			
70	20	14	2.1			
72	20	14.4	2.0			
80	20	16	2.3			
90	20	18	2.8			
99	20	19.8	4.8			


ตารางที่ จ.2 ผลการวัดค่าความต้านทานหลักดิน เดือนพฤศจิกายน 2562

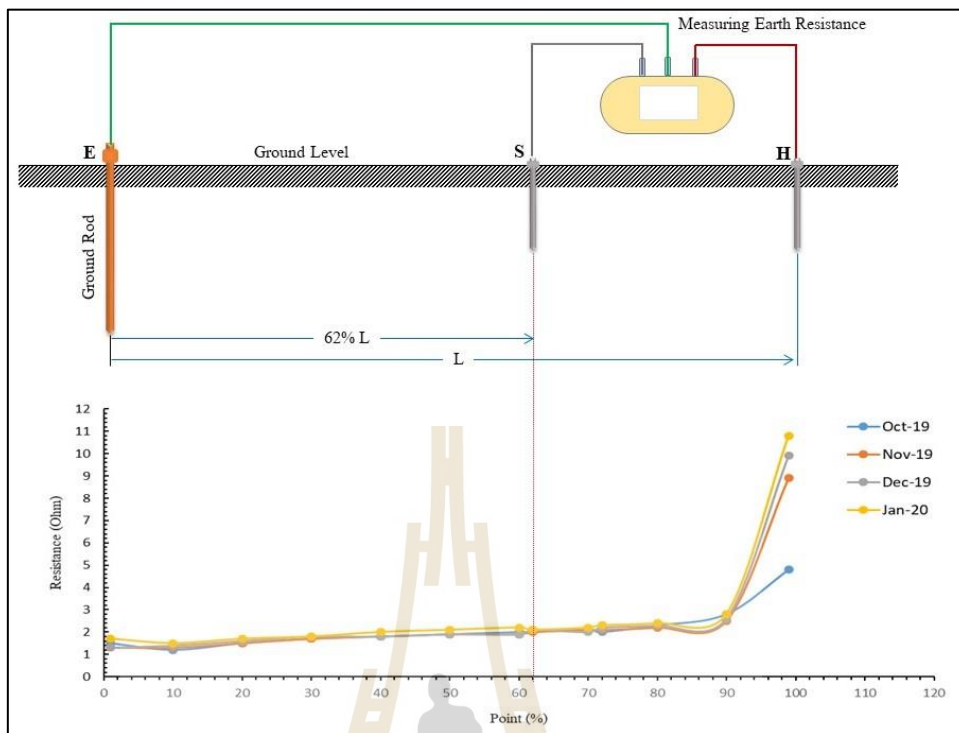
<b>Earth Resistance Testing</b>						
	<b>Checking No.</b>	ERT-001	<b>Date.</b>	Nov 27, 2019	<b>Time.</b>	17.13
	<b>Project Name</b>	Design of Power Supply System for APM				
	<b>System Name</b>	Suranaree University of Technology Hospital				
<b>1. Environment Checking</b>						
<b>Weather</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Dry	<input type="checkbox"/> Wet	<input type="checkbox"/> Rain	Temperature	33 °	
<b>Soil Condition</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Dry	<input type="checkbox"/> Damp	<input type="checkbox"/> Wet			
<b>Day since last rainfall</b>	<input type="checkbox"/> Same day	<input type="checkbox"/> 1-5 days				
	<input type="checkbox"/> 5-9 days	<input checked="" type="checkbox"/> More than 20 days				
<b>2. Data of Earth Resistance Measurement</b>						
<b>Point (%)</b>	<b>E - H (m)</b>	<b>E - S (m)</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>			
1	20	0.2	1.3			
10	20	2	1.3			
20	20	4	1.5			
30	20	6	1.7			
40	20	8	1.8			
50	20	10	1.9			
60	20	12	1.9			
62	20	12.4	2.0			
70	20	14	2.1			
72	20	14.4	2.1			
80	20	16	2.2			
90	20	18	2.5			
99	20	19.8	8.9			

ตารางที่ จ.3 ผลการวัดค่าความต้านทานหลักดิน เดือนธันวาคม 2562

<b>Earth Resistance Testing</b>						
	<b>Checking No.</b>	ERT-001	<b>Date.</b>	Dec 19, 2019	<b>Time.</b>	15.15
	<b>Project Name</b>	Design of Power Supply System for APM				
	<b>System Name</b>	Suranaree University of Technology Hospital				
<b>1. Environment Checking</b>						
<b>Weather</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Dry	<input type="checkbox"/> Wet	<input type="checkbox"/> Rain	Temperature	34 °	
<b>Soil Condition</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Dry	<input type="checkbox"/> Damp	<input type="checkbox"/> Wet			
<b>Day since last rainfall</b>	<input type="checkbox"/> Same day	<input type="checkbox"/> 1-5 days				
	<input type="checkbox"/> 5-9 days	<input checked="" type="checkbox"/> More than 20 days				
<b>2. Data of Earth Resistance Measurement</b>						
<b>Point (%)</b>	<b>E - H (m)</b>	<b>E - S (m)</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>			
1	20	0.2	1.3			
10	20	2	1.4			
20	20	4	1.6			
30	20	6	1.8			
40	20	8	1.8			
50	20	10	1.9			
60	20	12	1.9			
62	20	12.4	2.1			
70	20	14	2.0			
72	20	14.4	2.2			
80	20	16	2.3			
90	20	18	2.6			
99	20	19.8	9.9			

ตารางที่ จ.4 ผลการวัดค่าความต้านทานหลักดิน เดือนมกราคม 2563

<b>Earth Resistance Testing</b>						
	<b>Checking No.</b>	ERT-001	<b>Date.</b>	Jan 22, 2020	<b>Time.</b>	16.45
	<b>Project Name</b>	Design of Power Supply System for APM				
	<b>System Name</b>	Suranaree University of Technology Hospital				
<b>1. Environment Checking</b>						
<b>Weather</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Dry	<input type="checkbox"/> Wet	<input type="checkbox"/> Rain	Temperature	34 °	
<b>Soil Condition</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Dry	<input type="checkbox"/> Damp	<input type="checkbox"/> Wet			
<b>Day since last rainfall</b>	<input type="checkbox"/> Same day	<input type="checkbox"/> 1-5 days				
	<input type="checkbox"/> 5-9 days	<input checked="" type="checkbox"/> More than 20 days				
<b>2. Data of Earth Resistance Measurement</b>						
<b>Point (%)</b>	<b>E - H (m)</b>	<b>E - S (m)</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>			
1	20	0.2	1.7			
10	20	2	1.5			
20	20	4	1.7			
30	20	6	1.8			
40	20	8	2.0			
50	20	10	2.1			
60	20	12	2.2			
62	20	12.4	2.1			
70	20	14	2.2			
72	20	14.4	2.3			
80	20	16	2.4			
90	20	18	2.8			
99	20	19.8	10.8			



รูปที่ จ.3 เปรียบเทียบการวัดค่าความต้านทานหลักดินแต่ละเดือน



ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

### Conferences papers

Jeerapong Srivichai, and Thanatchai Kulworawanichpong, (2017). “Simulation of Traction Motor Using MATLAB/Simulink”. The 4<sup>th</sup> Thailand Rail Academic Symposium, August 31 - September 1, 2017. Kensington English Garden Resort KhaoYai , Nakhon Ratchasima, Thailand. : 1 - 5 P.

Jeerapong Srivichai, and Thanatchai Kulworawanichpong, (2018). “Modeling and Simulation of Traction Motor Drive with Different PWM Techniques”. The Papers of Technical Meeting on Transportation and Electric Railway, IEE Japan, January 31, 2018 Viphavadee Center, TST Tower, 21<sup>st</sup> floor, Viphawadee Rangsit Rd, Chom Phom, Chatuchak, Bangkok, Thailand. : 17 - 22 P.

J. Srivichai, and T. Kulworawanichpong, (2019). “Simulation Study of Conductor-Rail-Fed Power Supply for APM System”. IEEJ PES - IEEE PES Thailand Joint Symposium, March 18, 2019. Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. : 65 - 70 P.

### Journals

Jeerapong Srivichai, Tosaphol Ratniyomchai, and Thanatchai Kulworawanichpong, (2018). “APM Traction Power Supply Study”. International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering (IJIEEE), Vol.6, Issue 6, Jun. 2018. : 18 - 22 P.

J. Srivichai, T. Ratniyomchai, and T. Kulworawanichpong, (2021). “Modelling and Analysis of Voltage Distribution for Automated People Mover System in a Case Study of Suranaree University Technology Hospital Shuttle Service”. GMSARN International Journal Vol.15, No.1. March 2021. : 12 - 20 P.



## Modelling and Analysis of Voltage Distribution for Automated People Mover System in a Case Study of Suranaree University Technology Hospital Shuttle Service

J. Srivichai, T. Ratniyomchai, and T. Kulworawanichpong\*

**Abstract**— The power transmission to the automated people mover (APM) system under the limited voltage and the security conditions of the electric power supply system is seriously a sensitive problem of the power quality. Therefore, the performance analysis of the electric power supply system is important in the design and operation of the APM system, that the power load is usually dynamic. One of the main problems in the power supply station is the voltage drop due to the variation of the APM load according to the position of APM movement. This paper presents a modelling and analysis of the voltage distribution for the APM system. The model of the APM system for simulation is developed on the MATLAB/SIMULINK and the voltage regulation is evaluated by considering the percentage of voltage regulation between the traction substation and the APM vehicle. The results of this analysis, including the voltage regulation and energy loss for both 240 and 480 Vac systems, will be used as an evaluation guideline for the design and construction of the prototype APM system which is the shuttle services in the Suranaree University of Technology (SUT) Hospital as a case study.

**Keywords**— Automated people mover, traction power supply, voltage drop.

### 1. INTRODUCTION

The APM systems are fully automated and driverless transit systems that operate on a fixed guideway in exclusive rights of way. APMs can include technologies called automated guideway transit (AGT). Typically, the APM uses wheel-on-rail/route systems and propulsion may involve conventional on-board electric motors, linear motors or cable traction. The system is controlled or monitored by operators from a remote central control facility. APM applications may partake names such as downtown people movers, airport APM, or automated trams depending on the operating environments [1].

The APM system consists of six components to support of the operated the passenger shuttle service system as follows [2]-[4]:

i. *The vehicle*: The APM system typically has a length of 10-12 m and a width of 3 m and capacity 50-80 passengers per train, which has a rubber wheel movement. It is a model that uses rubber wheels together with concrete running tracks, resulting in a cheap price and without noise, so it is often used in urban areas.

ii. *The guideway*: The guideway of the APM system is to supported running surface and controlling the direction of the APM vehicle to increase safety and efficiency in passenger transportation. The APM runway will consist of i) concrete runway for supporting the

wheels of the vehicle, power distribution rail and direction rail or guide rail. There are two commonly used APM systems, classified by type of runway as follows:

i) central guide rail is a system that installs guide rail and power supply in the middle of the runway the width of the runway is about 3.2 m [5].

ii) side guide rail is a system to install guide rail and power supply rail on the runway the width of 1.85 m of wheels and when combined with the guide rail and electric rail installed on the side of the runway will have a width of 3.2 m [6].

iii. *The system power and propulsion*: The APM system receives electric power from the traction substations. Located along the path of the running track. The power distribution depends on the type of the APM driven. Self-propelled APM vehicle are electrically powered by onboard motors using either 750 or 1500 VDC or 480 or 600 VAC, distributed along the guideway by away side, rail-based power distribution subsystem. The primary electric system of the power supply system for the APM system generally depends on the selected system design on possibly both DC and AC systems [7]-[13].

iv. *The control systems*: All APM systems include command, control, and communications equipment needed to operate the driverless vehicles.

v. *The stations*: The stations are located along the APM 's running path. So that passengers can use the service comfortably. The station will be equipped with facilities such as automatic doors. Various information signs etc. for the convenience and safety of passengers. In addition, the station also has tools and equipment to support the APM system to work efficiently.

vi. *The maintenance and storage facility (MSF)*: Items housed in the MSF include maintenance equipment, tool, machinery, recovery vehicle, equipment for train control and within the MSF, and any other equipment/systems

J. Srivichai is with the School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

T. Ratniyomchai is with the School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

T. Kulworawanichpong is with the School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

\*Corresponding author: T. Kulworawanichpong; Phone: +66-88583-7207; E-mail: [thanatchai@gmail.com](mailto:thanatchai@gmail.com).

associated with maintaining the APM vehicle.

Considering the research articles related to simulation for the APM system, the article [14] developed a sophisticated APM simulation model using the specialized simulation software EXTENDS. Their simulator, APMSIM, was capable of modeling passenger/vehicle movement, system performance, and energy consumption based on a number of input blocks. The simulation successfully allowed them to model energy consumption, waiting time, queues at stations, and many other variables of interest.

Regarding the prototype APM system in Thailand, the preliminary study and design of the characteristics of the electric drive system, shuttle route, and power supply system are to be carried out. Therefore, this paper studied and created the model of the vehicle movement, power supply through the conductor rail, and the power flow calculation of the APM system simulated in MATLAB/SIMULINK.

This paper is divided into six sections. Section one is an introduction. Section one is an introduction. Section two explains a basic calculation of the voltage regulation in an electric power system. Section three presents the traction performance calculation of the vehicle movement. Section four describes the model of the APM system, the programming sequence and algorithm for simulation using the proposed model. Simulation results addressing the test system and graphical illustration and conclusions are shown in section five and six, respectively.

## 2. VOLTAGE REGULATION

Regarding the electric power transmission system, the different voltage between the power supply and load terminals is the voltage drop on the power transmission line due to its parameters of resistance and inductance. This means that the receiving end voltage ( $V_r$ ) of the line is generally less than the sending end voltage ( $V_s$ ). The voltage drops ( $V_s - V_r$ ) in the line is expressed as a percentage of the receiving end voltage  $V_r$ , called the voltage regulation as follows [15]:

$$\% \text{ voltage regulation} = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100 \quad (1)$$

The voltage regulation can be defined as the proportional change in voltage magnitude at the load bus due to the load variation. The voltage drop is caused due to feeder impedance carrying the load current as illustrated in Fig. 1(a). If the supply voltage is represented by Thevenin's equivalent, then the voltage regulation ( $VR$ ) is given by,

$$VR = \frac{|\bar{E} - \bar{V}|}{|\bar{V}|} \quad (2)$$

where  $\bar{V}$  is a phasor of the load voltage and  $\bar{E}$  is a phasor of the power supply voltage. In Fig. 1(a), the source and load currents are equal and voltage drop due

to the feeder is given by,

$$\Delta \bar{V} = \bar{E} - \bar{V} = Z_s \bar{I}_l \quad (3)$$

The feeder impedance,  $Z_s = R_s + jX_s$ . The relationship between the load apparent powers and its voltage and current is expressed below:

$$\bar{S}_l = \bar{V} \bar{I}_l^* = P_l + jQ_l \quad (4)$$

The load current is expressed as following

$$I_l = \frac{P_l - jQ_l}{V} \quad (5)$$

Substituting  $I_l$  from equation 5 in equation 3

$$\Delta \bar{V} = \bar{E} - \bar{V} = (R_s + jX_s) \left( \frac{P_l - jQ_l}{V} \right) \quad (6)$$

$$\Delta \bar{V} = \frac{R_s P_l + X_s Q_l}{V} + j \frac{X_s P_l - R_s Q_l}{V} \quad (7)$$

$$\Delta \bar{V} = \Delta V_R + j \Delta V_X \quad (8)$$

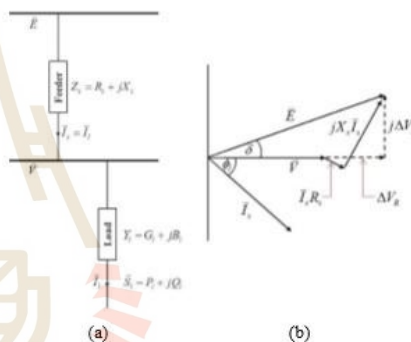


Fig. 1. (a) Single phase system with feeder impedance, (b) Phasor diagram.

Thus, the voltage drop across the feeder has two components, including phase  $\Delta V_R$  and phase quadrature  $\Delta V_X$  with the voltage  $V$  as illustrated in Fig. 1(a). The load bus voltage  $\bar{V}$  depends on the feeder impedance, magnitude and phase angle of the load current. In other words, voltage change ( $\Delta V_X$ ) depends on the real and reactive power flows of the load and the feeder impedance. This situation is shown by the phasor diagram in Fig. 1(b).

## 3. TRACTION PERFORMANCE CALCULATION

### Equations of movement

Vehicle movement is simply governed by the Newton's second law of motion as shown in equation 9 namely; the forces related are the tractive force, the gradient



force/gravitational force and the resistance forces. On the top of that, the resistance forces are subdivided into two forces consisting of the rolling resistance force and the aerodynamic drag force as in equation 10 [16]. Fig. 2 demonstrates the free body diagram of the vehicle moving upwards on the slope including the mentioned forces exerting on it

$$F_{TE} - F_R - F_G = M_{eff} a \tag{9}$$

$$F_R = F_{rr} + F_{drag} \tag{10}$$

where  $F_{TE}$  denotes the tractive effort (N),  $F_R$  denotes the resistance force (N),  $F_G$  denotes the gradient force (N),  $F_{rr}$  denotes the rolling resistance force (N),  $F_{drag}$  denotes the aerodynamic drag force (N),  $a$  denotes the vehicle acceleration ( $m/s^2$ ),  $M_{eff}$  denotes the effective mass which is equal to  $M_i(1 + \lambda_w) + M_p$  where  $M_i$  denotes the tare mass (kg),  $\lambda_w$  denotes the rotary allowance,  $M_p$  denotes the passenger load (N), and  $a$  denotes the acceleration rate ( $m/s^2$ ).

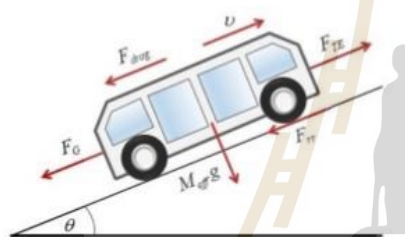


Fig. 2. Free body diagram of the vehicle movement.

In addition to rolling frictional resistance and aerodynamic drag force, the basic resistance of the vehicle is also affected by the friction of the bearing, the relative sliding of the rubber wheel and the cement pavement, the impact and vibration of the rubber wheel and the road surface. Therefore, the Davis's equation is often used in engineering to estimate the resistance force [14].

$$\begin{aligned} T_{rd} &= \frac{F_{rr} + F_{drag}}{M_{eff} g} \\ &= 5 \times 10^{-4} K_0 + 4.4480 \frac{K_1}{w \times 10^{-3}} \\ &\quad + 1.1187 \times 10^{-4} B(v) + 239.6904 \frac{CA(v^3)}{wn \times 10^{-1}} \end{aligned} \tag{11}$$

where  $T_{rd}$  is the total resistance force (N/N),  $w$  is vehicle axle weight (kg),  $A$  is the projected frontal area of the vehicle ( $m^2$ ),  $B$  is empirical coefficient related to guideway conditions,  $C$  is drag coefficient,  $n$  is number of axle, and  $v$  is the speed of the air relative to the vehicle body ( $m/s$ ).

$K_0$  and  $K_1$  are constant coefficients, which are adopted by 1.3 and 29, respectively.

Gravity is another factor that has been considered separately. As a result of the mass of the vehicle moving on the runway that is inclined at an angle to the running surface. There may be directions to support the movement or to resist movement. The mathematical representation of the gradient force is expressed as follows:

$$F_G = M_{eff} g \sin \theta \tag{12}$$

where  $g$  is gravitational constant ( $9.81 m/s^2$ ), and  $\theta$  is the angle of the slope (in degree).

**Power consumed by a vehicle**

The power consumed by a vehicle corresponding to tractive effort  $F_{TE}$ , instantaneous speed  $v$ , and auxiliary power  $P_{aux}$  (such as air-conditioning load and on-board power service, etc.) is given by the following expression [16].

$$P_e = \frac{F_{TE} \times v}{\eta_t} + P_{aux} \tag{13}$$

Where,  $\eta_t$  is the efficiency of conversion of electrical input power to the mechanical output at the wheels.

**Speed and position up date**

Once the vehicle acceleration is obtained, speed and position of the vehicle is calculated by the following equations,

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a\Delta t \tag{14}$$

$$s(t + \Delta t) = s(t) + v(t)\Delta t + \frac{1}{2} a\Delta t^2 \tag{15}$$

where  $v(t + \Delta t)$  and  $v(t)$  are the terminal and initial speed,  $\Delta t$  is the time step which is 0.1 sec in this paper,  $s(t + \Delta t)$  and  $s(t)$  are the position after and before updated.

**Summary of vehicle movement calculation**

According to the flowchart in Fig. 3, the vehicle movement calculation can be summarized as follows: i) determine the gradient force, vehicle resistance, etc. and then compute the vehicle acceleration in equation 9-12, ii) use the speed from the previous time update to evaluate the tractive effort and thus the power consumption in equation 13, and iii) update the APM speed and position in equation 14-15.

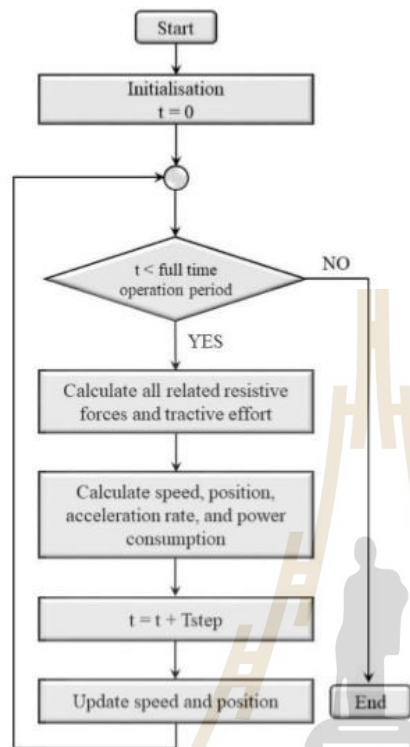


Fig. 3. The flowchart of the vehicle movement calculation.

4. MODELING AND SIMULATION PROCEDURE

In this topic, presents the AC power supply system for APM. The equivalent circuit of AC power supply systems is summarized shown in Fig. 4, the substation is modeled by Norton's equivalent source [16] in which  $I_{zs}$  and  $Z_{zs}$  represent the Norton's short-circuit current and Norton's resistances, respectively; the voltage drop calculation is represented as follows:

$$V_{rail} = V_c - V_r = I_{zs} Z_{zs} - [Z_{zs} + d(Z_c + Z_r)] I_{rail} \quad (16)$$

where  $Z_c$  and  $Z_r$  are the per-unit impedance of the conductor rail ( $\Omega/m$ ) for the supply rail and current-return rail, respectively,  $d$  is the distance of the vehicle from the substation ( $m$ ),  $L$  is the length of the conductor rail ( $m$ ), and  $I_{rail}$  is the current which return to the substation through the conductor rail ( $A$ ).

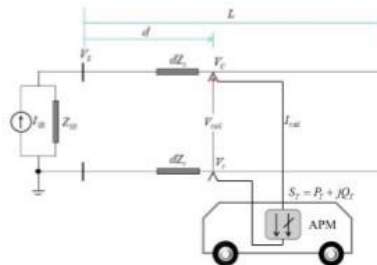


Fig. 4. Equivalent circuit of an AC power supply system.

In normal traction mode, the equivalent circuit of the APM is shown in Fig. 4. The substation energy consumption is computed by integrating all substation instantaneous power over the APM operation time, as shown in equation 17.

$$E_{sub} = \int_0^T V_s I_{zs} dt \quad (17)$$

where  $E_{sub}$  is the substation energy consumption ( $kWh$ ),  $T$  is the total time of the APM operation ( $sec$ ),  $V_s$  is the voltage of a substation ( $V$ ), and  $I_{zs}$  is the current of a substation ( $A$ ).

APM receive the electricity from current collector which connect with the conductor rail. The train power depends on the voltage and current at the current collector, which is solved by a load flow solver. Thus, the train energy can be computed by integrating APM instantaneous power over the time, as shown in equation 18.

$$E_{APM} = \int_0^T V_{rail} I_{rail} dt \quad (18)$$

where  $E_{APM}$  is the APM energy consumption at the current collector ( $kWh$ ),  $T$  is the total time of APM operation ( $sec$ ) including both travelling time and dwelling time,  $V_{rail}$  is the voltage of the transmission conductor ( $V$ ), and  $I_{rail}$  is the current of the transmission conductor ( $A$ ). Energy consumption of train is usually primarily measured or calculated at the pantograph level, the intake to the train. However, the energy needed at the train's pantograph causes energy losses in the power supply system. In order to estimate the energy being consumed in the APM system as a result of a specific APM operation, these losses should be added to the energy intake to the APM. The loss of the power supply system is dependent on the power load, which varies over time. In this study, however, we will estimate and consider the average losses in the system. If the utilized energy is  $E_{APM}$  at the current collector and the energy intake is  $E_{sub}$  the energy loss is represented as follows [17]:

$$E_{loss} = E_{sub} - E_{APM} \quad (19)$$

The relative loss  $e_{loss}$  is determined by

$$e_{loss} = \frac{E_{loss}}{E_{sub}} \quad (20)$$

The energy efficiency  $\eta_{loss}$  is then determined by

$$\eta_{loss} = \frac{E_{APM}}{E_{sub}} \quad (21)$$

or 
$$\eta_{loss} = 1 - e_{loss} \quad (22)$$

Also,  $e_{loss}$  may be determined by

$$e_{loss} = 1 - \eta_{loss} \quad (23)$$

**APM traction power supply modelling in MATLAB/SIMULINK**

The model of the traction transformer, conductor rail, and APM are modelled by using the built-in blocks in MATLAB/SIMULINK. The configuration of The APM power supply system is briefly mentioned. Lastly, the evaluation of the voltage regulation at the traction substation and APM with different scenarios of the APM operations is discussed as follows:

ii) transformer, iii) conductor rail system, and iv) APM as shown in Fig. 5. The 22 kV AC transmission system as the traction substation is represented by the three-phase source built-in block. The transformer will step down the voltage from 22 kV to 240 V using the linear transformer built-in block. The conductor rail has the impedances obtained from the datasheet [18] modelling by the series RLC branch built-in block. Lastly, the APM is modelled as a series RLC load.

The APM system is modelled for the simulation in this paper. The APM was the first vehicle operated with conductor rail contact system to commence operations in Thailand. The APM is composed of two passenger stations and one traction substation as shown in Fig. 6. Parameters setting for this simulation can be found in the Appendix.



Fig. 5. The power feeding components models in MATLAB/SIMULINK.

The AC traction power supply modelling is developed in the block models in MATLAB/SIMULINK. The model consists of 4 main parts: i) AC traction substation,



Fig. 6. SUT Hospital shuttle service [19].

The AC traction substation of the APM draws the electrical energy with the voltage level of 22 kV from the provincial electricity authority (PEA). The traction substation transformer with an alternate phase connection steps down the grid voltage into the APM's nominal voltage of 240 V. The total shuttle service distance is 200 m.

**Simulator Structure**

The operating diagram is shown in Fig. 7. The simulator has two major parts: the main program (script M-file) and the power network solver (SIMULINK). The main program performs the APM train movement and performance calculation. Then, the APM's positions and powers together with the distances recently mentioned are transferred into the SIMULINK block model to solve the voltage solution, consumed power and power losses etc. Finally, those values are returned to the main program to be stored and display the graphical illustration.



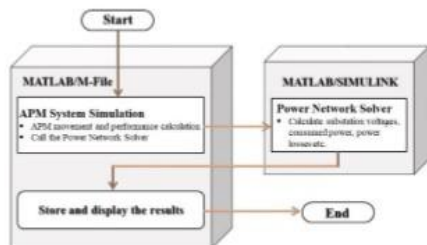


Fig. 7. Diagram of the simulation program.

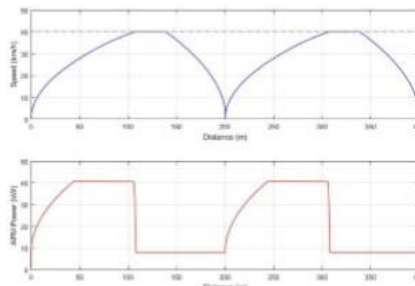


Fig. 10. The speed profile and power of the APM.

5. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

The simulation of the APM system is intended to observe the variation in voltage between measured point of the substation and the APM, as shown in Fig. 8. The results of the study are shown as follows:

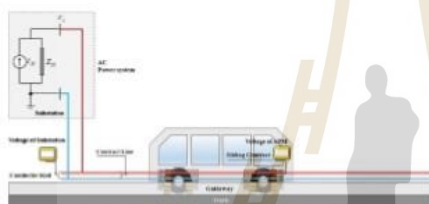


Fig. 8. The position of the voltage measurement point.

The APM speed control is governed by the proportional control that calculates the acceleration rate by the speed mismatch between the speed at the present time and command speed per time step, 0.1s in this paper. Only accelerating, constant speed, and braking modes of motion are considered. The gradient profile data is given and gradient force is also taken into account. The permissible maximum of the simulation time or the final time is 80.5 seconds for the round-trip. The expected results obtain the APM's speed profile, power and voltages at the substation, the voltage profile of the APM, power losses, and cumulative energy of the APM system shown in Fig. 9-16.

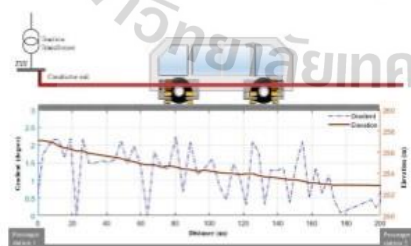


Fig. 9. Route vertical alignment and station.

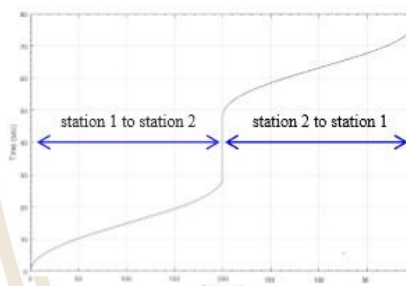


Fig. 11. Distance-time curve of APM service.

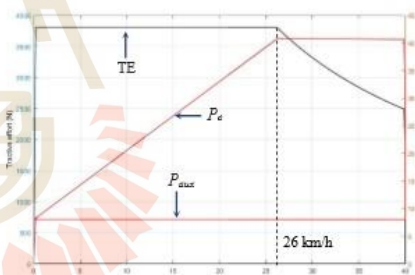
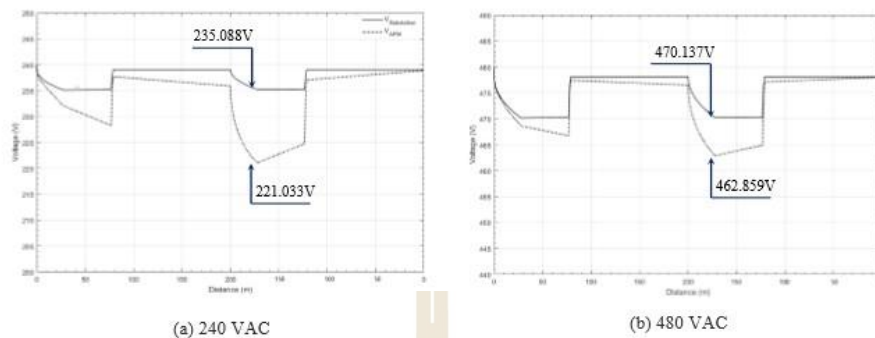


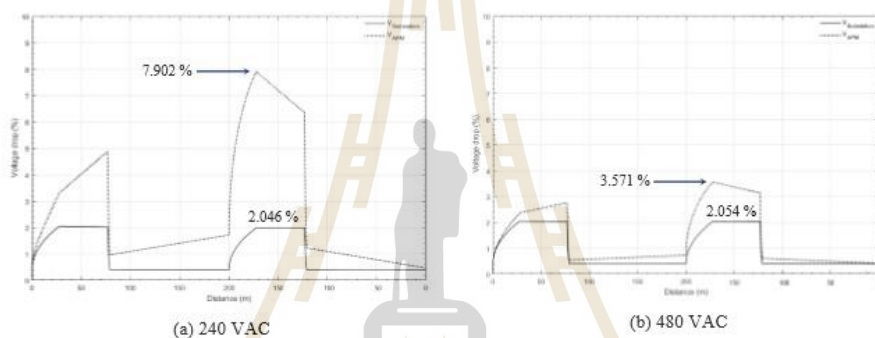
Fig. 12. Tractive force and speed curve of the APM.

A diagram of the route vertical alignment and passenger station is shown in Fig. 9; the gradient profile in the figure was obtained from a GPS tracking device. In Fig. 10 present the APM speed along the distance it moves following with the red dot-line served as the arbitrarily specified speed command. The APM draws power during acceleration and speed control mode for tractive purpose and consumes only the auxiliary power during stopping at the station as shown in Fig. 10. Fig. 11 shows the distance-time curves from these simulation for the round-trip of the APM system simulator. The tractive effort curve in Fig. 12 describes the relationship between tractive effort and speed curve.

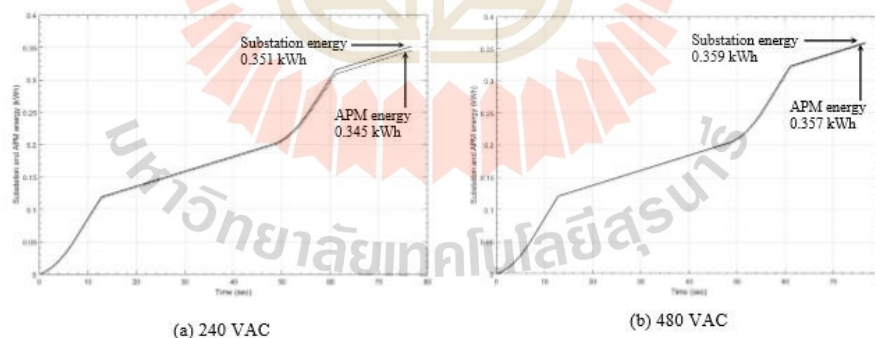




**Fig. 13. The voltage regulation between the substation and APM with the power feeding system.**



**Fig. 14. Percentage of voltage regulation with the power feeding system.**



**Fig.15. The cumulative energy of APM system.**

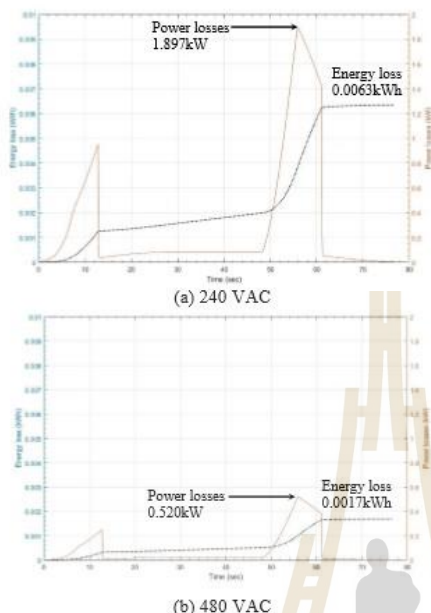


Fig. 16. Losses in the APM system for power feeding systems.

Voltage characteristics are shown in Fig. 13-14, while the APM moves to the terminal station at a distance of 200 m and then returns back to the first station, it is found that the minimum voltage at the traction substation and the APM in 240 VAC system are 235.088 V and 221.033 V respectively and 480VAC system is 470.137 V and 462.859 V respectively see in Fig. 13(a)-(b). Regarding the evaluation as a percentage according to the first equation above, it found that the maximum percentage of the voltage drop at the traction substation and the APM with 240V AC power feeding system is 2.046% and 7.902% respectively and 480 VAC system is 2.054% and 3.571% respectively see in Fig. 14(a)-(b). The main causes of the voltage drop in this case study are rail impedance, vehicle tractive load, and instantaneous vehicle distance. As seen in Fig. 13 and 14, the voltage drop increased with both the vehicle distance and tractive load. It is obvious that the voltage drops during acceleration in the return trip resulted in a huge voltage drop. Unlike the voltage drop at the vehicle, the substation voltage was not influenced by rail impedance, hence much less voltage drop. As a result of 480 VAC power feeding system, the percentage of the voltage drop does not exceed the standard [20]. The accumulative energy and energy loss of the APM system are shown in Fig. 15 and 16. The total energy consumption greatly rose on the return trip because the vehicle demanded high electrical power and energy from the substation as well as high losses in the supply rails

during acceleration from the other end of the supply feeder.

The total simulation results for these tests are summarized in Table 1. The energy loss percentage is 0.473 for 480 VAC, whereas, it is 1.790 for 240 VAC system.

Table 1. Summary of the simulation runs

Specification	Power Feeding System	
	240VAC	480VAC
voltage at the substation (V)	235.088	470.137
voltage at the APM (V)	221.033	462.859
voltage at the substation (%)	2.046	2.054
voltage at the APM (%)	7.902	3.571
substation energy (kWh)	0.351	0.359
APM energy (kWh)	0.345	0.357
power losses (kW)	1.897	0.520
energy loss (kWh)	0.0063	0.0017
relative loss (kWh)	0.0179	0.0047
energy loss (%)	1.790	0.473

## 6. CONCLUSION

During the planning and design for the APM system, it is essential to study the traction power system. According to the simulation results, the 480 VAC system has many advantages over the 240 VAC system. The advantages considered are the voltage drop characteristics and the low energy loss of the 480 VAC system. The simulation showed that the voltage drop percentage and traction energy loss percentage of the 480 VAC system is half those of the 240 VAC system. Therefore, the simulation and analysis results can be a guideline in the selection and design of a voltage distribution system for the APM system. In the future, the simulation in this study can be used to find the optimal position of an APM traction substation with the minimized power loss and voltage drop.

## ACKNOWLEDGMENT

We would like to express our sincere gratitude to Suranaree University of Technology for financially supporting this research.

## REFERENCES

- [1] Wikipedia. Automated Guideway Transit. [On-line serial], Retrieved October 9, 2018 from the World Wide Web: [https://en.wikipedia.org/wiki/Automated\\_guideway\\_transit](https://en.wikipedia.org/wiki/Automated_guideway_transit)
- [2] ACREP Report. 2010. Guidebook for Planning and Implementing Automated People Mover Systems at Airports. Transportation Research Board. Washington, D.C.

- [3] Akimura S. 2013. Japan's urban transport policy & The new transport system (NTS). Japan Transportation Planning Association.
- [4] Liu, R. 2017. Automated Transit: Planning, Operation, and Applications. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, N.J.
- [5] Bombardier. People mover. [On-line serial], Retrieved June 9, 2019 from the World Wide Web: <https://rail.bombardier.com/en/solutions-and-technologies/urban/people-mover.html>.
- [6] Mitsubishi Heavy Industries Engineering. Transportation. [On-line serial], Retrieved June 9, 2019 from the World Wide Web: <https://www.mhiengineering.com/products/transport.html>.
- [7] Horn, K. and Richardson, R. 2010. Guidebook for Planning and Implementing Automated People Mover Systems at Airports. Airport Cooperative Research Program.
- [8] Kobe Steel, Ltd. Automated Guideway Transit System. [On-line serial], Retrieved August 2, 2019 from the World Wide Web: <http://www.http://staff.washington.edu/jbs/itrans/Yuki%20Matsuoaka-AutomatedGuidedTransit.pdf>
- [9] Hiroyuki, M. et al. 2003. Automated People Mover System Crystal Mover for Singapore's LTA. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review Vol. 40, No. 3, pp. 1-10.
- [10] SEKIYA, T. and ODA, Yo. 2007. First Transportation Project APM System for Hong Kong International Airport. IHI Engineering review. Vol. 40, No. 1.
- [11] Paul, Lo. 2005. APM System AC Traction Power Supply System. Senior Electrical Engineer MTR Corporation.
- [12] Final Report. 2018. Study on Transport System Among Terminals in Delhi Airport in India. Ministry of Economy, Trade and Industry, Nippon Koei Co., Ltd.
- [13] Raney, S., & Young S. 2004. Morgantown People Mover-Updated Description. Advanced Technology Research Engineer Kansas Department of Transportation.
- [14] Lin, Y.-D., & Trani, A. A. 2000. Airport Automated People Mover Systems Analysis with a Hybrid Computer Simulation Model. Transportation Research Record (1703), pp. 45-57
- [15] Kassu, B. 2017. Assessment and Mitigation of Voltage Drops on Traction Lines: Case Study of Sebeta-Adama Line. Ph.D.Thesis, Addis Ababa University, Addis Ababa Ethiopia.
- [16] Kulworawanichpong, T. 2017. Railway Electrification. SUT 1<sup>st</sup> Edition. Suranaree University of Technology.
- [17] Andersson, E. and Lukaszewicz, P. 2006. Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains. Department of Aeronautical and Vehicle Engineering Royal Institute of Technology, KTH.
- [18] MARCH, MHS Rigid Conductor Bar Series. [On-line serial], Retrieved August 9, 2019 from the World Wide Web: <http://www.march-china.com>.
- [19] Master Plan for Building Group. Suranaree University of Technology Hospital.
- [20] Conductors-Minimum Ampacity and Size. 2014. NEC Standard 210.19(A).
- [21] Fact Sheet Transformer. Precise Electric Manufacturing Co., Ltd.

## ประวัติผู้เขียน

นายจิระพงศ์ ศรีวิชัย เกิดเมื่อวันที่ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2519 เกิดที่ อำเภอเมือง จังหวัดน่าน สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน กรุงเทพมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร เมื่อปีพ.ศ. 2551 หลังจากสำเร็จ การศึกษาได้บรรจุเข้าเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน วิทยาเขตสกลนคร และได้รับอนุมัติให้ลาศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตร ดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีการศึกษา พ.ศ. 2559 โดยมี ผลงานตีพิมพ์ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก จ

