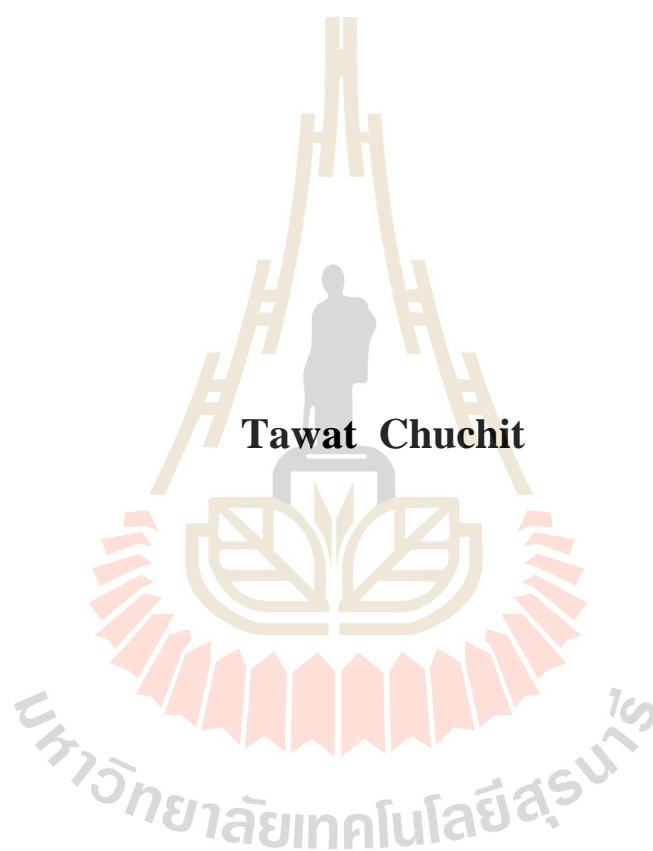


การศึกษาและการประเมินกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
กระแสนาง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**STUDY AND ASSESSMENT OF STRAY CURRENT IN
DC RAPID TRANSIT SYSTEM**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2018**

การศึกษาและการประเมินกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดรง

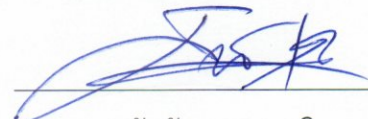
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาอุษภูบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



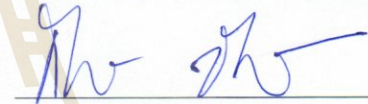
(อ. ดร.ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์)

ประธานกรรมการ



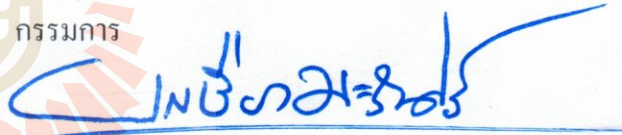
(รศ. ดร.ชนัดชัย กุลวรรณิพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



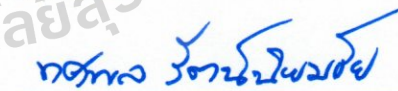
(รศ. ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ)

กรรมการ



(ผศ. ดร. บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ



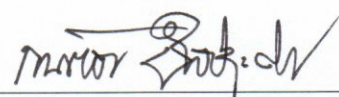
(อ. ดร.ทศพล รัตนนิมชัย)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รัช ฐิต : การศึกษาและการประเมินกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
กระแสดร (STUDY AND ASSESSMENT OF STRAY CURRENT IN DC RAPID
TRANSIT SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฏชัย กุลวรรณพงษ์,
263 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและการประเมินผลของกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
กระแสดรด้วยการสร้างแบบจำลองการต่อลงดินโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink ด้วย
โครงข่ายตัวต้านทานแบบหลายตัวซึ่งประกอบไปด้วยโครงข่ายตัวต้านทานในโครงสร้างของเสา
ทางยกระดับ และหมอนรองรางรถไฟสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ผล
การศึกษาพบว่าการประเมินผลของกระแสรั่วไหลได้เน้นที่ปริมาณของศักย์ไฟฟ้าที่รางที่อาจเป็น
อันตรายต่อความปลอดภัยของตัวบุคคลด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ยอมให้สัมผัสได้ต้องไม่เกิน 120 V ใน
ระยะเวลามากกว่า 300 s สำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสดรตาม EN 50122-1 การจำลองการเคลื่อนที่
ของรถไฟขบวนเดียวโดยพิจารณาการต่อลงดินในโครงสร้างทางยกระดับของระบบรถไฟฟ้า
ประกอบด้วยแบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียว (OGM) แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น (TGM) และ
แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นที่เสา (TGM@poles) จากการจำลองพบว่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ราง
เป็น 74.31 V 74.35 V และ 74.35 V ตามลำดับ ซึ่งผ่านมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ นอกจากนี้
แบบจำลอง TGM และ TGM@poles ยังสามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าในโครงสร้างทางยกระดับได้
ซึ่งมีค่าเป็น 0.766 V ทั้งสองแบบจำลอง และการสร้างแบบจำลองการต่อลงดินโดยใช้โปรแกรม
MATLAB&Simulink สำหรับโครงสร้างทางยกระดับแบบทางเดี่ยวข้อพบว่าแบบจำลองนี้มี
ความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางกับดินสูงสุดเป็น 7.29% ดังนั้นจึงนำแนวความคิด
ของการสร้างแบบจำลองนี้ไปสร้างแบบจำลองการต่อลงดินสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สาย
สีม่วง (เหนือ) ได้ จากการจำลองพบว่าศักย์ไฟฟ้าที่รางมีค่าเป็น 58.899 V ซึ่งผ่านมาตรฐานที่ได้
กำหนดไว้ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบของฉนวนรองที่สัมผัสสภาพต่อกระแสรั่วไหลเมื่อ
พิจารณาค่าความนำไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50122-2 พบว่าจากเกณฑ์ความนำไฟฟ้าที่กำหนดไว้ที่
0.5 S/km นั้น ระบบรถไฟฟ้ามีความนำไฟฟ้าเกินค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้เมื่อความต้านทานของอุปกรณ์
ยึดจับลดลงเหลือประมาณ 6 k Ω และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่ราง
มากกว่า + 5 V ตามมาตรฐาน EN 50122-2 พบว่าจะเกิดแรงดันวิกฤตที่ค่าความต้านทานของฉนวน
อุปกรณ์ยึดจับรางเป็น 2 k Ω หรือความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวเป็น (G'_{RE}) 2.78 S/km

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

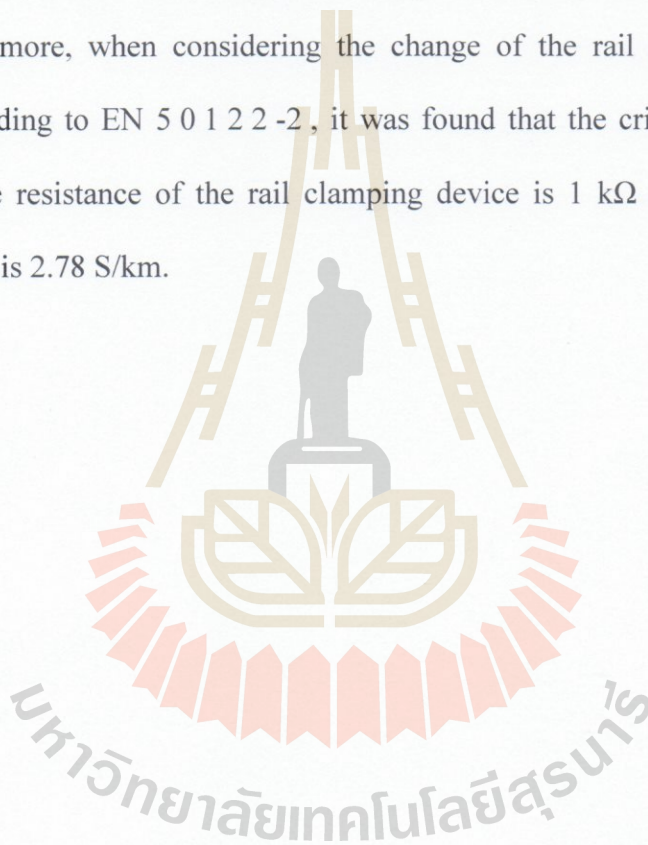
ธวัช ฐิต

TAWAT CHUCHIT : STUDY AND ASSESSMENT OF STRAY CURRENT
IN DC RAPID TRANSIT SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
THANATCHAI KULWORAWANICHPONG, Ph.D., 263 PP.

STRAY CURRENT/RAPID TRANSIT SYSTEM/RAIL POTENTIAL/EARTHING SYSTEM

This research is to study and assess stray current in a DC rapid transit system by creating a grounding model using MATLAB&Simulink, in which consists of a multi-resistor network of the structures of poles, viaducts and rail tracks for the MRT Purple Line (North) project. The study found that the evaluation of the stray current was focused on the amount of rail potential that may jeopardize person's safety with a permissible touch voltage of not exceeding 120 V in a period of more than 300 secs for DC railway systems with EN 50122-1 standard. The simulation of a single-train movement by considering the grounding in the viaduct structure of the train system consists of a one-layer grounding model (OGM), a two-layer grounding model (TGM) and a two-layer grounding model at poles (TGM_{@poles}). The simulation results showed that the maximum rail potentials were 74.31 V, 74.35 V and 74.35 V respectively, which passed the specified standard. In addition, the TGM and TGM_{@poles} models could also calculate the structure voltage of the train position, which was 0.766 V in both models. With regard to the grounding modeling using the MATLAB&Simulink for the scaled-down single-viaduct structure, it was found that this model had the maximum error of voltage between the rails and structure earth of 7.29% when compared with the standard EN 50122-2. Therefore, the concept of creating this model can be used to create a grounding model for the Purple Line MRT project

(North). From the simulation results, it was found that the rail potential was 58.899 V, which passed the specified standard. In addition, the effects of the stray current on secondary insulation were studied. Considering the conductivity according to EN 50122-2 standard, it was found that, from the electrical conductivity set at 0.5 S/km, the electric railway system has an electrical conductivity exceeding the acceptable minimum when the resistance of the clamping device is reduced to about 6k Ω . Furthermore, when considering the change of the rail potential greater than + 5 V according to EN 50122-2, it was found that the critical voltage occurred whenever the resistance of the rail clamping device is 1 k Ω or conductor per unit length (G'_{RE}) is 2.78 S/km.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature

Advisor's Signature

อวัช ภูมิ

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลวรรณิพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์วิชัย ศรีสุรักษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำ กำลังใจและเป็นแบบอย่างที่ดีให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญเรือง มะรังสี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ตรวจทานเล่มวิทยานิพนธ์ให้กับผู้วิจัย

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและกำลังใจอย่างดีมาโดยตลอด

ขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ภายใต้การดำเนินการของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ทรานส์ ไทย เรลเวย์ ที่สนับสนุนทุนการศึกษา

ขอขอบคุณ Dr.Hayasaka Tamakusa รวมถึงสมาชิกห้องปฏิบัติการของสถาบันวิจัย RTRIทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ แลกเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการในขณะทำวิจัยในประเทศญี่ปุ่น

ขอขอบคุณ ดร.โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง ดร.ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ ดร.พิทยา ดิกกล้า ดร.สุรัชย์ วงษ์ฟูเกียรติ และนายเชาวลิต คิติกู รวมถึงบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ แลกเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอบคุณ น.ส. ปิยะนุช ชูปาน น.ส. จิรัชยา คงขัน น.ส. วิลาสินี เป้าน้อย น.ส. ยวดี กริธาธร และ น.ส. อนงค์พร แก้วกล้า ที่เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ครู อาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษามาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	

1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของเรื่อง.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	4

2 ทัศนวิสัยการมองเห็นและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ.....	5
2.2 ทัศนวิสัยการมองเห็นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	15
2.3.1 วงจรย้อนกลับและการต่อลงดิน	15
2.3.2 วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง	21
2.3.3 กระแสรั่วไหลกักเก็บ.....	27
2.3.4 การประเมินกระแสรั่วไหล.....	30
2.3.5 การตรวจวัดพารามิเตอร์ของทางรถไฟ	33
2.3.6 การป้องกันต่อกระแสรั่วไหลกักเก็บ	37
2.4 สรุป	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	การคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่ราง	
3.1	บทนำ.....	41
3.2	การคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่ราง.....	41
3.2.1	กรณีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว.....	41
3.2.2	กรณีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน.....	56
3.3	ผลการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	70
3.3.1	การจำลองสถานการณ์ทั่วไป.....	71
3.3.2	กรณีรถไฟหยุดอยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ	71
3.3.3	การประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า ขับเคลื่อน	75
3.4	สรุป	78
4	กระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้านั่งมวลชนกระแสดตรง สำหรับโครงสร้างทางยกระดับ	
4.1	บทนำ.....	79
4.2	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้านั่งมวลชนกระแสดตรง.....	79
4.2.1	การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้านั่งมวลชน.....	84
4.2.2	การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่.....	87
4.2.3	แบบจำลองระบบรถไฟฟ้านั่งมวลชน.....	88
4.2.4	การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	93
4.3	การจำลองผลการขับเคลื่อนรถไฟฟ้านั่งมวลชน.....	102
4.3.1	การจำลองผลโดยทั่วไป	106
4.3.2	การเปรียบเทียบผลการจำลอง	111
4.4	สรุป	114
5	แบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียว	
5.1	บทนำ.....	115
5.2	การประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียว.....	115

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.1	ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางวิ่งของโครงสร้างยกระดับ	
	แบบทางเดี่ยวย่อส่วน	118
5.2.2	ความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของโครงสร้างยกระดับ	
	แบบทางเดี่ยวย่อส่วน	119
5.2.3	การประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางของโครงสร้างยกระดับ	
	แบบทางเดี่ยวย่อส่วน	121
5.3	การตรวจวัดกระแสรั่วไหลในโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	121
5.3.1	กรณีโหลดเปลี่ยนแปลง	122
5.3.2	กรณีโหลดคงที่.....	127
5.4	แบบจำลองการต่อลงดินสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน.....	132
5.4.1	แบบจำลองเสา.....	132
5.4.2	แบบจำลองทางยกระดับ.....	133
5.4.3	แบบจำลองทางวิ่ง.....	136
5.5	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับ โครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	138
5.6	การปรับปรุงแบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับโครงสร้างยกระดับ	
	แบบทางเดี่ยวย่อส่วน	144
5.6.1	ระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรม.....	144
5.6.2	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	144
5.6.3	การจำลองผล.....	145
5.7	สรุป	148
6	แบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม	
	(สายสีม่วงเหนือ)	
6.1	บทนำ.....	150
6.2	แบบจำลองการต่อลงดินสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ).....	150
6.2.1	แบบจำลองเสาสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	151

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.2	แบบจำลองยกระดับแบบทางเดี่ยวสำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ).....	153
6.2.3	แบบจำลองทางวิ่งสำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ).....	153
6.3	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	155
6.4	การปรับปรุงแบบจำลองการต่อลงดินของโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ).....	159
6.4.1	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	160
6.4.2	การจำลองผล.....	161
6.5	การประเมินกระแสรั่วไหลสำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ).....	163
6.5.1	พารามิเตอร์สำหรับการประเมินกระแสรั่วไหล	164
6.5.2	ผลการประเมินกระแสรั่วไหล.....	166
6.5.3	ผลกระทบของฉนวนรองที่เสื่อมสภาพต่อกระแสรั่วไหล	168
6.6	สรุป.....	170
7	สรุปและข้อเสนอแนะ	
7.1	สรุป.....	171
7.2	ข้อเสนอแนะ	172
	รายการอ้างอิง	173
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ชุดทดสอบโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	178
	ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลและการวัดค่าความต้านทาน.....	204
	ภาคผนวก ค. ชุดต้นแบบระบบตรวจจับกระแสรั่วไหล	226
	ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	243
	ประวัติผู้เขียน	263

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6
2.2	แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ U_t ตามมาตรฐาน EN 50122-1 19
2.3	กระแสในร่างกายและแรงดันสัมผัสและแรงดันที่เข้าถึงได้ตามมาตรฐาน EN 50122-1 ภาคผนวก D 20
3.1	การคำนวณ โดยทั่วไปสำหรับแบบจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวและสองด้าน เมื่อพิจารณาระยะด้านข้างยาว 5 km 72
3.2	ระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วงเหนือ) 73
3.3	ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวของระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) 76
3.4	แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวของระบบ รถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) 76
3.5	ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้านของระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) 76
3.6	แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้านของระบบ รถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) 77
4.1	พารามิเตอร์สำหรับการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถ 105
4.2	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่รางของแบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียว ที่อยู่บนพื้นฐานตามมาตรฐาน EN 50122-2 110
4.3	ผลการจำลองของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น 112
4.4	ผลการจำลองของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นที่เสาโครงสร้างทางยกระดับ 113
4.5	ผลการเปรียบเทียบการจำลองผลการต่อลงดิน 113
5.1	ข้อมูลจำเพาะของชุดทดสอบการตรวจวัดกระแสรั่วไหลในโครงสร้างยกระดับ แบบทางเดี่ยวย่อส่วน 117
5.2	ผลการทดสอบการวัดความต้านทานราง 119
5.3	ผลการทดสอบการวัดความต้านทานระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างคอนกรีต 120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.4 ผลการทดสอบการวัดความต้านทานระหว่างโครงสร้างคอนกรีตกับดิน.....	120
5.5 การเปรียบเทียบการคำนวณกับการจำลองผลแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งก่อนปรับปรุง.....	143
5.6 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX.....	146
5.7 การหาค่าพารามิเตอร์สำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวด้วยวิธี GA.....	147
5.8 การเปรียบเทียบการคำนวณกับการจำลองผลแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งหลังปรับปรุง	148
6.1 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX สำหรับโครงการ รถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	162
6.2 การหาค่าพารามิเตอร์สำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ด้วยวิธี GA	162
6.3 ผลกระทบของความยาวที่จำกัด	166
6.4 การเปรียบเทียบผลการประเมินกระแสรั่วไหล	168
ก.1 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	193
ก.2 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า	195
ก.3 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าของชุดวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอน	198
ก.4 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าของชุดวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบขยาย	201
ข.1 ผลการทดสอบในกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงวันที่ 16/11/2018.....	213
ข.2 ผลการทดสอบในกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงวันที่ 14/12/2018.....	213
ข.3 ผลการทดสอบในกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงวันที่ 14/01/2018.....	214
ข.4 ผลการทดสอบในกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ในระยะเวลาหนึ่งสัปดาห์	214
ข.5 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบในกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ในระยะเวลาหนึ่งสัปดาห์.....	215
ข.6 การวัดความต้านทานดินของโครงสร้างยกระดับแบบย่ส่วน ทดสอบวันที่ 16/10/2561 อุณหภูมิ 29 °C ความชื้น 54%	218
ข.7 การวัดความต้านทานดินของโครงสร้างยกระดับแบบย่ส่วน ทดสอบวันที่ 15/11/2561 อุณหภูมิ 27 °C ความชื้น 34%	219
ข.8 การวัดความต้านทานดินของโครงสร้างยกระดับแบบย่ส่วน ทดสอบวันที่ 30/01/2562 อุณหภูมิ 31 °C ความชื้น 70%	220

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.9 ค่าเฉลี่ยของการวัดความต้านทานดินของโครงสร้างยกระดับแบบย่อด้าน.....	221
ข.10 การวัดความต้านทานของโครงสร้างที่ยกระดับแบบย่อด้าน	
ทดสอบวันที่ 16/10/2561 อุณหภูมิ 29 °C ความชื้น 54%	223
ข.11 การวัดความต้านทานของโครงสร้างที่ยกระดับแบบย่อด้าน	
ทดสอบวันที่ 15/11/2561 อุณหภูมิ 27 °C ความชื้น 34%	224
ข.12 การวัดความต้านทานของโครงสร้างที่ยกระดับแบบย่อด้าน	
ทดสอบวันที่ 30/01/2562 อุณหภูมิ 31 °C ความชื้น 70%	225
ค.1 อุปกรณ์สำหรับระบบตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	230
ค.2 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับสนามแม่เหล็ก 330 V	233
ค.3 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับสนามแม่เหล็ก 100 V	235
ค.4 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับสนามแม่เหล็ก 20 V	236



สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1	กระแสรั่วไหลในระบบบรไฟฟ้ากระแสตรง	2
2.1	วงจรพื้นฐานของแบบจำลองกระแสรั่วไหล	9
2.2	แบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับการคำนวณทางคอมพิวเตอร์	10
2.3	การต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน	10
2.4	แบบจำลองทั่วไปของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนสองด้าน	11
2.5	แบบจำลองการคำนวณกระแสรั่วไหลที่พิจารณาผลกระทบด้านข้าง	12
2.6	แบบจำลองที่มีการต่อลงดิน 4 ชั้น	12
2.7	แบบจำลองสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า	13
2.8	โครงข่ายตัวต้านทานสำหรับราง หมอนรองทางรถไฟ และท่อโลหะ	14
2.9	โครงข่ายตัวต้านทานสำหรับทางรถไฟคู่	14
2.10	วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง	17
2.11	วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ	17
2.12	แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ U_t ตามมาตรฐาน EN50122-1 และ EN 50122-2	18
2.13	วงจรสมมูลของวงจรสัมผัส	21
2.14	การทำ earthing and bonding ของโครงสร้างในระบบบรไฟฟ้า ตามมาตรฐาน EN 50122-2	22
2.15	การต่อลงดินโดยใช้ไดโอด	23
2.16	Floating negative return current system	24
2.17	ระบบ SCCN ที่ใช้ drainage diode	24
2.18	ระบบจ่ายไฟผ่านรางที่สี่ของ LUL	25
2.19	ระบบกระแสนอนกลับดินและการต่อลงดินสำหรับระบบบรไฟฟ้ากระแสตรง	26
2.20	การกักร้อนที่เกิดขึ้นกับท่อโลหะที่อยู่ใต้ดิน	29
2.21	การกักร้อนที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟ	29
2.22	การกักร้อนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเหล็กเสริมแรงในคอนกรีต	30
2.23	การเฝ้าตรวจสอบศักย์ไฟฟ้าของทางวิ่ง	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 การวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งสำหรับรางที่มีความยาว 10 m	34
2.25 การจัดเรียงการวัดค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับ โครงสร้างเสริมเหล็ก	35
2.26 การหาค่าความนำต่อหน่วยความยาวสำหรับส่วนของรางแบบเปิด	36
2.27 มาตรการป้องกันด้วยอุปกรณ์ (active protective measures) ต่อกระแสรั่วไหลกักตกร่อน	38
2.28 แผนภาพวงจรไฟฟ้าสมมูลสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงในอุโมงค์คอนกรีต ที่มีเหล็กเสริมแรง	39
3.1 พื้นที่กระแสรั่วไหลกักตกร่อน	42
3.2 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว	42
3.3 การแบ่งช่วงการคำนวณสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว	43
3.4 ศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงตามอุปกรณ์รางรถไฟของความยาว dx	43
3.5 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน	57
3.6 การแบ่งช่วงการคำนวณสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน	58
3.7 แรงดันไฟฟ้าที่รางสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว	74
3.8 แรงดันไฟฟ้าที่รางสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน	75
4.1 แผนภาพการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟ	80
4.2 ลักษณะสมบัติแรงดูดของหัวรถจักร	81
4.3 คุณลักษณะสมบัติแรงของเบรก	82
4.4 ระดับเกรเดียนต์ของเส้นทางรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	82
4.5 แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	83
4.6 โหมดการทำงานของรถไฟ	85
4.7 การควบคุมการทำงานโหมดการเบรก	86
4.8 การควบคุมความเร็วแบบสัดส่วน	87
4.9 ผลการควบคุมความเร็วตามเส้นร่างความเร็วที่ได้ออกแบบไว้สำหรับรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 แบบจำลองระบบรถไฟฟ้าในโครงสร้างทางยกระดับที่มีการต่อลงดินแบบสองชั้น	88
4.11 แบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียว	90
4.12 แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับแบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียว	90
4.13 แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น	91
4.14 แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น	91
4.15 แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นที่เสาโครงสร้างทางยกระดับ	92
4.16 แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น ที่เสาโครงสร้างทางยกระดับ	92
4.17 การต่อตัวนำที่บัสสถานีย่อยแบบสองระดับต่อหนึ่งบัส	94
4.18 การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบสองระดับ	95
4.19 การต่อตัวนำที่บัสสถานีย่อยแบบสามระดับต่อหนึ่งบัส	97
4.20 การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบสามระดับ	99
4.21 ขั้นตอนการหาผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแส	103
4.22 ขั้นตอนการจำลองผล	104
4.23 พลังงานที่ใช้โดยรถไฟ	106
4.24 พลังงานที่สถานีย่อย 1-6	107
4.25 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีย่อย 1-6	107
4.26 แรงดันไฟฟ้าตามตำแหน่งของรถไฟ	108
4.27 ศักย์ไฟฟ้าที่รางที่สถานีย่อย 1-6	108
4.28 ศักย์ไฟฟ้าตามตำแหน่งของรถไฟ	109
4.29 พลังงานรวมที่รถไฟและสถานีไฟฟ้าย่อย	109
4.30 แรงดันไฟฟ้าที่โครงสร้างที่สถานีไฟฟ้าย่อย 1-6 สำหรับแบบจำลอง TGM	111
4.31 แรงดันไฟฟ้าที่โครงสร้างตามตำแหน่งของรถไฟสำหรับแบบจำลอง TGM	112
5.1 วงจรการตรวจวัดกระแสรั่วไหล	116
5.2 ชุดทดสอบการตรวจวัดกระแสรั่วไหลสำหรับโครงสร้างยกระดับ แบบทางเดี่ยวย่อส่วน	117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 การประยุกต์สำหรับการวัดความต้านทางต่อหน่วยความยาวของรางวิ่ง.....	118
5.4 ผลการทดสอบวันที่ 1 พฤศจิกายน 2561	123
5.5 ผลการทดสอบวันที่ 16 พฤศจิกายน 2561	124
5.6 ผลการทดสอบวันที่ 14 ธันวาคม 2561	125
5.7 ผลการทดสอบในเดือนพฤศจิกายน (ฝนตก)	128
5.8 ผลการทดสอบในเดือนธันวาคม (อากาศหนาว).....	129
5.9 ผลการทดสอบในเดือนมกราคม (อากาศร้อน)	130
5.10 ค่าเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงของผลการทดสอบในเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม และมกราคม (อากาศร้อน).....	131
5.11 โครงสร้างและแบบจำลองตัวต้านทานสำหรับโครงสร้างยกระดับ แบบทางเดี่ยวย่อส่วน	133
5.12 แบบจำลองตัวต้านทานสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน ในภาคตัดขวาง	134
5.13 โครงสร้างทางยกระดับเดี่ยวตามแนวความยาว	134
5.14 แบบจำลองตัวต้านทานสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	135
5.15 ส่วนประกอบของทางวิ่งสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	136
5.16 แบบจำลองตัวต้านทานของรางและฐานรองรางสำหรับโครงสร้างยกระดับ แบบทางเดี่ยวย่อส่วน	137
5.17 แบบจำลองการต่อลงดินสำหรับสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	138
5.18 แบบจำลองเสาสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน โดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink	139
5.19 แบบจำลองทางยกระดับและทางวิ่งสำหรับ โครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน โดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink	140
5.20 รูปขยายของแบบจำลองทางยกระดับและทางวิ่งสำหรับโครงสร้างยกระดับ แบบทางเดี่ยวย่อส่วนโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink	141

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.21	แบบจำลองทางยกระดับสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วน โดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink142
5.22	แบบจำลองทางวิ่งสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วน โดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink142
5.23	การจำลองผลการวัดค่าความต้านทานเทียบกับดินสำหรับ โครงสร้างยกระดับ แบบทางเดี่ยวบางส่วนที่ตำแหน่งจุดวัดที่ 1145
5.24	การรู้เข้าหาหาคำตอบสำหรับ โครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วนโดยใช้วิธี GA147
6.1	โครงสร้างทางยกระดับในโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ).....151
6.2	โครงสร้างโดยรวมของทางยกระดับแบบทางเดี่ยวสำหรับ โครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)152
6.3	โครงสร้างและแบบจำลองตัวต้านทานสำหรับเสา โครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยว สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)152
6.4	แบบจำลองตัวต้านทานสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยว สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)153
6.5	ส่วนประกอบของทางวิ่งสำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)154
6.6	แบบจำลองตัวต้านทานของทางวิ่งที่ต่อเนื่องในแนวภาคตัดขวางสำหรับโครงการ รถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)154
6.7	แบบจำลองตัวต้านทานของทางวิ่งที่ต่อเนื่องตามแนวความยาวสำหรับโครงการ รถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)155
6.8	แบบจำลองการต่อลงดินสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวสำหรับโครงการ รถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)156
6.9	แบบจำลองเสาโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink สำหรับโครงการ รถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)156
6.10	แบบจำลองทางยกระดับและทางวิ่งโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)157

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.11 รูปขยายแบบจำลองทางยกระดับและทางวิ่งโดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	157
6.12 แบบจำลองทางยกระดับโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	158
6.13 ภายในแบบจำลองทางยกระดับโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	158
6.14 หมอนรองรางในแบบจำลองทางยกระดับโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	159
6.15 การวัดค่าความต้านทานเทียบกับดินในรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ).....	160
6.16 การจำลองผลการวัดค่าความต้านทานเทียบกับดินที่ตำแหน่งจุดวัดที่ 3 Handrail สำหรับแบบจำลองการต่อลงดินในโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ).....	161
6.17 การรู้เข้าหาคำตอบโดยใช้วิธี GA ของโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	163
6.18 การจำลองผลการวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งสำหรับรางที่มีความยาว 10 เมตร สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	164
6.19 การจำลองผลการวัดค่าความนำต่อหน่วยความยาวสำหรับส่วนของราง สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	165
6.20 การจำลองหาค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว 5 ช่วงเสา	166
6.21 ศักย์ไฟฟ้าที่รางเทียบกับความต้านทานของฉนวนอุปกรณ์ยึดจับราง	169
6.22 กระแสรั่วไหลเทียบกับความต้านทานของฉนวนอุปกรณ์ยึดจับราง	170
ก.1 ตำแหน่งการสร้างชุดทดสอบ	177
ก.2 ขนาดของทางยกระดับด้านหน้าสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	177
ก.3 ขนาดของทางยกระดับด้านข้างสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	178
ก.4 ขนาดของเสาสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	178
ก.5 ขนาดของโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	179
ก.6 ขนาดทางยกระดับในโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	180

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.7 การเตรียมหลุมสำหรับหล่อเสาทางยกระดับ	181
ก.8 การตั้งระดับของเสา.....	181
ก.9 เหล็กโครงสร้างของเสา	182
ก.10 การเทคอนกรีตที่ฐานเสา	182
ก.11 การหล่อเสาของโครงสร้างทางยกระดับ.....	182
ก.12 เหล็กโครงสร้างของทางยกระดับ	183
ก.13 การเทคอนกรีตของทางยกระดับ	183
ก.14 การถอดแบบทางยกระดับ	183
ก.15 ชุดทดสอบโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	184
ก.16 ชุดทดสอบโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วนหลังติดตั้งรางวิ่ง	184
ก.17 ชุดทดสอบกระแสรั่วไหลสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน	185
ก.18 วงจรแหล่งจ่าย	185
ก.19 ชุดวงจรแหล่งจ่าย	186
ก.20 การตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าเมื่อจ่ายไฟฟ้าพิกัด 10 V.....	186
ก.21 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่ไม่จ่ายไฟ	187
ก.22 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่จ่ายไฟ 5 V.....	187
ก.23 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่จ่ายไฟ 10 V.....	188
ก.24 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่จ่ายไฟ 15 V.....	188
ก.25 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่ไม่จ่ายไฟในโหมดกรองสัญญาณ.....	189
ก.26 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่จ่ายไฟ 5 V ในโหมดกรองสัญญาณ	190
ก.27 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่จ่ายไฟ 10 V ในโหมดกรองสัญญาณ	190
ก.28 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่จ่ายไฟ 15 V ในโหมดกรองสัญญาณ	191
ก.29 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P.....	192
ก.30 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าเบอร์ LA 55-P.....	192
ก.31 วงจรปรับแต่งสัญญาณ	192
ก.32 ชุดวงจรตรวจจับกระแสและแรงดันไฟฟ้า	193

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์.....	194
ก.34 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์	195
ก.35 ชุดตรวจวัดกระแสรั่วไหล	196
ก.36 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอน	197
ก.37 ชุดวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอน	197
ก.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ ของวงจรลดทอนสัญญาณตัวที่ 1.....	198
ก.39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ ของวงจรลดทอนสัญญาณตัวที่ 2.....	199
ก.40 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ ของวงจรลดทอนสัญญาณตัวที่ 3.....	199
ก.41 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบขยาย.....	200
ก.42 ชุดวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบขยาย	200
ก.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ ของวงจรขยายสัญญาณตัวที่ 1	202
ก.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ ของวงจรขยายสัญญาณตัวที่ 2	202
ก.45 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ ของวงจรขยายสัญญาณตัวที่ 3	203
ข.1 ผลการทดสอบวันที่ 1/11/2018.....	206
ข.2 ผลการทดสอบวันที่ 16/11/2018.....	207
ข.3 ผลการทดสอบวันที่ 14/12/2018.....	208
ข.4 ผลการทดสอบวันที่ 14/01/2019.....	209
ข.5 ผลการทดสอบวันที่ 8/11/2018 – 15/11/2018.....	210
ข.6 ผลการทดสอบวันที่ 19/12/2018 – 9/1/2019.....	211
ข.7 ผลการทดสอบวันที่ 15/01/2019 – 24/01/2019.....	212

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.8 การวัดค่าความต้านทานดินด้วยวิธีเวอร์เนอร์.....	215
ข.9 การแสดงการวัดแบบ 3 จุดทดสอบ	216
ข.10 การวัดค่าความต้านทานของโครงสร้างที่ต่อลงดินเทียบกับดิน	216
ข.11 การวัดความต้านทานดินที่หลุมสำหรับการก่อสร้างเสา	217
ข.12 ตัวอย่างการวัดความต้าน โครงสร้างเทียบกับดิน	217
ข.13 ตัวอย่างการวัดความต้านทานของเสาโครงสร้าง	222
ข.14 ตัวอย่างการวัดความต้านทานของทางยกระดับชั้นที่ 1	222
ข.15 ตัวอย่างการวัดความต้านทานของทางยกระดับชั้นที่ 2	222
ค.1 การตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหลของ บริษัท ซีเมนต์	227
ค.2 ระบบแสดงการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหล ของบริษัท ซีเมนต์	227
ค.3 การวัดศักย์ไฟฟ้าที่รั่ววิ่ง โดยใช้ Short-circuit device Sitras SCD ของ บริษัท ซีเมนต์	228
ค.4 ระบบตรวจจับกระแสรั่วไหล	228
ค.5 ชุดทดสอบระบบตรวจจับกระแสรั่วไหล	229
ค.6 วงจรแหล่งจ่ายในระบบตรวจจับกระแสรั่วไหล	230
ค.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับจอ HMI และ วงจรเซนเซอร์	231
ค.8 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	231
ค.9 ชุดวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	232
ค.10 วงจรปรับแต่งสัญญาณ	232
ค.11 ชุดวงจรปรับแต่งสัญญาณ	232
ค.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์พิกัด 330 V	233
ค.13 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าพิกัด 100 V	234
ค.14 ชุดวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าพิกัด 100 V	234
ค.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์พิกัด 100 V	235
ค.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ พิกัด 20 V ตัวที่ 1	237

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

ค.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ พิกัด 20 V ตัวที่ 2.....	237
ค.18 หน้า Home ของระบบตรวจวัดกระแสรั่วไหล.....	238
ค.19 หน้า Graphics ของระบบตรวจวัดกระแสรั่วไหล	239
ค.20 การวัดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า PP02.....	239
ค.21 ผลการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าผ่าน web browser.....	240
ค.22 การข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Data Viewing Tools ของ WECON.....	240
ค.23 การ Export ข้อมูลเป็นไฟล์ .csv.....	241
ค.24 ผลการทดสอบในกรณีโหลดเปลี่ยนแปลง	242
ค.25 ผลการทดสอบกรณีโหลดคงที่	242



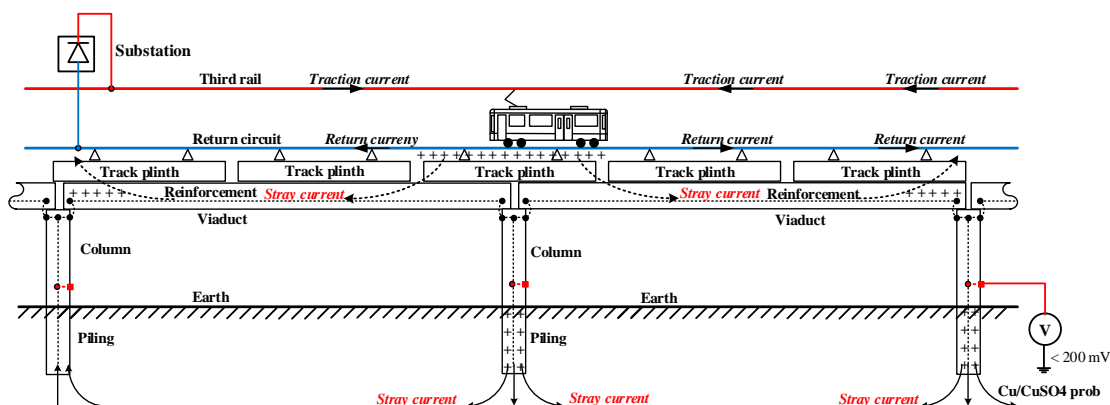
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในเมืองขนาดใหญ่หลายเมืองทั่วโลก ไม่ว่าจะเป็นกรุงลอนดอน (ประเทศอังกฤษ) กรุงปารีส (ประเทศฝรั่งเศส) กรุงโตเกียว (ประเทศญี่ปุ่น) นครนิวยอร์ก (ประเทศสหรัฐอเมริกา) กรุงปักกิ่ง (ประเทศจีน) หรือแม้กระทั่งกรุงเทพมหานคร (ประเทศไทย) การเคลื่อนย้ายผู้โดยสารจำนวนมากในช่วงเวลาสั้นๆ จำเป็นต้องใช้ปริมาณกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนจำนวนมหาศาล โหลดของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนส่วนใหญ่เกิดจากการดึงกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนบนขบวนรถไฟฟ้า เมื่อมีรถวิ่งอยู่ในระบบไฟฟ้าหลายขบวนบางขบวนดึงกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัดเพื่อเร่งความเร็ว บางขบวนอาจจะเบรก บางขบวนเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย ส่งผลให้คุณสมบัติของโหลดรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งแตกต่างจากโหลดของสถานีจ่ายไฟฟ้าทั่วไปของการไฟฟ้าฯ ปัญหานี้ต้องได้รับการศึกษาเพื่อใช้ประกอบการวางแผนระบบไฟฟ้า เมื่อมีการจราจรที่หนาแน่นขึ้นและมีการวางระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมากขึ้น ในปัจจุบันทุกหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องให้ความสำคัญกับเรื่องดังกล่าว โดยเฉพาะปัญหากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงและระบบรถไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในประเทศไทยส่วนใหญ่ก็เป็นระบบนี้

ในระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง เช่น รถไฟฟ้า ระบบรางและระบบรถไฟฟ้าใต้ดิน กระแสไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถจะไหลกลับไปยังสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนผ่านรางวิ่ง ส่วนหนึ่งของกระแสย้อนกลับจะไหลไปยังโครงสร้างเสริมแรงและไหลลงดินผ่านโครงสร้างของเสาทางยกระดับหรืออุโมงค์และไหลกลับไปยังสถานีไฟฟ้าผ่านดิน กระแสย้อนกลับที่อยู่ภายในโครงสร้างเสริมแรงและโครงสร้างของเสาทางยกระดับหรืออุโมงค์ในบริเวณที่ใกล้ๆ กับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะไหลกลับไปยังรางวิ่งและไหลกลับไปยังระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้างานรูปที่ 1.1 เพื่อหลีกเลี่ยงกระแสย้อนกลับที่ไหลออกจากรางวิ่งซึ่งเป็นสาเหตุของกระแสรั่วไหลก่อกวนในส่วนประกอบที่เป็นโลหะที่มีการสัมผัสกับดิน เช่น ท่อลำเลียงน้ำมัน ตัวกั้นสายเคเบิล โครงสร้างพื้นฐานเหล็กเสริมแรงของอาคารหรือเสา โครงสร้างอุโมงค์เสริมแรง สะพานและสะพานคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีความเสี่ยง ดังนั้นจึงต้องมีการแยกจากกันอย่างสมบูรณ์ของวงจรย้อนกลับจากระบบดิน (Friedrich et al., 2009)



รูปที่ 1.1 กระแสรั่วไหลในระบบรถไฟกระแสตรง

การป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างที่เกิดจากกระแสรั่วไหลกักตรอนของระบบรถไฟ และ โครงสร้างที่อยู่ใกล้เคียงตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระแสรั่วไหลที่ไหลออกจากทางรถไฟ คือ ความนำต่อหน่วยความยาวระหว่างทางรถไฟกับดิน โดยที่อัตราการกักตรอนเป็นตัวแปรหลักที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยง จากมาตรฐาน EN 50122-2 แนะนำว่าจะไม่เกิดความเสียหายในทางรถไฟ ในช่วง 25 ปี ถ้ากระแสรั่วไหลต่อหน่วยความยาวไม่เกินค่า 2.5 mA/m ต่อทางรถไฟ จากการศึกษา ผลกระทบของกระแสรั่วไหลกักตรอนในระบบรถไฟกระแสตรงได้มีการแสดงวิธีการการคำนวณ และจำลองผล เช่น การคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่วางเทียบกับดินแทนการคำนวณกระแสรั่วไหล โดยตรง (Valero and Sanz, 2013) การคำนวณการไหลของกระแสและแรงดันในโครงสร้างอุโมงค์ ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้วิธีการ DP และ LP (distributed and lumped parameters) (Fichera et al., 2013) การคำนวณการไหลของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโครงสร้างอุโมงค์โดยใช้ MATLAB GUI (Fichera et al., 2013) การจำลองกระแสรั่วไหล โดยใช้โปรแกรม CDEGS และ MATLAB&Simulink (Charalambous, Cotton and Aylott, 2008) สำหรับการวิเคราะห์และการ ประเมินได้วัระบบรถไฟใต้ดินสายสีแดงของคูไบตามมาตรฐาน EN 50122-2 (Mariscotti et al., 2012) นอกจากนี้การสร้างทางรถไฟนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต้องพิจารณาการต่อลงดินของระบบไฟฟ้าที่มีผลกระทบโดยตรงต่อการเกิดกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น ดังนั้นก่อนก่อสร้าง จำเป็นต้องใช้แบบโครงสร้างการต่อลงดิน สำหรับการวิเคราะห์กระแสรั่วไหล จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาและการประเมินผลของกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟขนส่งมวลชน กระแสตรงด้วยการสร้างแบบจำลองการต่อลงดินโดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink ใน รูปแบบโครงข่ายตัวต้านทานที่ประกอบไปด้วยโครงข่ายตัวต้านทาน โครงสร้างของเสา ทางยกระดับ และหมอนรองรางรถไฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อประเมินและวิเคราะห์กระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน กระแสตรงโดยใช้วิธีการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางและวิธีการจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟขบวนเดียวได้

1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างโครงสร้างทางยกระดับแบบขั้วส่วนเพื่อใช้สำหรับการวัด และสร้างแบบจำลองการต่อลงดิน

1.2.3 เพื่อนำแบบจำลองการต่อลงดินของโครงสร้างทางยกระดับแบบขั้วส่วนมา ประยุกต์ใช้กับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วงเหนือ)

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การจำลองกระแสรั่วไหลของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนอาศัยชุด บล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blocksets) ร่วมกับ Simulink ของโปรแกรม MATLAB

1.3.2 การทดสอบจะพิจารณาในกรณีที่โหลดทางไฟฟ้าคงที่

1.3.3 สมมติว่าให้ระบบการต่อลงดินสมบูรณ์เท่านั้น ไม่มีการผุกร่อนและขึ้นสนิมของ โครงสร้างโลหะที่ใช้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 พัฒนาแบบจำลองการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนเพื่อใช้ ในการวิเคราะห์และประเมินกระแสรั่วไหล

1.4.2 การทดสอบจะพิจารณาในกรณีที่โหลดทางไฟฟ้าคงที่

1.4.3 ทดสอบและประเมินกระแสรั่วไหลในโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายฉลองรัช ธรรม (เหนือ) ตามมาตรฐาน EN 50122 สำหรับโครงสร้างทางยกระดับเดียว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถประเมินและวิเคราะห์กระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน กระแสตรงโดยใช้วิธีการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางและวิธีการจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟขบวนเดียว

1.5.2 สามารถออกแบบและสร้างโครงสร้างทางยกระดับแบบขั้วส่วนเพื่อใช้สำหรับการ วัดและสร้างแบบจำลองการต่อลงดิน

1.5.3 สามารถนำแบบจำลองการต่อลงดินของโครงสร้างทางยกระดับแบบขั้วส่วนมา ประยุกต์ใช้กับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วงเหนือ)

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท 4 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ตลอดจนขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการสำรวจสืบค้น จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ และการนำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ ทฤษฎีเกี่ยวกับวงจรย้อนกลับและการต่อลงดิน วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง กระแสรั่วไหลกักกร่อน การประเมินกระแสรั่วไหลตามมาตรฐานมาตรฐาน EN 50122 และวิธีป้องกันกระแสรั่วไหลกักกร่อน

บทที่ 3 นำเสนอการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลลงดินด้วยวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวและจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองสถานการณ์รถไฟขบวนเดียวเพื่อหาศักย์ไฟฟ้าที่ราง โดยที่ศักย์ไฟฟ้าที่รางอาจเป็นอันตรายต่อความปลอดภัยของบุคคลเกี่ยวกับแรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้สำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงตามมาตรฐาน EN 50122-1

บทที่ 5 กล่าวถึงชุดทดสอบทางรถไฟที่เป็นโครงสร้างทางยกระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วนสำหรับการทดสอบการตรวจวัดกระแสรั่วไหล และการสร้างและปรับปรุงแบบจำลองตัวต้านทานโดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink

บทที่ 6 กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โครงสร้างรถไฟฟ้ามหานคร สายคลองรัชธรรม (สายสีม่วงเหนือ) เพื่อใช้สำหรับการประเมินกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นตามมาตรฐาน EN 50122

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะพร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ

ภาคผนวก ก. ชุดทดสอบโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วน

ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบกระแสรั่วไหล และการวัดค่าความต้านทาน

ภาคผนวก ค. ชุดต้นแบบระบบตรวจจับกระแสรั่วไหล

ภาคผนวก ง. เป็นการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในขณะดำเนินการศึกษา

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือศึกษาและทำการตรวจสอบการประเมินกระแสรั่วไหลของรถไฟฟ้าสายสีม่วงที่ได้ออกแบบมาไว้แล้ว เพื่อตรวจสอบว่าเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่โดยมีการพัฒนาแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าสายสีม่วงเหนือ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เคยมีการใช้งานมาก่อน จากผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณณนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอันได้แก่ฐานข้อมูลจาก IEEE IEE และ Science Direct เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับวิทยานิพนธ์นี้ และการศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยมีความสำคัญมากในการดำเนินงาน เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจ ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ทฤษฎีเกี่ยวกับวงจรย้อนกลับและการต่อลงดิน ประเภทของวงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง กระแสรั่วไหลกักคร่อน การประเมินกระแสรั่วไหลตามมาตรฐานโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน EN 50122 ซึ่งให้ข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการประเมินกระแสรั่วไหล นอกจากนี้ยังมีวิธีการวัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับกระแสรั่วไหลและการประมาณค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลรวมถึงการป้องกันต่อกระแสรั่วไหลกักคร่อน โดยจะกล่าวถึงส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างต่อการดำเนินงานวิจัยนี้ เพื่อความกระชับและชัดเจนของเนื้อหา

2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาการประเมินกระแสรั่วไหลตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางโดยจัดลำดับ การเรียบเรียงจากงานที่มีผู้ได้ดำเนินการก่อนไปสู่งานที่ใหม่กว่า ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2001	Pham, Thomas and Stinger	ได้กล่าวถึงแบบจำลองกระแสรั่วไหลที่มีการกระจายความต้านทานจากทางรถไฟไปยังดินอย่างสม่ำเสมอ (uniformly distributed track-to-earth resistances) และ การใช้แบบจำลองขั้วไฟฟ้าทรงกลม (spherical electrode model) เพื่อวิเคราะห์กระแสรั่วไหลเมื่อนวนทางรถไฟเกิดความเสียหาย
2001	Lee and Wang	ได้มีการพัฒนาแบบจำลองการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลสำหรับการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ขั้วเคลื่อนด้วยวิธีการไม่ต่อลงดิน (ungrounded) ต่อลงดินโดยตรง (solidly grounded) และต่อลงดินด้วยไดโอด (diode-grounded) โดยใช้แบบจำลองวงจรสมมูลของสายส่ง
2003	Ardizzon, Pinato and Zaninelli	ได้นำเสนอแบบจำลองการคำนวณกระแสรั่วไหลสำหรับสถานีไฟฟ้าขั้วเคลื่อนที่ไม่มีการต่อลงดิน (floating substation) ในรูปแบบวงจรโครงข่ายตัวต้านทานและหาผลเฉลยใช้เทคนิค sparse tableau method
2005	Chien	ได้ประเมินค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงสุดที่เพิ่มขึ้นในตัวนำที่ไหลย้อนกลับไปยังสถานีไฟฟ้าขั้วเคลื่อนที่เกิดจากกระแสรั่วไหลในรถไฟฟ้ามหานครสายสีแดง
2006	Lee and Lu	ได้มีการพัฒนาแบบจำลองการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลที่ประกอบไปด้วยสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขั้วเคลื่อน 3 สถานีและมีรถไฟ 2 ขบวน
2007	Mu and Zhouwei	ได้ใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลโดยใช้วิธีพารามิเตอร์แบบกระจายโดยใช้โครงข่ายตัวต้านทานของแบบจำลองสายส่ง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

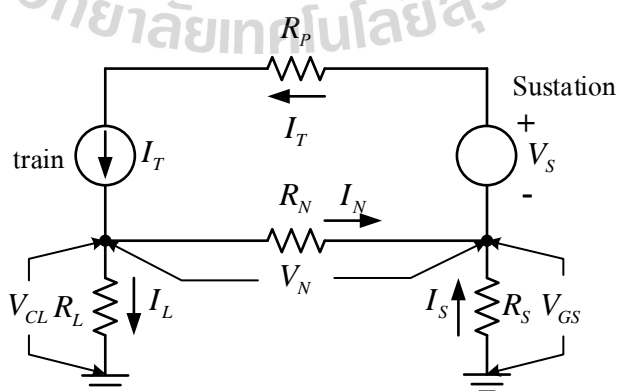
ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2008	Alamuti, Nouri and Jamali	ได้กล่าวถึงการลดกระแสรั่วในโครงการรถไฟฟ้า Tehran Metro Line3 (Iran) ในระบบที่มีการต่อลงดินผ่านไดโอดแบบกลับทิศทาง และการจำลองผลรถไฟหลายขบวนโดยใช้โปรแกรม MTS และ MATLAB
2012	Mariscotti, Reggiani, Ogunsola and Sandrolini	ได้นำเสนอการออกแบบเพื่อลดการรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากกระแสรั่วไหลของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงในรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีแดงของดูไบ และมีการวิเคราะห์และการประเมินกระแสรั่วไหลตามมาตรฐาน EN 50122-2
2012	Ogunsola, Mariscotti, and Sandrolini	ได้นำเสนอแบบจำลองพารามิเตอร์แบบกระจาย (distributed parameter) สำหรับทำนายปรากฏการณ์ของศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลโดยได้คำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่ประกอบขึ้นโดยเฉพาะทางยกระดับบนเสาที่ติดตั้งบนทางรถไฟกับตาข่ายกับดักกระแสรั่วไหล
2013	Valero and Sanz	ได้นำเสนอแบบจำลองพารามิเตอร์แบบกระจายเพื่อคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลโดยคำนึงถึงด้านข้างของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและรถไฟแบบจำลองนี้สามารถแจกแจงกระแสรั่วไหลและแรงดันไฟฟ้าที่รางในจุดที่รถไฟอยู่หรือในจุดที่ลัดวงจรที่ตำแหน่งใดๆ
2013	Fichera , Mariscoti, Ogunsola and Sandrolini	ได้นำเสนอแบบจำลองการคำนวณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในโครงสร้างอุโมงค์และท่อที่ฝังอยู่ใต้ดินในรูปวงจรโครงข่ายตัวต้านทานแบบ 4 ชั้น โดยใช้แบบจำลองพารามิเตอร์แบบกระจาย (distributed parameter: DP) และแบบจำลองพารามิเตอร์แบบกลุ่มก้อน (lump parameter: LP)

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

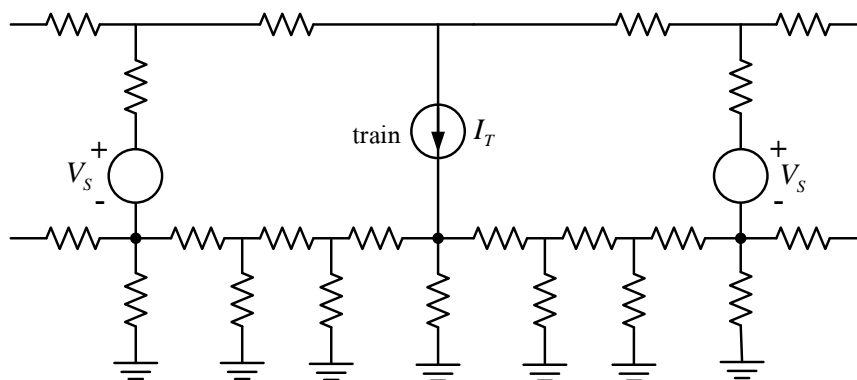
ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2013	Fichera, Mariscotti and Ogunsola	ได้นำเสนอแบบจำลองกระแสรั่วไหลในรูปวงจรโครงข่ายตัวต้านทาน โดยใช้แบบจำลองพารามิเตอร์แบบกลุ่มร่วมกับ Matlab GUI ในการคำนวณเบื้องต้น และได้พิจารณาความแตกต่างและผลกระทบของแบบจำลองดินที่สม่ำเสมอหรือหลายชั้นดิน
2013	Xu, Li and Wang.	ได้นำเสนอการคำนวณ ศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลที่มีการต่ออุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน (OVPD) ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน แบบจำลองนี้จะใช้วงจรสมมูลของสายส่งที่มีโครงข่ายตัวต้านทานแบบสองชั้น
2014	Ramos, Leal, Rios and Roa	ได้นำเสนอแบบจำลองรถไฟฟ้าหลายขบวนเพื่อจำลองผลของแรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลในระบบการต่อลงดิน โดยใช้แบบจำลองวงจรสมมูลของสายส่ง
2015	Jabbehdari, and Mariscotti	ได้นำเสนอแบบจำลองของกระแสรั่วไหลสำหรับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ไม่มีการต่อลงดินในรูปวงจรโครงข่ายตัวต้านทานของหลายชั้นดินโดยใช้วิธีรูปภาพ 3 มิติและหาคำตอบโดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ร่วมกับการคำนวณด้วยวิธี sparse tableau method
2015	František J., Milan K.	ได้นำเสนอแบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ไม่มีการต่อลงดินทางไฟฟ้าและต่อลงดินโดยตรงในรูปวงจรโครงข่ายตัวต้านทานแบบ 2 มิติ โดยใช้โปรแกรม Matlab&Simulink โดยพิจารณาการจำลองผลในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลอง 3 มิติ (CDEGS 3-D modeling software)
2016	Guifu, Dongliang, Guoxin, Chonglin and Jianhua	ได้นำเสนอแบบจำลองกระแสรั่วไหลในกรณีรถไฟหลายขบวนที่มีการพิจารณาโครงสร้างใต้ดิน โดยใช้แบบจำลองวงจรสมมูลของสายส่ง

จากวรรณกรรมและงานวิจัยที่ได้สรุปผ่านมามีสามารถช่วยให้ผู้ที่ดำเนินการศึกษาหรือพัฒนาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้พอมองภาพออกอย่างกว้าง ๆ ว่ามีคณณักวิจัยใดได้ศึกษาสิ่งใดไปแล้วบ้าง แต่ยังไม่สามารถแยกเป็นหมวดหมู่ตามวิธีการดำเนินงานศึกษาได้อย่างชัดเจนดังนั้นในส่วนถัดไปนี้ จึงได้ทำการเรียบเรียงและคัดสรรงานวิจัยหลัก ๆ ที่สำคัญและมีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัดจากหลาย ๆ ผลงานที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1 โดยจะได้กล่าวถึงการนำทฤษฎีหลักการและวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการประเมินกระแสรั่วไหลสำหรับโครงการรถไฟฟาสายสีม่วงและยังมีการเสริมถึงผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนั้นๆ โดยย่อ ดังนี้

ในงานวิจัยของ Pham, Thomas and Stinger (2001) ในส่วนแรกได้กล่าวถึงแบบจำลองกระแสรั่วไหลในอุดมคติที่มีการกระจายความต้านทานจากทางรถไฟไปยังดินอย่างสม่ำเสมอ (uniformly distributed track-to-earth resistances) โดยใช้วงจรพื้นฐานของแบบจำลองกระแสรั่วไหลดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน (V_S) ที่ต่ออนุกรมกับ R_S จ่ายกระแสไฟฟ้า (I_T) แก่รถไฟผ่าน R_P และกระแสไหลย้อนกลับ (I_N) ผ่านรางวิ่ง R_N ไปยังสถานีไฟฟ้าโดยที่ระบบมีค่าความต้านทานระหว่างวิ่งกับดินเป็น R_L เมื่อ V_{GS} คือ แรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่ง I_S คือ กระแสรั่วไหลที่ไหลกลับเข้าสู่สถานีไฟฟ้า V_{CL} คือ แรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่ง และ I_L คือ กระแสรั่วไหลลงดิน รวมถึงการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองผลโดยใช้แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากนั้นได้ขยายแบบจำลองเพื่อรวมโครงสร้างโลหะที่ฝังอยู่ใต้ดินในบริเวณใกล้เคียงกับทางรถไฟโดยใช้ทฤษฎีสถาน (field theory) เพื่อคำนวณความชันของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสที่ราง และในส่วนที่สองได้กล่าวถึงแบบจำลองกระแสรั่วไหลเมื่อเกิดความเสียหายโดยไม่ได้ตั้งใจของฉนวนทางรถไฟ จุดที่เกิดความเสียหายของฉนวนรองรางประมาณได้โดยใช้แบบจำลองขั้วไฟฟ้าใต้ดินแบบทรงกลม

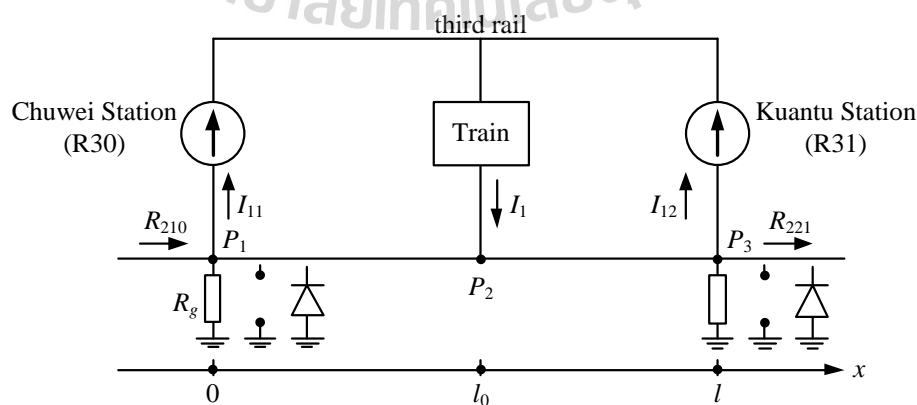


รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานของแบบจำลองกระแสรั่วไหล



รูปที่ 2.2 แบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

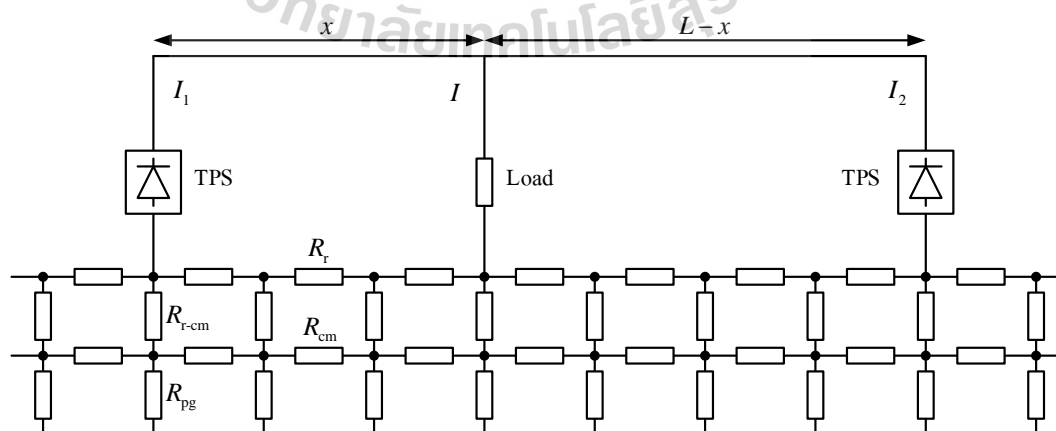
ในงานวิจัยของ Lee and Wang (2001) ได้พิจารณาผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลในกรณีที่มีการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแตกต่างกันเช่น ไม่ต่อลงดิน ต่อลงดินโดยตรง และต่อลงดินด้วยไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไทเป การจำลองผลจะใช้รูปร่างทั่วไปของกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน (typical profile of the traction power) สำหรับรถไฟฟ้าที่วิ่งอยู่ในระหว่างสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนทั้งสอง โดยที่การจำลองผลจะเป็นการจำลองผลที่เวลาใด ๆ การใช้งานจริงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไทเปได้ใช้วิธีการต่อลงดินผ่านไดโอดแต่จากผลการจำลองพบว่าวิธีการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนโดยไม่มีการต่อลงดินเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด Lee and Lu (2006) ได้ใช้วิธีการเดียวกันแต่เพิ่มระบบทดสอบสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน 3 สถานีและมีรถไฟฟ้า 2 ขบวนซึ่งรถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะอยู่ระหว่างสถานีไฟฟ้าทั้งสอง



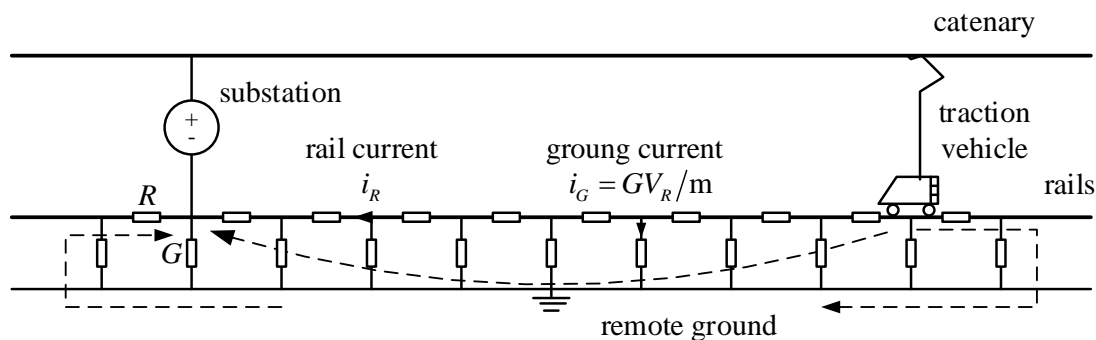
รูปที่ 2.3 การต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

ต่อมาได้มีการคำนวณกระแสรั่วไหลตามมาตรฐาน EN 50 122-2 ดังแสดงในงานวิจัยของ Mariscotti et al. (2012) ได้นำเสนอการประเมินการออกแบบเพื่อลดการรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยกระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการประเมินตามมาตรฐาน EN 50122-2 โดยการวัดและคำนวณค่าความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดิน และยังได้ทำการตรวจวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและคำนวณกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟใต้ดินสายสีแดงของคูไบ

หลังจากนั้นได้มีการสร้างแบบจำลองการคำนวณกระแสรั่วด้วยกัน 2 วิธี คือ แบบจำลองพารามิเตอร์แบบกระจาย (distributed parameter: DP) และแบบจำลองพารามิเตอร์แบบกลุ่ม (lump parameter: LP) ในแบบจำลอง DP จะเป็นแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนเช่นแบบจำลองที่มีรถไฟขบวนเดียวสถานีไฟฟ้าเดียวและคู่ ดังแสดงในงานวิจัยของ Ogunsola, Mariscotti and Sandrolini (2012) ได้นำเสนอแบบจำลองพารามิเตอร์แบบกระจายสำหรับทำนายศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหล โดยใช้แบบจำลองทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยแบบจำลองได้คำนึงถึงค่าความต้านทานตามแนวความยาวและความต้านทานฉนวนตามแนวตั้งขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่ประกอบขึ้นโดยเฉพาะทางยกระดับบนเสา ร่วมกับการติดตั้งทางรถไฟกับตาข่ายคอนกรีตกระแสรั่วไหล และยังได้วิเคราะห์กระแสที่ไหลเข้าไปในองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตำแหน่งรถไฟต่างกันและแรงดันไฟฟ้าที่ผิวท่อ และงานวิจัยของ Valero and Sanz (2013) ได้นำเสนอแบบจำลองพารามิเตอร์แบบกระจายเพื่อคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลที่มีการวิเคราะห์ผลกระทบด้านข้างของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและรถไฟแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้จะช่วยให้สามารถแจกแจงกระแสรั่วไหลและแรงดันไฟฟ้าที่รางในจุดที่รถไฟอยู่หรือในจุดที่ลัดวงจรที่ตำแหน่งใดๆ และยังสามารถคำนวณผลกระทบระยะไกลได้ที่จุดอื่น ๆ ตามรางรถไฟ โดยได้ตรวจสอบความถูกต้องแล้วว่าเป็นไปตามสมการในมาตรฐาน EN 50122-2 ภาคผนวก C.1

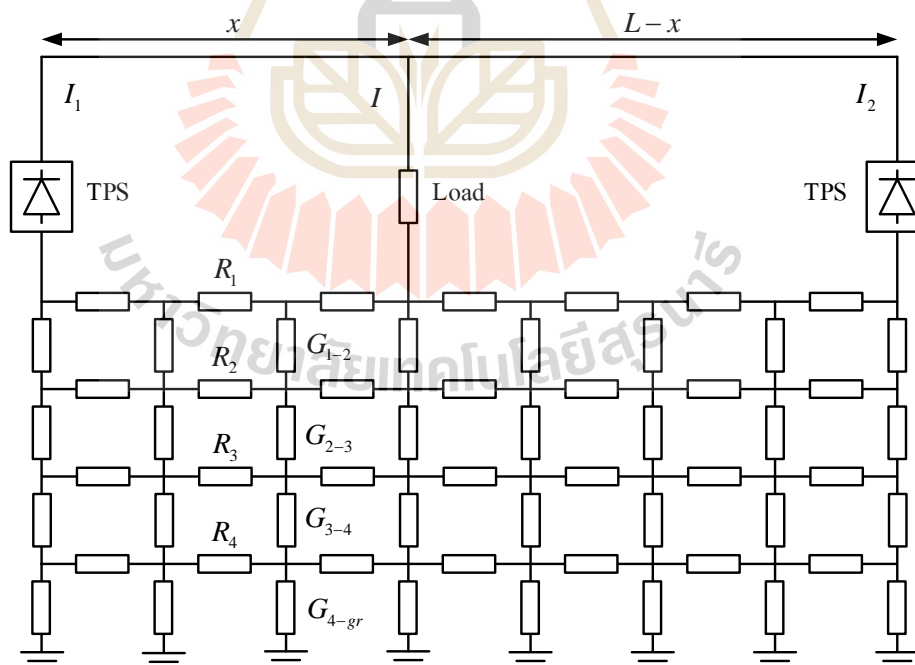


รูปที่ 2.4 แบบจำลองทั่วไปของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนสองด้าน



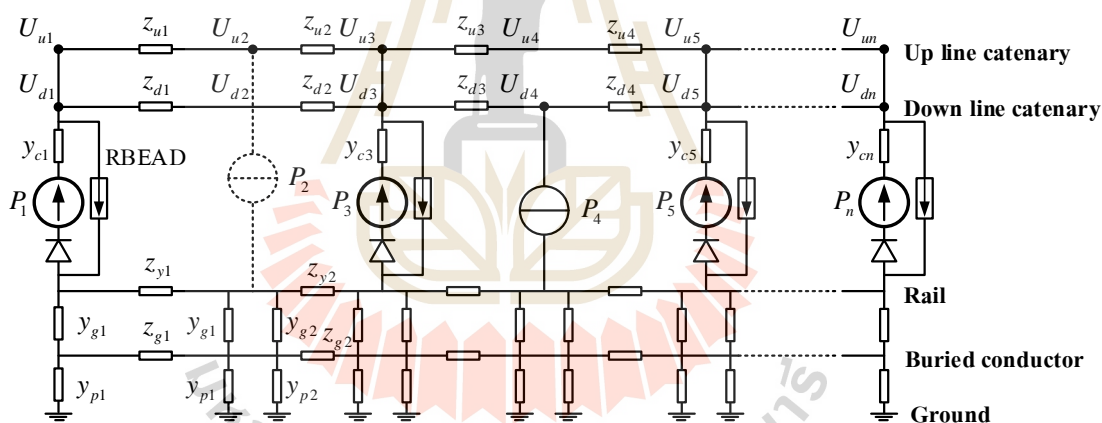
รูปที่ 2.5 แบบจำลองการคำนวณกระแสรั่วไหลที่พิจารณาผลกระทบด้านข้าง

ส่วนในแบบจำลอง DP จะเป็นแบบจำลองที่สามารถพิจารณาระบบที่ซับซ้อนได้ดังแสดงในงานวิจัยของ Fichera, Mariscotti and Ogunsola (2013) ได้นำเสนอแบบจำลองกระแสรั่วไหลในแบบจำลองวงจรโครงข่ายตัวต้านทานดังรูปที่ 2.6 โดยใช้แบบจำลองพารามิเตอร์แบบกลุ่มก้อนร่วมกับ Mathlab GUI ในการคำนวณเบื้องต้น และได้พิจารณาความแตกต่างและผลกระทบของแบบจำลองดินที่สมำเสมอ



รูปที่ 2.6 แบบจำลองที่มีการต่อลงดิน 4 ชั้น

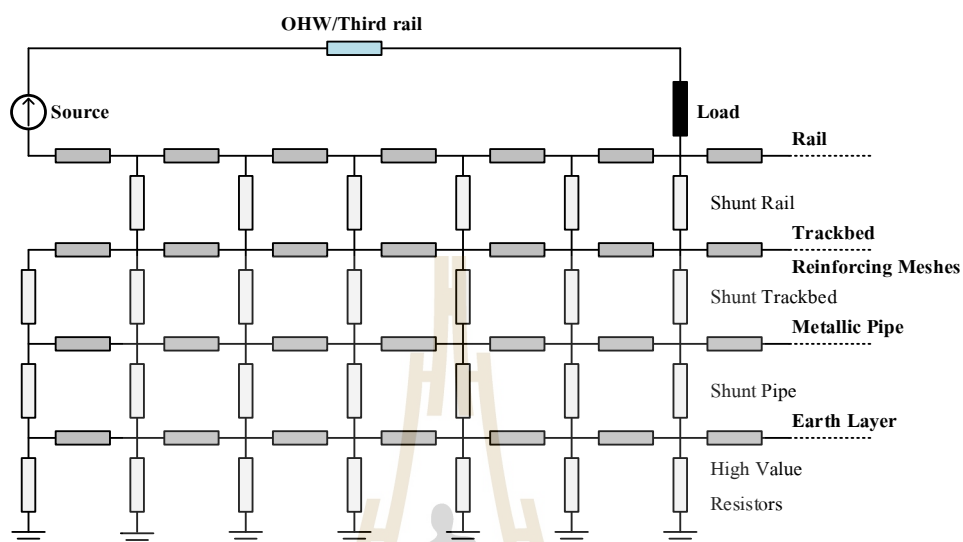
และยังมีการเปรียบเทียบแบบจำลอง DP และ LP ดังแสดงในงานวิจัยของ Fichera et al. (2013) ได้นำเสนอแบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับการคำนวณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในโครงสร้างอุโมงค์และท่อที่ฝังอยู่ใต้ดินในแบบจำลองโครงข่ายตัวต้านทานในรูปที่ 2.6 โดยใช้แบบจำลอง DP และ LP โดยแบบจำลอง DP เป็นแบบจำลองที่คำนวณด้วยวิธีการคำนวณสายส่งและแบบจำลอง LP เป็นแบบจำลองที่คำนวณด้วยวิธี STM (sparse tableau method) และยังรวมถึงการจำลองรถไฟหลายขบวน (multi-train model) โดยใช้แบบจำลองวงจรสมมูลของแบบจำลองสายส่งแทนเนื่องจากง่ายและลดความซับซ้อนในการคำนวณดังแสดงในงานวิจัยของ Ramos et al. (2014) ได้นำเสนอแบบจำลองรถไฟหลายขบวนเพื่อจำลองผลของแรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลในระบบการต่อลงดินที่ต่างกัน โดยพิจารณาการต่อลงดินแบบผ่านตัวต้านทาน ไม่ต่อลงดิน และต่อลงดินผ่านไดโอด และ Guifu et al. (2016) ได้นำเสนอแบบจำลองกระแสรั่วไหลในกรณีรถไฟหลายขบวนที่มีการพิจารณาโครงสร้างใต้ดิน โดยใช้แบบจำลองวงจรสมมูลของสายส่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



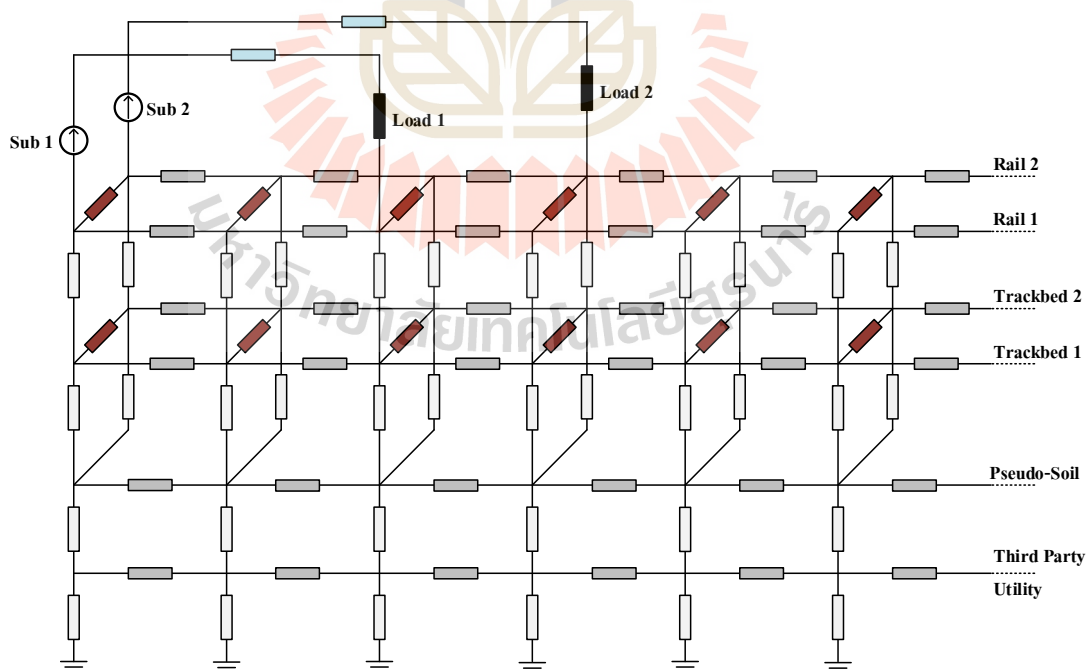
รูปที่ 2.7 แบบจำลองสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

นอกจากนี้ยังมีการจำลองกระแสรั่วไหลโดยใช้แบบจำลอง 3 มิติดังแสดงในงานวิจัยของ Charalambous, Cotton and Aylott (2008) ได้นำเสนอแบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ไม่มีการต่อลงดินที่เป็นทางรถไฟเดี่ยวและทางรถไฟคู่ในรูปแบบของวงจรโครงข่ายตัวต้านทานแบบ 4 ชั้น แสดงดังรูปที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับและหาคำตอบโดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ โนดเปรียบเทียบกับ โปรแกรม CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis) โดยที่ CDEGS เป็นโปรแกรมจำลองแบบ 3 มิติ

แสดงการจำลองในกรณีสถานะคงที่และสถานะพลวัต ซึ่งทั้งสองวิธีให้ผลใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 2.8 โครงข่ายตัวต้านทานสำหรับราง หมอนรองทางรถไฟ และท่อโลหะ



รูปที่ 2.9 โครงข่ายตัวต้านทานสำหรับทางรถไฟคู่

ต่อมา Anton, František and Milan (2015) ได้นำเสนอแบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับ สถานีไฟฟ้าย่อยที่ไม่มีการต่อลงดินทางไฟฟ้าและต่อลงดินโดยตรงในรูปวงจร โครงข่ายตัวต้านทาน แบบ 2 มิติ โดยใช้โปรแกรม Matlab&Simulink โดยพิจารณาการจำลองผลในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลอง 3 มิติ (CDEGS 3-D modeling software)

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ทฤษฎีที่เกี่ยวกับ วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินและการประเมินความประเทภของวงจรย้อนกลับและการต่อลงดิน ของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง กระแสรั่วไหลกักต่อนและการประเมินกระแสรั่วไหลตาม มาตรฐานโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน EN 50122 ซึ่งให้ข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการประเมินกระแสรั่วไหลดัง แสดงในรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.1 วงจรย้อนกลับและการต่อลงดิน

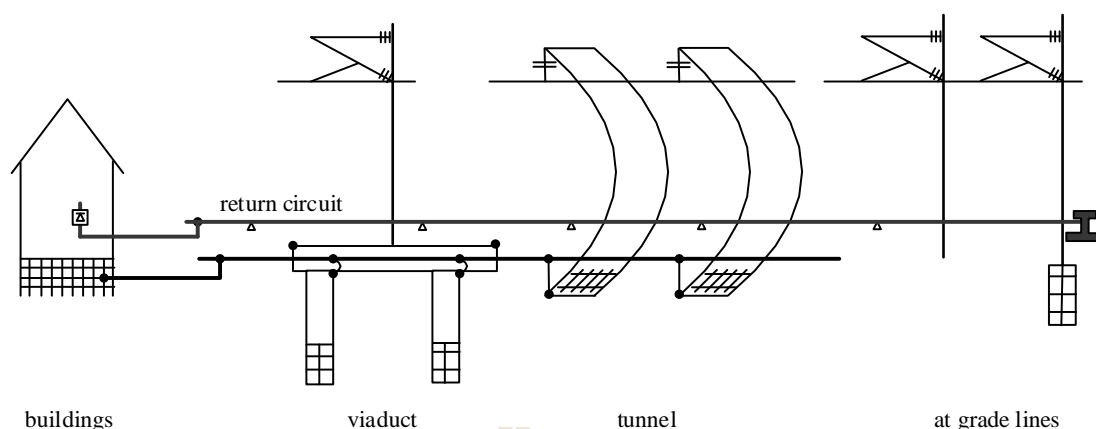
รถไฟฟ้าก็เหมือนกับรถไฟธรรมดาเพียงแต่ต่างกันตรงที่รถไฟฟ้าไม่มี เครื่องยนต์ต้นกำลัง (prime mover) เหมือนเครื่องจักรไอน้ำหรือเครื่องยนต์ดีเซลที่ติดตั้งอยู่บนตัวรถ เหมือนรถไฟธรรมดา รถไฟฟ้าใช้พลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า ดังนั้นการเดินรถไฟฟ้าจึงต้องมีการ สร้างสถานีจ่ายกระแสไฟฟ้าย่อย (sub-station) เพื่อลดแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจากระบบสายส่ง ไฟฟ้าแรงสูงให้ลงมาอยู่ในระดับที่เหมาะสมเสียก่อน กระแสไฟฟ้าที่ลดแรงดันแล้วจึงจะถูกนำมาส่ง เข้าระบบการป้อนกระแสไฟฟ้า (feeding system) เพื่อนำไปใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟ (นคร จันทรม, 2555)

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟมีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบกระแสตรง (direct Current: DC) และระบบกระแสสลับ (alternating current: AC) ส่วนระบบการป้อนกระแสไฟฟ้า เพื่อใช้ขับเคลื่อนรถไฟมี 2 ระบบ คือ ระบบการใช้รางที่สาม (third rail system) และระบบการใช้ สายส่งเหนือศีรษะ (overhead wire system) ระบบรางที่สามมีข้อดีในเรื่องของผลกระทบต่อด้านมลพิษ ทางสายตา ไม่มีโครงสร้างของระบบป้อนกระแสไฟฟ้าที่รุงรังอยู่เหนือรางรถไฟ แต่มีข้อจำกัดใน การใช้งานและด้านความปลอดภัย ระบบนี้จึงมักใช้กับรถไฟใต้ดินหรือระบบขนส่งมวลชนที่อยู่ใน เมือง สำหรับระบบสายส่งเหนือศีรษะ จะมีโครงสร้างของระบบป้อนกระแสไฟฟ้าที่รุงรังอยู่เหนือ ราง ไม่น่าดู มักใช้กับการเดินรถไฟทางไกล ขบวนรถวิ่งเร็วซึ่งต้องการติดตั้งระบบเดินรถไฟที่ ใช้แรงดันสูง ไม่สามารถใช้ระบบรางที่สามได้ (นคร จันทรม, 2555) ในหัวข้อนี้จะเน้นไปทางด้าน กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งประกอบไปด้วยวงจรย้อนกลับและการต่อ ลงดิน การเกิดกระแสรั่วไหล และการประเมินกระแสรั่วไหลโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วงจรย้อนกลับกระแสและการต่อลงดินของระบบระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า (Friedrich et al., 2009) กระแสขับเคลื่อนไหลกลับไปยังสายป้อนสถานีไฟฟ้าโดยตรงผ่านวงจรย้อนกลับ จากมุมมองทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า การจ่ายไฟฟ้าและวงจรย้อนกลับถือว่าเป็นส่วนที่ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ โดยที่รูปแบบทั่วไปของรางวิ่งจะเป็นวงจรย้อนกลับของระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสสลับ และกระแสตรง ดังนั้นมาตรการต่อลงดินและการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าถูกนำไปใช้กับวงจรย้อนกลับ อย่างไรก็ตามก็มีพื้นฐานที่แตกต่างกัน ในระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสตรงรางวิ่งจะวางบนทางวิ่งที่มีความต้านสูงระหว่างรางวิ่งไปยังดินหรือระบบดิน เพื่อหลีกเลี่ยงกระแสย้อนกลับที่ไหลออกจากรางวิ่ง หรือเรียกว่ากระแสรั่วไหลซึ่งเป็นสาเหตุของกระแสรั่วไหลกั๊กกร่อนในส่วนประกอบของโลหะที่มีการสัมผัสใกล้ชิดกับดิน เช่น ท่อลำเลียงน้ำมัน ท่อสายเคเบิล โครงสร้างพื้นฐานเหล็กเสริมแรงของอาคารหรือเสา โครงสร้างอุโมงค์เสริมแรง สะพานและสะพานคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีความเสี่ยง การแยกจากกันอย่างสมบูรณ์ของวงจรย้อนกลับจากระบบดินแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.10 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่เกิดขึ้นในรางวิ่งตลอดสายเป็นสาเหตุของแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางไปยังดินในช่วงเวลาการทำงานปกติและในกรณีเกิดการลัดวงจร เนื่องจากไม่ปรากฏการเชื่อมต่อลงดินทำให้เกิดความเสี่ยงที่แรงดันไฟฟ้าที่ยอมให้สัมผัสได้จะมากกว่าในกรณีที่มีกระแสไฟฟ้าสูงหรือการจ่ายไฟในระยะไกล อันตรายที่เกิดขึ้นบนเส้นทางพื้นผิวที่เปิดโล่งบนดินและในอุโมงค์ บนทางยกระดับคอนกรีต และในสถานีและสถานีไฟฟ้าย่อยกับโครงสร้างการต่อลงดิน

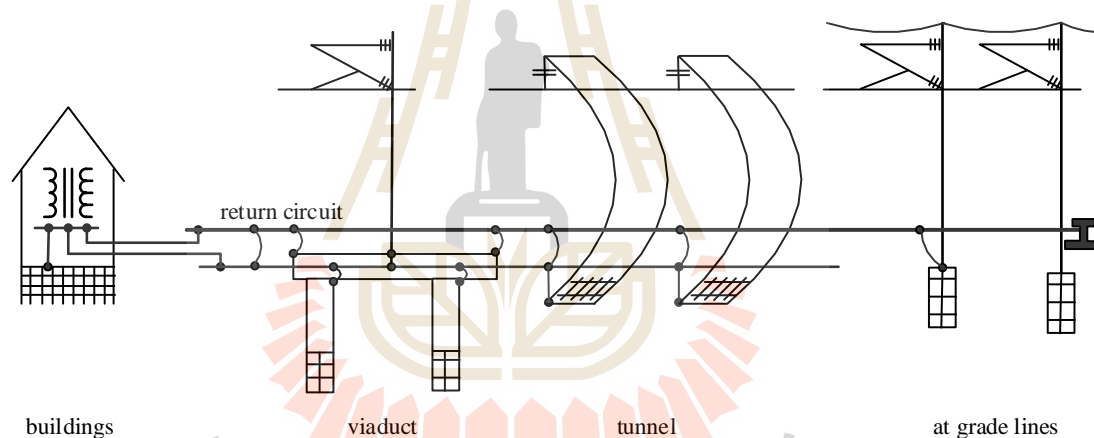
นอกเหนือไปจากแรงดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นในรถไฟไฟฟ้ากระแสตรงแล้วในระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสสลับก็เป็นสาเหตุของแรงดันตกคร่อมเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้นด้วย พร้อมกับการจ่ายไฟ ระยะไกลจะพบว่าทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงมากกว่ารถไฟไฟฟ้ากระแสตรง ถึงแม้ว่ากระแสไฟฟ้าขณะทำงานมีปริมาณน้อยก็ตาม การจำกัดค่าแรงดันไฟฟ้าไปยังค่าที่ยอมรับได้มีความจำเป็นต่อการเชื่อมต่อวงจรย้อนกลับไปยังดิน นั่นคือ การเชื่อมต่อรางวิ่งพร้อมด้วยตัวนำย้อนกลับตามรางในสถานีไฟฟ้า รูปที่ 2.11 แสดงการเชื่อมต่อที่จำเป็นระหว่างวงจรย้อนกลับและระบบการต่อลงดินสำหรับรถไฟไฟฟ้ากระแสสลับ

การต่อลงดินของรางวิ่งจะเป็นอิสระจากการจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับมากกว่าวงจรย้อนกลับ กระแสไหลผ่านการติดตั้งการต่อลงดินของอาคารและผ่านไปยังดิน ถึงแม้ว่าการเชื่อมต่อลงดินของวงจรย้อนกลับ กระแสไฟฟ้าได้สร้างความเหนี่ยวนำที่ไม่พึงประสงค์และการแทรกสอดของสนามแม่เหล็กต่ออุปกรณ์ใกล้เคียงกับสายรถไฟไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง

ดัดแปลงจาก: Friedrich et al., (2009)



รูปที่ 2.11 วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ

ดัดแปลงจาก: Friedrich et al., (2009)

ตามมาตรฐาน EN 50122-2 (2010) ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างหนึ่งรางรถไฟกับดินจะต้องไม่น้อยกว่า 0.5 S/km ในส่วนของอุโมงค์สามารถทำได้โดยการออกแบบที่เหมาะสมและวัสดุฉนวนของการยึดเหนี่ยวรางที่มีความเป็นฉนวนจากดินสังเกตได้จากอุปกรณ์ทั้งหมดที่เชื่อมต่อกับรางวิ่ง

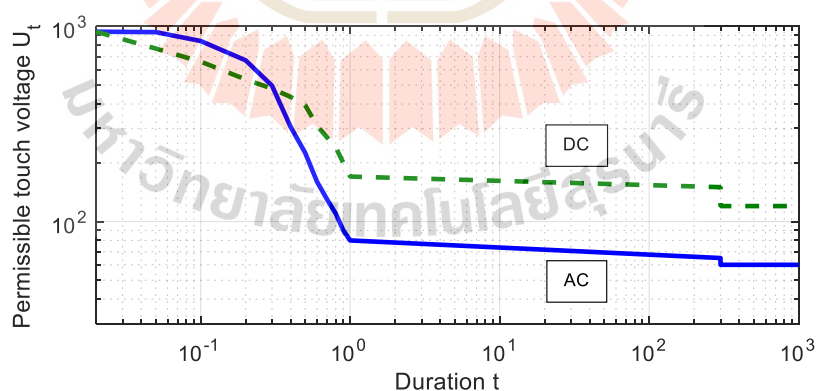
1. การป้องกันความปลอดภัยต่อไฟฟ้าช็อต

การป้องกันความเสี่ยงจากไฟฟ้าช็อตต่อมนุษย์มีความสำคัญสูงสุดเพื่อรับประกันความปลอดภัยของบุคคล แรงดันสัมผัสในระหว่างการทำงานปกติและในสถานการณ์ที่เกิดความผิดปกติจะต้องไม่เกินแรงดันไฟฟ้าที่ยอมให้ผ่านได้ตามมาตรฐาน EN 50122-1 เพื่อตอบสนองเกณฑ์

การป้องกัน วงจรย้อนกลับจะต้องนำกระแสไฟฟ้าขับเคลื่อนและกระแสจากการเบรก (regenerative braking) เช่นเดียวกับกระแสลัดวงจรในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยด้วยค่าอิมพีแดนซ์และแรงดันรางในแนวความยาวต่ำ ด้วยเหตุนี้การจำกัดศักย์ไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งไปยังดินและความต้องการกำหนดแรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ยอมให้ผ่านได้ที่ระบุไว้ในมาตรฐาน EN 50122-1 เพื่อป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าช็อตสำหรับมนุษย์บนพื้นฐานการพิจารณาครอบคลุมถึงค่าความต้านทานทางร่างกายและกระแสที่มีผลกระทบต่อร่างกาย มาตรฐานกล่าวถึง การกำหนดค่าที่แตกต่างกันสำหรับแรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้เนื่องจากพิจารณาองศาที่แตกต่างกัน จนวนของแต่ละพื้นที่และค่าอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นที่ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ (Friedrich et al., 2009) รูปที่ 2.12 แสดงแรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้สำหรับการประยุกต์ใช้กับรถไฟ

2. แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้

ในมาตรฐาน HD 637 S1 (Friedrich et al., 2009) ประยุกต์ใช้สำหรับการติดตั้งในระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแรงดันระดับสูงและระดับกลางที่เป็นส่วนหนึ่งของของสถานีไฟฟ้าของรถไฟ ในขณะมาตรฐาน EN 50122-1 ประยุกต์ใช้กับรถไฟ มาตรฐานเหล่านี้กำหนดแรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการไหลของกระแสที่เป็นสาเหตุของศักย์ไฟฟ้าที่ราง เสาและส่วนประกอบอื่น ๆ ในตารางที่ 2.2 ได้แสดงข้อมูลตามมาตรฐาน EN 50122-1 และในรูปที่ 2.12 แสดงแรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ U_t ระหว่างมือและเท้าทั้งสองของมนุษย์ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของผลกระทบที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน EN 50122-1



รูปที่ 2.12 แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ U_t ตามมาตรฐาน EN 50 122-1

ตารางที่ 2.2 แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ U_t ตามมาตรฐาน EN 50122-1

ระยะเวลา t s	แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ (permissible voltage)	
	ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ V	ระบบไฟฟ้ากระแสตรง V
0.02	940	940
0.05	935	770
0.1	842	660
0.2	670	535
0.3	497	480
0.4	305	435
0.5	225	395
0.6	160	310
0.7	130	270
0.8	110	240
0.9	90	200
1.0	80	170
≤ 300	65	150
permanent	60	30

การพิจารณาแรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน EN 50122-1 บนพื้นฐานของกระแสที่ยอมให้ผ่านร่างกายได้ (I_{C1}) และสอดคล้องกับแรงดันที่สามารถเข้าถึงได้ (U_{C1}) ตามมาตรฐาน IEC 60 479-1 (Friedrich et al., 2009) เส้นโค้ง C1 เป็นเส้นโค้งที่ให้เหมือนกับมาตรฐาน EN 50122-1 ภาคผนวก D ค่า I_{C1} ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของกระแส แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้และสามารถคำนวณหาได้ตามสมการที่ (2.1)

$$U_t = U_{C1} + R_A \cdot I_{C1} \cdot 10^{-3} \quad (2.1)$$

เมื่อ I_{C1} คือ กระแสไฟฟ้าในหน่วย mA

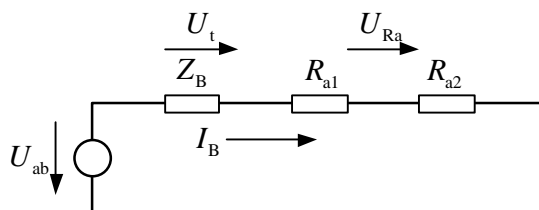
R_A คือ ค่าความต้านทาน R_{a1}

ตารางที่ 2.3 กระแสในร่างกายและแรงดันสัมผัสและแรงดันที่เข้าถึงได้ตามมาตรฐาน

EN 50 122-1 ภาคผนวก D

Duration t s	AC traction systems			DC traction systems		
	Body	Accessible	Touch	Body	Accessible	Touch
	current	voltage	voltage	current	voltage	voltage
	I_{C1} mA	U_{C1} V	U_t V	I_{C1} mA	U_{C1} V	U_t V
0.02	500	440	940	500	440	940
0.05	500	435	935	410	360	770
0.1	442	400	842	340	320	660
0.2	350	320	670	275	260	535
0.3	252	245	497	240	240	480
0.4	145	160	305	215	220	435
0.5	100	125	225	195	200	395
0.6	78	105	160	120	190	310
0.7	66	95	130	175	185	270
0.8	58	90	110	165	180	240
0.9	52	85	90	160	175	200
1.0	50	80	80	150	170	170

แรงดันขนาน (U_{ab}) มีความสัมพันธ์กับแรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้เท่านั้นถ้าใช้กับมือเปล่าและเท้า อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติวงจรใด ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อสัมผัสส่วนที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงมักจะมีค่าความต้านทานเพิ่มเข้ามาในวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.13 ตัวอย่าง สำหรับคนงานในพื้นที่รถไฟฟ้ามักจะมีเพิ่มความต้านทาน R_a ที่เป็นผลรวมของ R_{a1} (ตัวอย่างเช่นค่าความต้านทานของรองเท้า) เมื่อ Z_B คือ อิมพีแดนซ์ของร่างกาย I_B คือ กระแสที่ผ่านร่างกาย R_{a1} คือ ค่าความต้านทานของรองเท้า และ R_{a2} คือ ค่าความต้านทานเฉพาะที่ไปดิน



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของวงจรสัมผัส (Friedrich et al., 2009)

จากรูปที่ 2.13 สมมติว่ามีค่า $1000 \, \Omega$ สำหรับรองเท้าที่เปียกและ U_{C1} แรงดันที่สามารถเข้าถึงได้สอดคล้องกับ I_{C1} ข้อมูลที่เกี่ยวข้องแสดงในตารางที่ 2.3 แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ U_t สำหรับในช่วงเวลา $0.02 \leq t \leq 0.5s$ ที่ได้รับจากกระแสที่ยอมให้ผ่านร่างกายได้ I_{C1} ใช้สมการที่ (2.1) สำหรับในช่วงเวลา $0.5 \leq t \leq 1.0s$ ได้รับการแก้ไขเป็นเชิงเส้นระหว่าง U_t ที่ $0.5s$ และ $U_{C1} = 80 \, V$ และ $170 \, V$ สำหรับ $t = 1s$ ตามลำดับ ในโรงซ่อมบำรุงหรือพื้นที่เฉพาะจำกัดแรงดันไฟฟ้าเป็น $25 \, V$ สำหรับการติดตั้งไฟฟ้ากระแสสลับและ $60 \, V$ สำหรับการติดตั้งไฟฟ้ากระแสตรง (Friedrich et al., 2009)

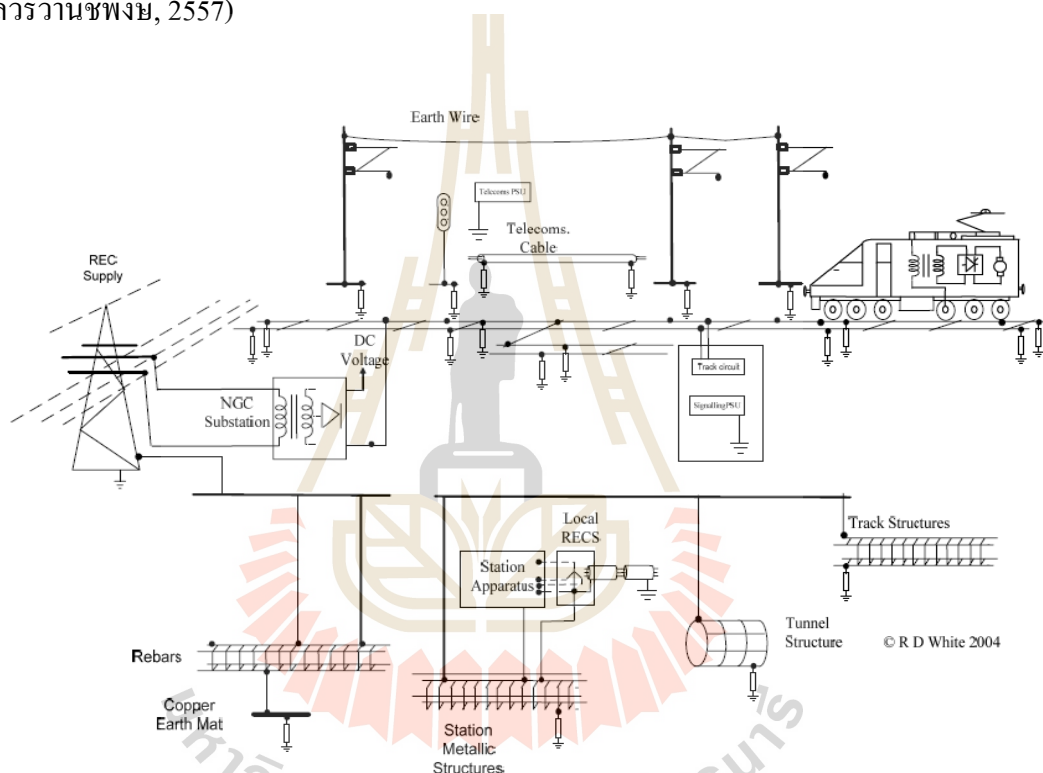
2.3.2 วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง มีใช้งานอยู่ 5 รูปแบบ ได้แก่ 1) ระบบฉนวนราง (rail insulation system: RIS) 2) ระบบต่อลงดินผ่านไดโอด (diode earthing system: DES) 3) ระบบกระแสย้อนกลับแบบลอย (floating negative return current system: FNRC) 4) ระบบดักขั้วรวบรวมกระแสสเตรย์ (stray current collecting net system: SCCNS) และ 5) ระบบรางที่ 4 (fourth rail system: FRS) มีรายละเอียดดังนี้

1. ระบบฉนวนราง

ระบบ RIS เป็นระบบการต่อลงดินของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ใช้ล่อรถไฟและรางวิ่งเป็นเส้นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปที่สถานีไฟฟ้า เนื่องจากระบบรถไฟฟ้าเดิมไม่มีการทำฉนวนไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับไม้หมอนรถไฟหรือส่วนที่รองรับรางวิ่งทำให้เกิดกระแสรั่วไหลไปยังส่วนอื่น ๆ ของโครงสร้างเกิดเส้นทางกระแสย้อนกลับอื่น ๆ ที่ซับซ้อนและสับสนยาก ทำให้รางวิ่งของรถไฟฟ้าที่สร้างใหม่จะมีการทำฉนวนไฟฟ้าในส่วนดังกล่าว ทำให้ลดการเกิดกระแสรั่วไหลและการกัดกร่อนของโครงสร้างที่เป็นโลหะ จากข้อกำหนดของมาตรฐาน EN 50122-2 ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว (conductance per unit length) ระหว่างรางวิ่งกับดิน (track-to-earth) ควรมีค่าไม่เกิน $0.5 \, S/km$ สำหรับโครงสร้างระบบแบบเปิด (open formation) และไม่เกิน $2.5 \, S/km$ สำหรับโครงสร้างระบบแบบปิด (closed formation) นอกจากนี้ยัง

เพิ่มการต่อเชื่อมลงดิน (earthing and bonding) ของส่วน โครงสร้างโลหะต่าง ๆ หรือโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็กของระบบเข้าด้วยกัน และต่อลงดิน ตามมาตรฐาน EN 50122-2 ดังแสดงในรูปที่ 2.14 รูปแบบนี้จะต้องมีการต่อเชื่อมรางวิ่งด้วยความต้านทานค่าต่ำ (low-resistance rail joint bonds) ตลอดความยาวของรางเพื่อลดแรงดันตกในราง โดยผลจากความต้านทานที่ต่อเชื่อมระหว่างรางวิ่งต้องทำให้ความต้านทานรางเพิ่มขึ้นไม่เกิน 5% (Friedrich et al., 2009) จากนั้นจะต้องต่อเชื่อมรางวิ่งของทั้งสองทางเข้าด้วยกันด้วยกรณีของรถไฟไฟฟ้าทางคู่ (double-track railway) รูปแบบนี้นิยมใช้งานกับระบบรถไฟกระแสตรงของสหราชอาณาจักร (รณัดชัย กุลรวานิชพงษ์, 2557)



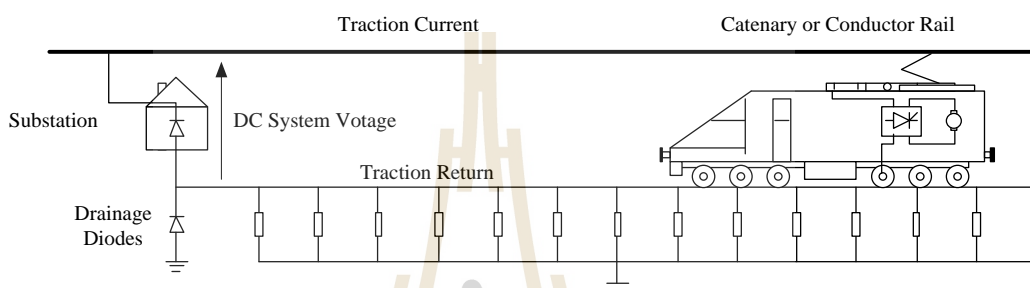
รูปที่ 2.14 การเชื่อมต่อลงดินของโครงสร้างในระบบรถไฟไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50122

ที่มา: มาตรฐาน EN 50122-1

2. ระบบต่อลงดินผ่านไดโอด

ระบบ DES จะใช้ไดโอด (drainage diode) ติดตั้งร่วมกับตัวนำลงดินที่สถานีไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.15 นอกจากนี้ในการติดตั้งจะมีอุปกรณ์อื่น ๆ ติดตั้งร่วมด้วย เช่น ตัวต้านทาน จำกัดกระแส (current limiting resistor) และกับดักเสิร์จ (surge arrestor) ถ้าไดโอดนำกระแสจะส่งผลให้แรงดันของรางวิ่งมีค่าเป็นศูนย์ ในกรณีไดโอดไม่นำกระแสหมายความว่าแรงดันที่รางจะมีค่าเป็นบวก รูปแบบที่ใช้ไดโอดนี้จะทำให้กระแสรั่วไหลมีค่าน้อย และถ้าหากเกิดกระแสรั่วไหล

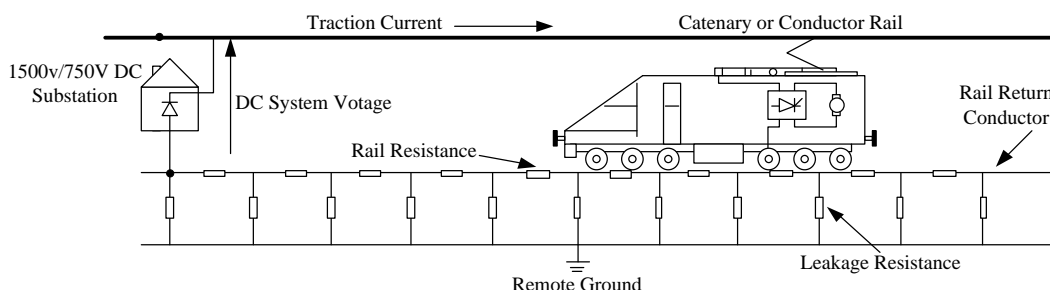
อันเนื่องมาจากความเสื่อมสภาพของการทำฉนวน ไดโอดจะทำหน้าที่นำกระแสรั่วไหลกลับสู่สถานีจ่ายไฟโดยตรง อย่างไรก็ตามการใช้ไดโอดต่อลงดินนี้จะเกิดปัญหาในกรณีที่มารถไฟฟ้าบางส่วนที่ทำการคืนพลังงานจากการเบรกเข้าสู่ระบบ (regenerative braking) จะเหนี่ยวนำให้รางวิ่งมีศักย์ไฟฟ้าติดลบไดโอดจะนำกระแสได้ในสถานการณ์นี้ ตัวอย่างระบบรถไฟฟ้าที่ติดตั้งการต่อลงดินด้วยรูปแบบนี้ ได้แก่ Hong Kong MTRC และ Sheffield Super Tram (ชนิดชัย กุลวรรณิขพงษ์, 2557)



รูปที่ 2.15 การต่อลงดินโดยใช้ไดโอด
ที่มา: ชนิดชัย กุลวรรณิขพงษ์ (2557)

3. ระบบกระแสย้อนกลับแบบลอย

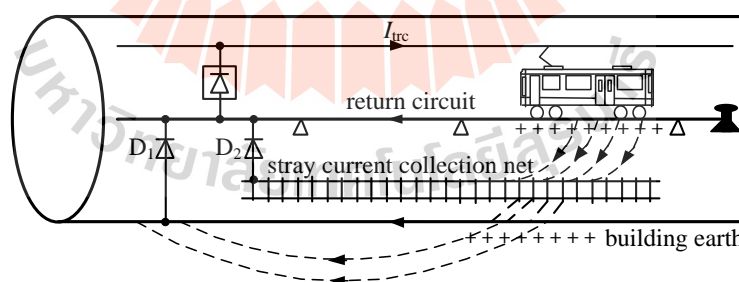
ระบบ FNRCs จะไม่ต่อขั้วลบสับบาร์ลงจากเอาต์พุตของสถานีเรียงกระแสลงดิน จะทำให้ที่สถานีไฟฟ้าไม่มีการต่อลงดิน ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วลบสับบาร์จะลอยอยู่และไม่จำเป็นต้องเท่ากับศูนย์ ทำให้รูปแบบนี้มีความเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันสัมผัสสูง (high touch voltage) ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานหรือต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยไม่ตั้งใจ ทำให้ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันที่รางวิ่ง (rail potential control device) เพิ่มเติม การติดตั้งรูปแบบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 ตัวอย่างของระบบรถไฟฟ้าที่ใช้การต่อลงดินด้วยวิธีนี้ ได้แก่ Singapore MRT และ Hong Kong LRT (ชนิดชัย กุลวรรณิขพงษ์, 2557)



รูปที่ 2.16 ระบบกระแสย้อนกลับแบบลอย
ที่มา: ชาญชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2557)

4. ระบบต่ายารวบรวมกระแสเตรย์

ระบบ SCCNS เป็นระบบที่นำมาใช้กับรถไฟฟ้าที่วิ่งในอุโมงค์หรือโครงสร้างยกระดับ โดยการติดตั้งต่ายารวบรวมกระแสเตรย์ไหล (stray current collecting net) ภายในโครงสร้างของอุโมงค์หรือทางยกระดับดังกล่าว เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของส่วนที่เป็นโลหะ ต่ายายจะถูกติดตั้งระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างของอุโมงค์หรือทางยกระดับ พร้อมทั้งใช้ไดโอดเพื่อช่วยให้กระแสเตรย์ไหลให้กลับสู่สถานี ดังแสดงในรูปที่ 2.17 จากผลการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าการใช้งานระบบต่ายารวบรวมกระแสเตรย์นี้จะทำให้แรงดันสัมผัสเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าของระบบที่ไม่ติดตั้งต่ายาย (ชาญชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2557)



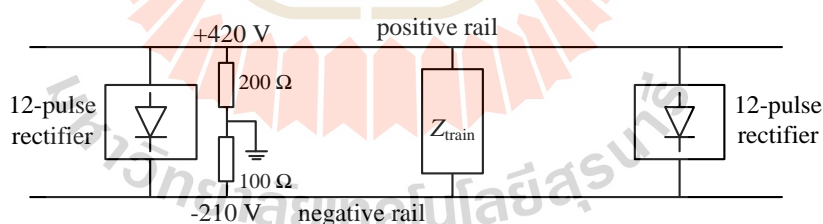
รูปที่ 2.17 ระบบ SCCN ที่ใช้ drainage diode
ที่มา: Friedrich et al. (2009)

ระบบบีทีเอส (Bangkok Transit System: BTS) ได้รับการออกแบบและก่อสร้างโดย SIEMENS ในขั้นตอนการออกแบบได้คำนวณถึงผลกระทบต่าง ๆ ดังกล่าวไว้โดยใช้โครงสร้างระบบแบบยกระดับ การคำนวณได้เปรียบเทียบการเชื่อมต่อส่วนของโลหะในโครงสร้างคอนกรีต

เสริมเหล็กเข้าด้วยกัน และในกรณีที่ตั้งระบบ SCCNS พบว่าการติดตั้งดาข่ายรวบรวมกระแสรั่วไหลทำให้กระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่า ทำให้การก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าบีทีเอสใช้การต่อเชื่อมกันของส่วนที่เป็นโลหะของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลงดินเท่า นั้นโดยไม่มีการใช้ดาข่ายรวบรวมกระแสรั่วไหลและไดโอดแต่อย่างใด จากการศึกษาที่ SIEMENS ได้ให้ข้อสังเกตเพิ่มเติมว่าไม่แนะนำให้ใช้การระบายด้วยไดโอดเพื่อวัตถุประสงค์ในการป้องกันกระแสรั่วไหล (Friedrich et al., 2009)

5. ระบบรางที่ 4

ระบบ FRS เป็นการนำตัวนำที่ลึมาใช้งาน เริ่มต้นจากในช่วง ค.ศ. 1903 – 1907 มีความกังวลถึงการกัดกร่อนของท่อโลหะที่ฝังในดินของมหานครใหญ่ในสมัยนั้น ไม่ว่าจะเป็นท่อ น้ำประปาหรือท่อแก๊ส เพื่อป้องกันการกัดกร่อนดังกล่าวรางที่ลึจึงได้รับการออกแบบใช้งานจนถึงปัจจุบัน ลอนดอนและมิลาน คือ ตัวอย่างของมหานครที่นำระบบรางที่ลึมาใช้ ในกรณีของระบบรถไฟฟ้าใต้ดินลอนดอน (London Underground Ltd.: LUL) การจ่ายไฟจะใช้แรงดัน 630 V pole-to-pole จ่ายเข้าที่ขั้วระหว่างบัสบาร์บวกและบัสบาร์ลบ มีการต่อลงดินผ่านระบบตัวต้านทานแบ่งแรงดันในอัตราส่วน 2:1 ทำให้แรงดันพิกัดที่บัสบาร์บวกและลบมีค่าเป็น +420 V และ -210 V ตามลำดับ วางสถานีเรียงกระแสที่ระยะห่างประมาณ 3 – 5 km โดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างของระบบตัวนำกระแสย้อนกลับที่ใช้รางที่ลึ (न्छัย กุลรวานิชพงษ์, 2557)



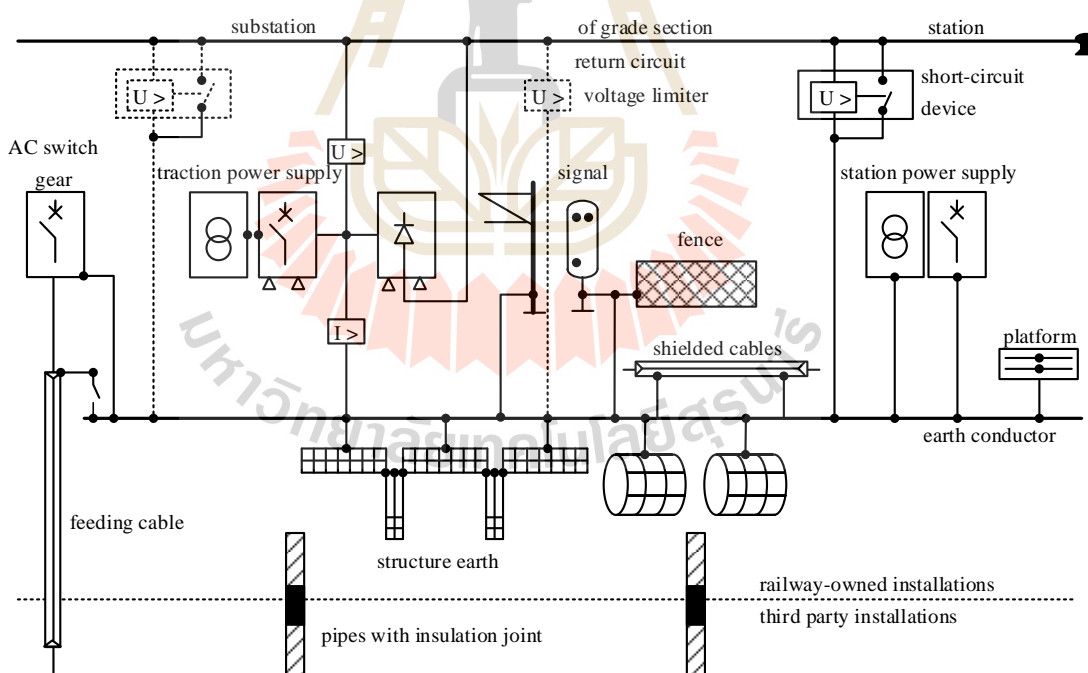
รูปที่ 2.18 ระบบจ่ายไฟผ่านรางที่ลึของ LUL

ที่มา: न्छัย กุลรวานิชพงษ์ (2557)

ดังนั้นการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสดตรงต้องเป็นไปตาม EN 50122-1 กำหนดรูปแบบการต่อการติดตั้งไฟฟ้ากระแสดตรงที่เกี่ยวข้องกับวงจรย้อนกลับและการต่อลงดิน โดยหลักการแล้วระบบต่อลงดินของวงจรย้อนกลับจะแยกจากกันโดยสมบูรณ์ การประยุกต์ใช้งานในภาคปฏิบัติอาจจะแตกต่างเนื่องจากการติดตั้งตัวนำป้อนย้อนกลับที่เพิ่มเข้ามานานไปกับรางติดตั้งดาข่ายรวบรวมกระแสรั่วไหลหรือการออกแบบที่แตกต่างกันของระบบการต่อลงดิน อย่างไรก็ตาม

ก็ตามหลักการออกแบบแสดงดังรูปที่ 2.10 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับการออกแบบวงจรย้อนกลับ การติดตั้งการต่อลงดินและระยะทางระหว่างสถานีไฟฟ้าเป็นไปตามข้อกำหนดการป้องกันไฟฟ้าช็อตและไฟฟ้าแรงดันสูงและมาตรการป้องกันกระแสรั่วไหลกักตร้อน การออกแบบการติดตั้งวงจรย้อนกลับและการต่อลงดินเพื่อตอบสนองทั้งด้านความปลอดภัยและการป้องกันกระแสรั่วไหล ในรูปที่ 2.19 แสดงแผนภาพวงจรโดยรวมด้านความปลอดภัยและการป้องกันกระแสรั่วไหล (Friedrich et al., 2009)

มาตรฐาน EN 50122-2 มีข้อบังคับว่าส่วนของวงจรย้อนกลับต้องไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าโดยตรงกับการติดตั้งชิ้นส่วนหรืออาคารที่ไม่เป็นฉนวนกับดิน หากการเชื่อมต่อที่ทำกับวงจรย้อนกลับทำให้เกิดการป้องกันต่อไฟฟ้าช็อตต้องมีอุปกรณ์จำกัดแรงดัน อุปกรณ์จำกัดแรงดันจากตัวนำเชื่อมต่อเป็นการชั่วคราวในเวลาที่กำหนดถ้าเกินค่าแรงดันที่จำกัดไว้เพื่อจำกัดศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลตามค่าที่กำหนดไว้ ค่าความต้านทานตามแนวความยาวของวงจรย้อนกลับจะลดลงโดยมีการเชื่อมต่อตามแนวขวางมากที่สุดหรือโดยการเชื่อมต่อนานสายเคเบิลกับรางวิ่งและความเป็นฉนวนจากดินเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.19 ระบบกระแสย้อนกลับดินและการต่อลงดินสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มา: (Friedrich et al, 2009)

2.3.3 กระแสรั่วไหลกักคร่อน

จากการที่ไฟฟ้ากระแสตรงไหลจากรางไปยังดินและย้อนกลับไปยังสถานีไฟฟ้า ย่อเรียกว่ากระแสรั่วไหลทำให้เกิดกระแสรั่วไหลกักคร่อนในรางวิ่งและโครงสร้างโลหะในบริเวณใกล้เคียงกับรถไฟไฟฟ้ากระแสตรง จุดมุ่งหมายของการออกแบบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสตรงคือการหลีกเลี่ยงกระแสรั่วไหลกักคร่อนที่ทางรถไฟและรางที่สาม สามารถทำได้โดยการจำกัดกระแสรั่วไหลโดยการออกแบบที่เหมาะสมของวงจรย้อนกลับ โดยเฉพาะฉนวนที่วางกับ ดินหรือโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น อุโมงค์และสะพานคอนกรีต และโรงซ่อมบำรุง

1. การเกิดกระแสรั่วไหล

รางรถไฟถูกติดตั้งบนหมอนรองรางรถไฟ ที่ถูกวางไว้บนหินโรยทาง ชั้นวัสดุรอง ได้หินโรยทาง ชั้นของฉนวนในบางครั้งและดินเป็นอันดับสุดท้าย พื้นคอนกรีตทางรถไฟเป็น ทางเลือกที่คงทนถาวรกว่าหมอนรองรางรถไฟและหินโรยทาง ค่าความต้านทานจากรางวิ่งไปยังดิน ที่สูงจะพบในกรณีกับทางรถไฟใหม่จะถูกวางกับหินโรยทางที่เป็นฉนวนอย่างดีบนดินทรายแห้งอย่าง มากหรือรางที่เป็นฉนวนโดยเฉพาะสำหรับหมอนรองรางรถไฟ อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานจาก รางวิ่งไปยังดินเป็นส่วนหนึ่งของกระแสย้อนกลับที่ไหลผ่านไปยังดิน โดยดินทำหน้าที่เหมือน อิเล็กโทรไลต์ ด้วยเหตุนี้ กระแสไหลออกจากรางวิ่งสามารถทำให้เกิดกระแสรั่วไหลกักคร่อนในท่อ โลหะและการติดตั้งอุปกรณ์โลหะใต้ดินอื่น ๆ ในบริเวณใกล้เคียงกับการขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้า กระแสตรง (Friedrich et al., 2009)

วัสดุที่เป็นโลหะทุกชนิดในอิเล็กโทรไลต์อยู่ภายใต้ความดันออกซิเดชันและความ ดันของสารละลายที่เป็นปกติในภาวะสมดุล ถ้าหากภาวะสมดุลนี้ถูกรบกวนด้วยกระแสไฟฟ้า เช่น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าผ่านจากรางรถไฟไปยังดินจะทำให้เกิดการกัดคร่อนทางไฟฟ้าเคมีขึ้น ในกรณี นี้ ทำให้เกิดกระบวนการ 2 กระบวนการขนานกันไป ตัวอย่าง เหล็ก (Fe) กระบวนการทั้งสองที่เกิด พร้อมกัน คือ

- ขั้วแอโนด (anode) เกิดปฏิกิริยาขั้วบวก หรือ เกิดปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction) หรือ ออกซิเดชัน (oxidation)



- ขั้วแคโทด (cathode) เกิดปฏิกิริยาขั้วลบ หรือ เกิดปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic reaction) หรือ รีดักชัน (reduction)



เมื่อ pH เป็นค่า pH ในปฏิกิริยาแอโนดิก กระแสแอโนดเป็นองค์ประกอบของ I_{an} ที่ไหลจากโลหะไปยังอิเล็กโทรไลต์ ในปฏิกิริยาแคโทดิก กระแสแคโทดิก เป็นองค์ประกอบของ I_{kn} ที่ไหลจากอิเล็กโทรไลต์ไปยังโลหะ เมื่อมีกระแสภายนอกเป็นตัวกำหนดความสมดุลระหว่าง I_{an} และ I_{kn} ถ้าหากภาวะสมดุลนี้ถูกรบกวนด้วยกระแสภายนอกมี 2 กรณีที่เป็นไปได้

- $I_{\text{tot}} > 0$ เช่น การเพิ่มขึ้นของเกิดปฏิกิริยาแอโนดิก ในกรณีนี้จะเกิดการกัดกร่อนกระแสเร็วไหล และ

- $I_{\text{tot}} < 0$ เช่น การเพิ่มขึ้นของเกิดปฏิกิริยาแคโทดิก เป็นหลักพื้นฐานการป้องกันขั้วแคโทด

เมื่อเกิดการกัดกร่อนกระแสเร็วไหลขึ้น โลหะจะสูญเสียความเป็นตัวนำที่จะจุดที่กระแสอยู่ในตัวนำ มวล m ของการกัดเซาะโลหะสามารถคำนวณได้ตามกฎข้อแรกของฟาราเดย์ของกระแสไฟฟ้าดังสมการที่ (2.2)

$$m = C \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (2.2)$$

โดยที่ C คือ ค่าประมาณทางไฟฟ้าเคมีของโลหะ

$i(t)$ คือ กระแสที่ไหลผ่านในช่วงเวลาระหว่าง t_1 และ t_2 มวลโลหะที่ถูกกัดกร่อน

ทางรถไฟจะเกิดการออกซิไดซ์ในอัตรา 9.11 kg ต่อกระแสเร็ว 1 A ใน เวลา 1 ปี ซึ่งจะพบว่า ในอัตรานี้ ระบบทางรถไฟของสหรัฐอเมริกามีการสูญเสีย ประมาณ 500 ล้าน USD ในแต่ละปี จากสมการกรณีของกระแสไฟฟ้า ขั้วเคลื่อนกระแสกลับ การหาปริพันธ์ของฟังก์ชันคลื่นรูปไซน์จะได้ผลลัพธ์เป็นศูนย์ ส่งผลให้ในกรณีนี้ผลจากการกัดกร่อนเนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับมีผลน้อยมาก แต่ถ้า หากเป็นระบบไฟฟ้าขั้วเคลื่อนกระแสตรง ผลการคำนวณค่าปริพันธ์ของสมการกระแสตรงจะให้ค่าปริมาณการกัดกร่อนที่ต้องได้รับการป้องกัน (ชนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2557)

2. ผลกระทบของกระแสเร็วไหล

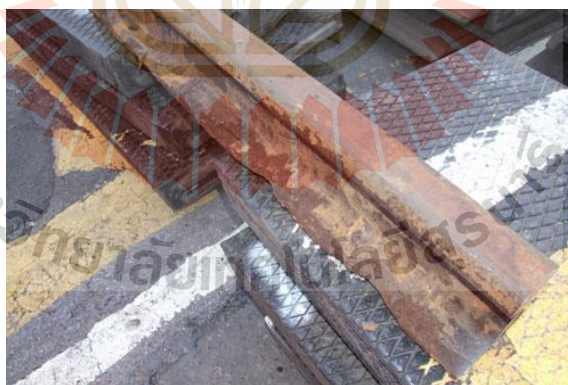
กระแสเร็วไหลทำให้เกิดการกัดกร่อนในส่วนประกอบที่เป็นโลหะที่มีการสัมผัสกับดิน เช่น ท่อลำเลียงน้ำมัน ตัวกั้นสายเคเบิล โครงสร้างพื้นฐานเหล็กเสริมแรงของอาคารหรือเสา

โครงสร้างอุโมงค์เสริมแรง สะพานและสะพานคอนกรีตสำเร็จรูป รวมทั้งโครงสร้างของรถไฟฟ้าเอง เช่น ราง ตัวยึดรางและโครงสร้างอื่นของรถไฟ ได้แสดงดังรูปที่ 2.20 แสดงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับท่อโลหะที่อยู่ใต้ดินและรูปที่ 2.21 แสดงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟ และรูปที่ 2.22 แสดงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเหล็กเสริมแรงในคอนกรีต



รูปที่ 2.20 การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับท่อโลหะที่อยู่ใต้ดิน

ที่มา: <http://nfatmala.blogspot.com/2016/02/pipeline-corrosion.html> [เข้าถึงเมื่อ 22 พ.ค. 2562]



รูปที่ 2.21 การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟ

ที่มา: <http://www.railjournal.com/index.php/track/vulnerable-rails-get-a-new-cote.html>
[เข้าถึงเมื่อ เข้าถึงเมื่อ 22 พ.ค. 2562]



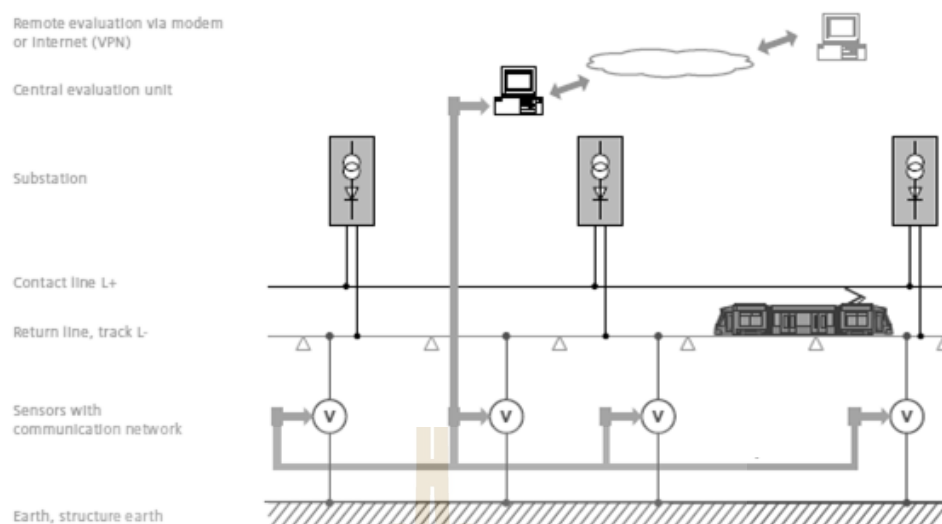
รูปที่ 2.22 การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเหล็กเสริมแรงในคอนกรีต
ที่มา: <http://www.techart.rs/english/corrosion.html> [เข้าถึงเมื่อ 22 พ.ค. 2562]

2.3.4 การประเมินกระแสรั่วไหล

เพื่อป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างที่เกิดจากกระแสรั่วไหลกัดกร่อนของระบบรถไฟฟ้าและโครงสร้างที่อยู่ใกล้เคียงตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระแสรั่วไหลที่ไหลออกจากทางรถไฟคือความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างทางรถไฟกับดิน โดยที่อัตราการกัดกร่อนเป็นตัวแปรหลักที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยง จากมาตรฐาน EN 50122-2 แนะนำว่าจะไม่เกิดความเสียหายในทางรถไฟในช่วง 25 ปี ถ้ากระแสรั่วไหลต่อหน่วยความยาวไม่เกินค่า 2.5 mA/m ต่อทางรถไฟ จากข้อกำหนดตามมาตรฐานค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดินควรมีค่าไม่เกิน 5 V สำหรับโครงสร้างระบบแบบเปิดและไม่เกิน 1 V สำหรับโครงสร้างระบบแบบปิด ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับดินควรมีค่าไม่เกิน 0.5 S/km สำหรับโครงสร้างระบบแบบเปิดและไม่เกิน 2.5 S/km สำหรับโครงสร้างระบบแบบปิด และศักย์ไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างกับดินควรมีค่าไม่เกิน 200 mV สำหรับเหล็กในคอนกรีตเสริมแรง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การตรวจวัดกระแสรั่วไหล

การเฝ้าตรวจกระแสรั่วไหลตลอดระยะเวลาการใช้งานของโครงการ โดยมาตรฐานแนะนำให้ติดตั้งระบบเฝ้าตรวจกระแสรั่วไหล (stray current monitoring system) จะใช้ผลการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าที่รางวิ่งเป็นค่าอ้างอิง เมื่อทำการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าที่รางวิ่ง หากมีค่าเกินจากค่าอ้างอิงไปมากกว่าค่าที่ตั้งไว้โดยพิจารณาเฉพาะศักย์ไฟฟ้าค่าบวกเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าฉนวนไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้อย่างดีในตอนเริ่มต้นโครงการมีการเสื่อมสภาพ และเกิดการรั่วของกระแสจากทางวิ่งในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงแก้ไข รูปแบบการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าที่รางวิ่งตามมาตรฐานดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 2.23 (न्छชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2557)



รูปที่ 2.23 การเฝ้าตรวจสอบศักย์ไฟฟ้าของทางวิ่ง

ที่มา: EN 50122-2 (2010)

ตามมาตรฐาน EN 50122-2 ปริมาณกระแสรั่วที่กำหนดเป็นค่าอ้างอิงสำหรับ รถไฟฟ้าควรมีค่าไม่เกิน 2.5 mA/m/track แต่ปัญหา คือ การวัดกระแสรั่วจากทางวิ่งเป็นไปได้ ในทางปฏิบัติทำได้เพียงวัดผลที่เกิดจากกระแสรั่วเท่านั้น ซึ่งก็คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ทางวิ่งนั่นเอง ดังนั้น ข้อกำหนดของแรงดันรางหรือศักย์ไฟฟ้าของรางวิ่งเทียบกับดิน (U_{RE}) ที่ใช้ประเมินเพื่อเฝ้าตรวจ กระแสรั่วนี้ควรจะมีความเปลี่ยนแปลงไปไม่เกิน +5 V โดยพิจารณาจากการตรวจวัดในช่วงเวลาที่ การจราจรหนาแน่นที่สุดเป็นเวลาอย่างน้อยที่สุด 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ แรงดันระหว่างโครงสร้าง โลหะลงดินต้องมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่วัดไม่ควรเปลี่ยนแปลงเกิน +200 mV

2. การประมาณค่ากระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านจากทางวิ่งไปยังดิน

ตามมาตรฐาน EN 50122-2 ในภาคผนวก C.1 สามารถคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางจะ ขึ้นอยู่กับค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$U_{RE} = 0.5 \times I \times R_C \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_C}\right)} \right) \quad (2.3)$$

$$R_C = \sqrt{\frac{R'_R}{G'_{RE}}} \quad (2.4)$$

$$L_c = \frac{1}{\sqrt{R'_R \times G'_{RE}}} \quad (2.5)$$

โดยที่	U_{RE}	คือ ค่าแรงดันตามแนวความยาว (V)
	G'_{RE}	คือ ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางกับดิน (S/km)
	I	คือ ค่าเฉลี่ยของวงจรกระแสไหลกลับของส่วนที่พิจารณาสนใจในช่วงเวลาที่มี โหลดสูงสุด (A)
	L	คือ ค่าความยาวที่สนใจพิจารณาของเส้นทาง (km)
	L_c	คือ คุณสมบัติความยาวของรางวิ่ง (km)
	R'_R	คือ ค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาว (Ω/km)
	R_c	คือ คุณสมบัติความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาว (Ω/km)

การประมาณค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและค่าความนำของรางวิ่งเทียบกับดินเพื่อคำนวณหา
ค่ากระแสรั่วไหลต่อหน่วยความยาวสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.6)

$$I'_S = U_{RE} \times G'_{RE} \quad (2.6)$$

เมื่อ I'_S คือ กระแสรั่วไหลที่ไหลจากรางเมื่อเทียบกับความยาว
จากสมการที่ (2.3) และ (2.5) สามารถคำนวณใหม่ได้ดังสมการที่ (2.7)

$$I'_S = 0.5 \times \frac{I}{L_c} \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_c}\right)} \right) \quad (2.7)$$

3. การประมาณแรงดันในแนวความยาวในโครงสร้างโลหะเสริมแรง

ในกรณีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรง เช่น อุโมงค์ ทางยกระดับและหมอนรอง
รางเสริมแรง ในประเด็นนี้มาตรฐาน EN 50122-2 ระบุว่า การคำนวณแรงดันไฟฟ้าสูงสุดตามแนว
ความยาวระหว่างสองจุดใด ๆ ของโครงสร้างอุโมงค์ทั้งหมดจะต้องน้อยกว่า 200 mV ค่าแรงดันที่ตก
คร่อมตามแนวความยาวที่ถูกประเมินโดยการศึกษาในกรณีที่แย่ที่สุดตามมาตรฐาน EN 50122-2
ภาคผนวก C.2 ได้ดังสมการที่ (2.8)

$$U_s = 0.5 \times I \times L \times \frac{R'_R \times R'_S}{R'_R + R'_S} \times \left[1 - \frac{L_C}{L} \times (1 - e^{-(L/L_C)}) \right] \quad (2.8)$$

โดยที่

$$L_C = \frac{1}{\sqrt{(R'_R + R'_S) \times G'_{RE}}} \quad (2.9)$$

เมื่อ U_s คือ ค่าแรงดันตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรง (V)
 R'_S คือ ค่าความต้านทานของตัวนำที่เชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างต่อหน่วยความยาว
 (Ω/km)

วิธีการคำนวณในสมการที่ (2.7) ต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง สูตรการคำนวณจะสมมุติฐานว่าความยาวของอุโมงค์มีค่าอนันต์ในแต่ละส่วนที่สนใจพิจารณา นอกจากนี้จะไม่ลดผลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถไฟที่อยู่ติดกันและค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของโครงสร้างอุโมงค์กับดิน ค่าจากการคำนวณอาจมีค่าสูงมากกว่าความเป็นจริงได้

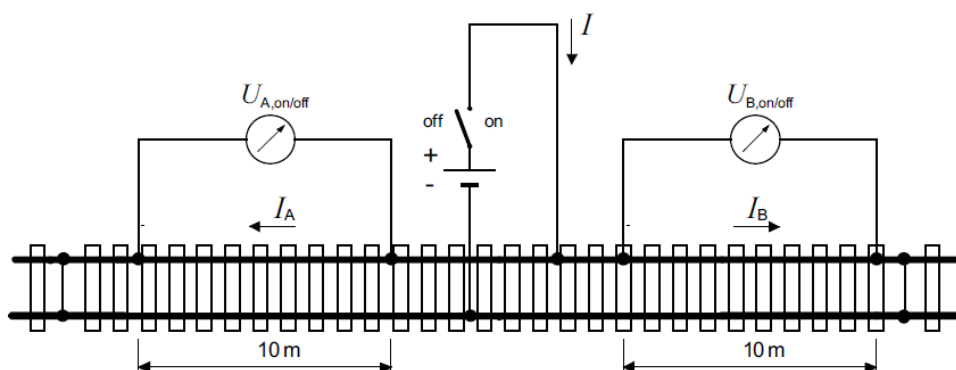
จะเห็นได้ว่าการประมาณค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางตามมาตรฐาน EN 50122-2 ในภาคผนวก C จำเป็นต้องมีการวัดความต้านทานของรางวิ่ง การวัดค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับ โครงสร้างเสริมเหล็กและการวัดค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวสำหรับส่วนของรางในระบบเปิดโดยมีรายละเอียดในมาตรฐาน EN 50122-2 ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.3.5 การตรวจวัดพารามิเตอร์ของทางรถไฟ

การคำนวณแรงดันระหว่างรางวิ่งไปยังดินและกระแสที่ไหลผ่านไปยังดินหรือการประมาณค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางตามมาตรฐาน EN 50122-2 ในภาคผนวก C จำเป็นต้องมีการวัดค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

1. ความต้านทานของรางวิ่ง

การวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งจะทำโดยการวัดค่าแรงดันตกคร่อมรางสองช่วง ช่วงละ 10 m ที่อยู่ใกล้กันแล้วนำค่าแรงดันที่ได้มาคำนวณหาความต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 2.24 โดยสมมุติฐานว่าไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างรางทั้งสองฝั่งเข้าด้วยกัน (EN 50122-2, 2010; มานะชัย วัฒนหัตถกรรม, 2556)



รูปที่ 2.24 การวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งสำหรับรางที่มีความยาว 10 m
ที่มา: EN 50122-2 (2010)

จากรูปที่ 2.24 สามารถคำนวณค่าความต้านทานของรางวิ่งได้ดังสมการที่ (2.10)

$$R_{R10m} = \frac{(U_{Aon} - U_{Aoff}) + (U_{Bon} - U_{Boff})}{I} \quad (2.10)$$

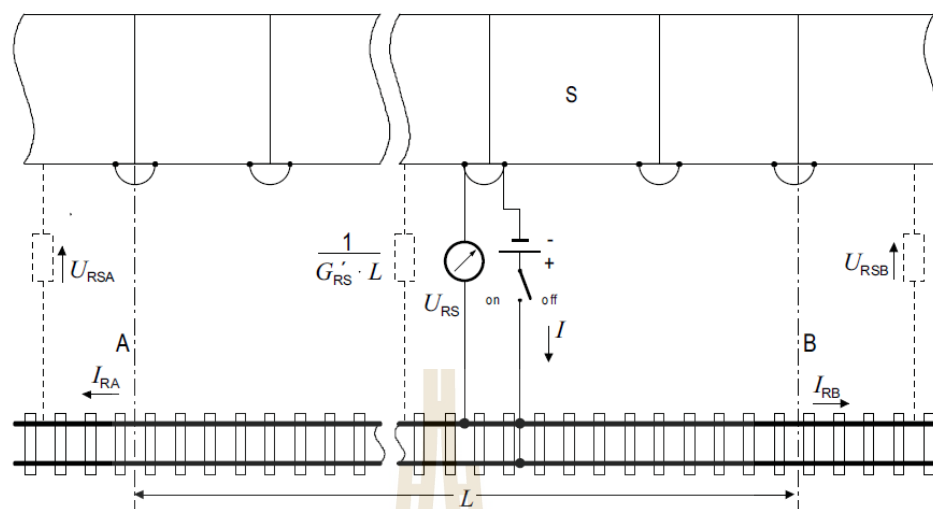
โดยที่ R_{R10m} คือ ค่าความต้านทานตามแนวความยาวของรางที่มีความยาว 10 เมตร ของรางที่ 1 และรางที่ 2 (Ω)

I คือ กระแสที่จ่ายให้กับราง (A)

$U_{on,off}$ คือ แรงดันตกคร่อมในรางที่ 1 และรางที่ 2 (V) และไม่มีการจ่ายกระแส

2. ความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างเสริมเหล็ก

การวัดค่าการจัดเรียงสำหรับค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างเสริมเหล็กโดยรางวิ่งต่อตามแนวความยาวตลอดไม่มีการแยกของรางวิ่ง วิธีนี้ใช้กับโครงสร้างรองรับทางวิ่งแบบอุโมงค์และโครงสร้างเสริมแรงของรางวิ่ง วิธีการคือจ่ายกระแสเข้าไประหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างแล้วทำการเปิดและปิดสวิตช์จากนั้นทำการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านระหว่างรางกับโครงสร้างที่ขอบเขตด้านซ้ายและขอบเขตด้านขวาดังแสดงในรูปที่ 2.25 จากนั้นนำค่ามาคำนวณตามสมการที่ (2.11) แนะนำการวัดควรไม่เกิน 4 กิโลเมตร (EN 50122-2, 2010; มาตรฐาน วิศวกรรม, 2556)



รูปที่ 2.25 การวัดค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างเสริมเหล็ก
ที่มา: EN 50122-2 (2010)

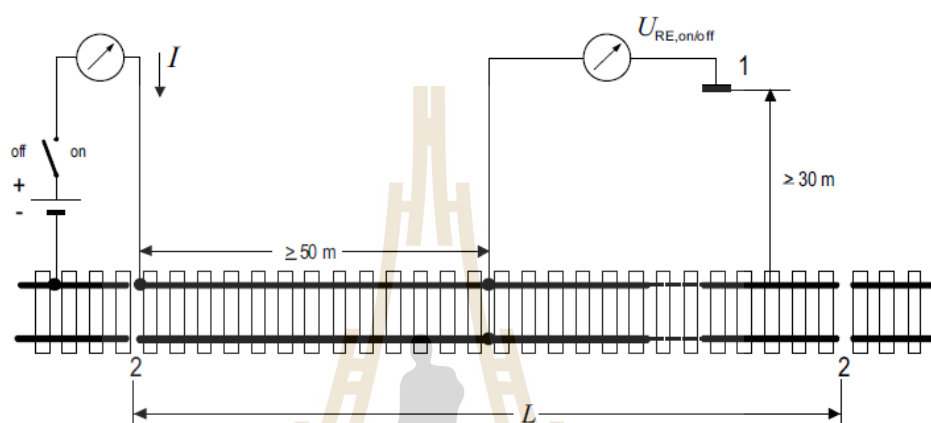
$$G'_{RS} = \frac{3}{L} \times \frac{I - I_{RA} - I_{RB}}{\Delta U_{RT} + \Delta U_{RTA} + \Delta U_{RTB}} \quad (2.11)$$

โดยที่	G'_{RS}	คือ ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์ (S/km)
	I	คือ กระแสที่จ่ายให้กับราง (A)
	I_{RA}, I_{RB}	คือ กระแสที่ไหลออกไปไกลที่สุดท้ายที่จุด A และ B ของส่วนของการวัด (A)
	U_{RT}	คือ แรงดันระหว่างรางกับอุโมงค์ที่จุดจ่ายกระแส (V)
	U_{RA}, U_{RB}	คือ แรงดันระหว่างรางกับอุโมงค์ที่จุดสุดท้ายที่จุด A และ B ของส่วนของการวัดของอุโมงค์ (V)
	L	คือ ค่าความยาวของส่วนที่ทำการวัด (km)

3. ความนำต่อนึ่งหน่วยความยาวสำหรับส่วนของรางในแบบเปิด

การหาค่าความนำต่อนึ่งหน่วยความยาวสำหรับส่วนของรางวิ่งในแบบเปิด ความยาวของรางที่จะวัดไม่ควรเกิน 2 km โดยการทำการจ่ายกระแสเข้ากับรางด้านหนึ่งที่ทำการตัดขาดแยกกับรางอีกด้านหนึ่ง พร้อมกับการทำงานของสวิตช์เปิดและปิด ซึ่งจะวัดอีกด้านหนึ่งของรางจะ

ห่างจากจุดที่มีการจ่ายกระแสระยะทางไม่น้อยกว่า 50 m โดยสุดของรางนั้นจะแยกออกจากรางตามแนวความยาว การวัดค่าแรงดันจะวัดเทียบกับขั้วอ้างอิง Cu/CuSO₄ electrode ซึ่งเปรียบเสมือนขั้วดิน ตั้งห่างจากรางวิ่งไม่น้อยกว่า 20 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ค่าแรงดันระหว่างรางวิ่งกับดินและค่ากระแสไหลที่ได้จากการวัดนำไปคำนวณหาค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ดังสมการที่ (2.12) (EN 50122-2, 2010; มานะชัย วัฒนหัตถกรรม, 2556)



รูปที่ 2.26 การหาค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวสำหรับส่วนของรางแบบเปิด
ที่มา: EN 50122-2 (2010)

$$G'_{RE} = \frac{1}{L} \times \frac{I}{U_{REon} - U_{REoff}} \quad (2.12)$$

โดยที่ G'_{RE} คือ ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางกับดิน (S/km)
 I คือ กระแสที่จ่ายให้กับราง (A)
 U_{RE} คือ แรงดันระหว่างรางกับดิน (V)
 L คือ ค่าความยาวของส่วนที่ทำการวัด (km)

สำหรับการประเมินกระแสรั่วไหลมีความจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ของความต้านทานของรางวิ่งและค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับดินเป็นสำคัญเพื่อใช้ในการประมาณค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง กระแสรั่วไหลลงดินและค่าแรงดันตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรง

2.3.6 การป้องกันต่อกระแสรั่วไหลกั๊กกร่อน

วัตถุประสงค์ของข้อกำหนดการป้องกันต่อผลกระทบของกระแสรั่วไหล คือ การหลีกเลี่ยงอันตรายจากการกั๊กกร่อนในการติดตั้งรางที่สามและรถไฟฟ้าซึ่งเป็นสิ่งจำเป็น ในทางกลับกันการจำกัดกระแสรั่วไหลในทางอื่น ๆ เช่น การระบุและกำจัดความผิดปกติของดินในวงจรย้อนกลับในเวลาที่กำหนดเพื่อหลีกเลี่ยงการลดลงของอายุการใช้งานที่ติดตั้ง สามารถดูรายละเอียดได้ในมาตรฐาน EN 50122-2 อุปกรณ์ป้องกันกระแสรั่วไหล (VDV 500 หรือ VDV 501) (Friedrich et al., 2009)

ค่าแรงดันตกคร่อมตามแนวความยาวต่ำในวงจรย้อนกลับและความเป็นฉนวนที่ดีของรางวิ่งกับดินเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการจำกัดกระแสรั่วไหล เนื่องจากค่าแรงดันตกคร่อมตามแนวความยาวขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสถานีไฟฟ้ากับค่าความต้านทานของวงจรย้อนกลับ การป้องกันกระแสรั่วไหลยังมีผลต่อจำนวนของสถานีไฟฟ้าที่ต้องการ มาตรการป้องกันต่อกระแสรั่วไหลเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อป้องกันการติดตั้งรางที่สาม รางรถไฟ เหล็กเสริมแรงของอุโมงค์และโครงสร้างทางวิ่งยกระดับ (viaduct structures) และเหล็กเสริมแรงภายใต้รางวิ่ง (steel reinforced track bed) หรือเทคนิคยึดเหนี่ยวรางที่คล้ายกัน (similar rail fastening techniques)

ข้อแตกต่างที่ควรคำนึงถึงระหว่างมาตรการป้องกันด้วยตัวเองและอุปกรณ์ การป้องกันด้วยตัวเองเกี่ยวข้องกับการเคลือบสีโลหะที่ติดตั้งซึ่งเกี่ยวข้องกับการเป็นฉนวนของวัสดุหรือการป้องกันการกั๊กกร่อนของโลหะ การป้องกันด้วยอุปกรณ์เกี่ยวข้องกับการใช้วิธีการในระบบจ่ายพลังงานขับเคลื่อนรถไฟฟ้างาน ตัวอย่างเช่น

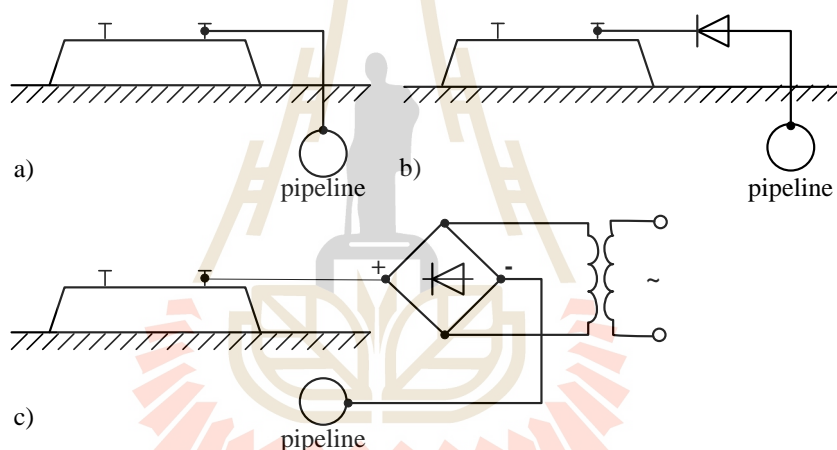
- การลดระยะทางระหว่างสถานีไฟฟ้า
- การลดความยาวของระบบย้อนกลับรางรถไฟโดยการย้ายการเชื่อมต่อกลับรางให้ห่างจากสถานีไฟฟ้า
- การลดค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับดิน
- การลดค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาวของระบบกระแสย้อนกลับและ
- การติดตั้งสายตัวนำกลับขนานเสริมไปเช่นตัวนำรางวิ่งขนานไปกับรางรถไฟและเชื่อมต่อกับรางในระยะห่างสั้น ๆ

ในบางกรณีการป้องกันแคโทดิกด้วยอุปกรณ์ที่ได้รับการรับรอง หลักการป้องกันแคโทดิกอยู่บนพื้นฐานการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิก (ขั้วบวก) บนโลหะที่มีการป้องกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.27 แสดงวิธีการป้องกันแคโทดิกด้วยวิธีการต่าง ๆ

- การเบี่ยงเบนโดยตรงของกระแสรั่วไหลจากโลหะฝังดินที่ติดตั้งอยู่ไปยังรางรถไฟ สามารถแนะนำได้เมื่อกระแสรั่วไหลไปยังรางรถไฟโดยไม่มีต่อฝาก การเบี่ยงเบนกระแสรั่วไหลโดยตรง (direct stray current diversion) ได้แสดงดังรูปที่ 2.27 a) อาจจะ

นำมาใช้ในที่ศักย์ไฟฟ้าที่ร่างเป็นลบสูงพอสมควรมีการรับรองและการกลับทิศทางของการไหลกระแสในการเชื่อมต่อฝากสามารถยกเว้นได้

- การเบี่ยงเบนกระแสรั่วไหลไปตามทิศทางที่เรียกว่าการระบายในทิศทางเดียว(polarized drainage) เป็นสิ่งที่ต้องการในที่คาดว่าจะมีการกลับทิศทางของกระแส วงจรเรียงกระแสหรือไดโอดขัดขวางการไหลของกระแสรั่วไหลไปยังโลหะฝังดินที่ติดตั้งอยู่ที่ซึ่งจะต้องมีการป้องกัน(รูปที่ 2.27 b)
- ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่ร่างมีค่าไม่สูงมากพอ วิธีการเบี่ยงเบนกระแสอาจจะน้อยซึ่งไม่เพียงพอต่อการป้องกันแคโทดิกได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.27 c) การระบายกระแสรั่วไหลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นที่เรียกว่า soutirage สามารถทำได้โดยการแทรกแหล่งจ่ายกระแสโดยตรง



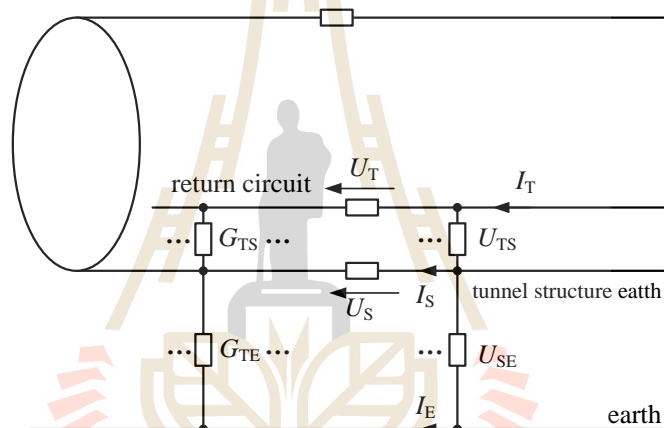
รูปที่ 2.27 มาตรการป้องกันด้วยอุปกรณ์ (active protective measures) ต่อกระแสรั่วไหลกักร่อน
(Friedrich et al., 2009)

- a) การเบี่ยงกระแสรั่วไหลโดยตรง
- b) การเบี่ยงเบนกระแสรั่วไหลไปตามทิศทางที่เรียกว่าการระบายในทิศทางเดียว
- c) การบังคับการระบายกระแสรั่วไหล (forced stray current drainage)

ในมาตรฐาน EN 50122-2 การใช้วิธีการระบายไม่เป็นวิธีที่แนะนำเพราะการเชื่อมต่อของโครงสร้างต่าง ๆ เช่น ไปป์สบาร์ขั้วลบในสถานีไฟฟ้าแม้ในอุปกรณ์ระบายไฟฟ้าในทิศทางเดียวจะเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลโดยรวม ดังนั้นการเชื่อมต่อโครงสร้างตัวนำต่าง ๆ ไปยังวงจรย้อนกลับควรจะทำเท่านั้นเนื่องจากการพิจารณาจะได้รับผลกระทบโดยรวมในโครงสร้างอื่น ๆ

ที่อาจจะได้รับอิทธิพลด้วย การพิจารณาในประเด็นที่เกี่ยวข้องจะพบในมาตรฐาน EN 50122-2 (Friedrich et al., 2009)

และเกณฑ์ 200 mV ในมาตรฐาน EN 50122-2 ระดับแรงดัน 200 mV นำไปใช้สำหรับการประเมินการป้องกันแคโทดิก เพราะได้พิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับประเมินผลกระทบของกระแสรั่วไหลซึ่งเป็นวิธีที่สามารถตรวจสอบได้ง่าย เกณฑ์นี้แสดงให้เห็นว่าไม่มีความเสียหายจากการกัดกร่อนสำหรับโครงสร้างเหล็กเสริมแรงหรือตัวนำโลหะอื่น ๆ ที่มีการเชื่อมต่อกับดิน ถ้าค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงต่อชั่วโมงในช่วงเวลาการจราจรสูงสุดมีค่าไม่เกิน +200 mV การเฝ้าตรวจกระแสรั่วไหล เป็นวิธีการตรวจจับการเชื่อมต่อลงดินในเวลาที่กำหนดเพื่อหลีกเลี่ยงการกัดกร่อน โดยระบุตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติและกำจัดกระแสรั่วไหล



รูปที่ 2.28 วงจรสมมูลสำหรับระบบรถไฟกระแสตรง

ในอุโมงค์คอนกรีตที่มีเหล็กเสริมแรง (Friedrich et al, 2009)

รูปที่ 2.28 แสดงวงจรไฟฟ้าเพื่อคำนวณระบบรถไฟกระแสตรงในอุโมงค์ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดตามแนวความยาว U_s ที่เกิดขึ้นระหว่างสองจุดใด ๆ ในโครงสร้างขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ (Friedrich et al., 2009) โดยสัญลักษณ์ T สำหรับรางรถไฟ (Track) S สำหรับโครงสร้าง (Structure) และ E สำหรับดิน (Earth)

- ความยาวของส่วนแหล่งจ่าย
- ค่าความต้านทานของรางรถไฟ
- ค่าความต้านทานของโครงสร้างอุโมงค์
- ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว G'_{TS} ระหว่างวงจรย้อนกลับกับโครงสร้าง ในกรณีของอุโมงค์และโครงสร้างเสริมแรงอุโมงค์

- ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว G'_{SE} ระหว่างโครงสร้างกับดิน
- ค่าเฉลี่ยสูงสุดของกระแสไฟฟ้าขับเคลื่อนใน 1 ชั่วโมง

2.4 สรุป

จากการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินผลของกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟกระแสตรง จากฐานข้อมูล IEEE Science Direct IEE และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถพิจารณาการวิเคราะห์และประเมินกระแสรั่วไหลได้ทั้งใช้วิธีการตรวจวัดกระแสรั่วไหลและแบบจำลองกระแสรั่วไหล จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่มุ่งเน้นไปในการสร้างแบบจำลองโครงข่ายตัวต้านทานที่ประกอบไปด้วยวัสดุต่าง ๆ ส่วนใหญ่จะเป็นการสร้างแบบจำลองโครงข่ายตัวต้านทานโดยใช้วงจรสมมูล

และในบทนี้ยังได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งได้แก่ทฤษฎีเกี่ยวกับวงจรย้อนกลับและการต่อลงดิน และการประเมินความประเทของวงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟกระแสตรง กระแสรั่วไหลกักต่อนและการประเมินกระแสรั่วไหลตามมาตรฐานโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน EN 50122-2 โดยได้กล่าวเฉพาะส่วนที่จะนำมาใช้หรือส่วนที่จะถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อ ๆ ไปทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทาง ในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้ดำเนินงานวิจัย

บทที่ 3

การคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่ราง

3.1 บทนำ

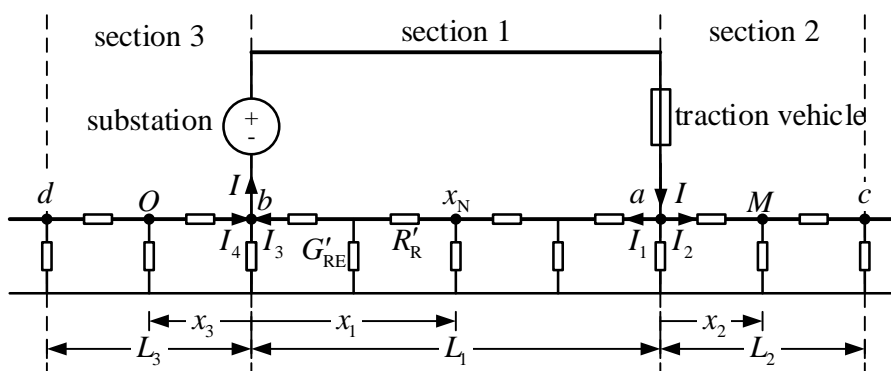
จากข้อมูลเบื้องต้นสำหรับระบบรถไฟฟ้ามอเตอร์ 2 ซึ่งแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการต่อลงดินในระบบรถไฟฟ้ามอเตอร์มาตรฐานการวัดและการประเมินกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้ามอเตอร์ ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลลงดินด้วยวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวและจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน โดยการพิจารณาเฉพาะกรณีรางยาวอนันต์

3.2 การคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่ราง

การคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางอยู่บนพื้นฐานของระบบกระแสย้อนกลับแบบลอยจะไม่ต่อขั้วบัสบาร์กับเสาอากาศของสถานีเรียงกระแสลงดินทำให้ที่สถานีไฟฟ้าไม่มีการต่อลงดิน ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วบัสบาร์จะลอยอยู่และไม่จำเป็นต้องเท่ากับศูนย์ จากการการศึกษาคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางพบว่าได้มีการคำนวณศักย์ไฟฟ้าในกรณีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวและวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน โดยได้แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 กรณีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว

การคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางกรณีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวเป็นการพิจารณาแบบจำลองในกรณีที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า 1 สถานี และรถไฟ 1 ขบวน ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งได้แสดงการกระจายของกระแสรั่วไหลและบริเวณพื้นที่รั่วไหลกักร่อน (Friedrich et al., 2009) การคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางกรณีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีการพิจารณาขอบเขตของการคำนวณเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 3.3 จากการการศึกษาคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางกรณีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวพบว่าได้มีการคำนวณโดยพิจารณาขอบเขตของการคำนวณสองแบบ คือ แบบรางยาวจำกัดจะพิจารณาเฉพาะส่วนที่ 1 เท่านั้น ซึ่งสามารถดูได้จาก (Friedrich et al., 2009) และแบบรางยาวอนันต์จะพิจารณาทั้ง 3 ส่วน (Valero and Sanz, 2013) โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางกรณีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว โดยมีข้อกำหนดว่าจะพิจารณาในกรณีที่รางยาวอนันต์

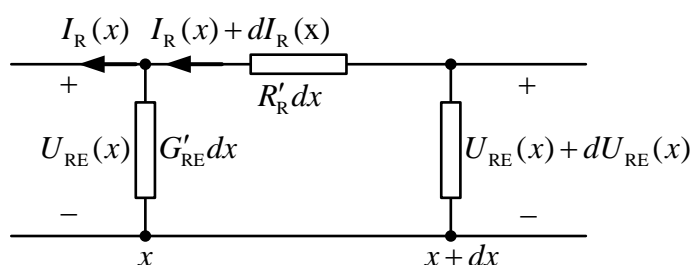


รูปที่ 3.3 การแบ่งช่วงการคำนวณสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว

การคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางกรณีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวได้พิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพื้นฐาน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย และ การประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ราง ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพื้นฐานสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว

เป็นแบบจำลองทางพื้นฐานสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว (Classical mathematical model single-side power supply: CMM-SPS) จะพิจารณาจากแบบจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนให้แก่รถไฟประกอบไปด้วย สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า รถไฟ ความต้านทานราง ต่อหน่วยความยาวและความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวเพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณจากรูปที่ 3.2 สามารถแบ่งช่วงในการคำนวณจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ส่วนที่ 2 และ ส่วนที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เมื่อ I_1 และ I_2 คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกโนด a I_3 และ I_4 คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกที่จุด b L_1 L_2 และ L_3 คือ ความยาวในส่วนที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ และ x_1 x_2 และ x_3 คือ ความยาวที่ใช้พิจารณาในส่วนที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงตามอุปกรณ์รางรถไฟของความยาว dx

โดยพื้นฐานแล้วการคำนวณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่รางสามารถพิจารณาโดยใช้แบบจำลองสายส่งซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Friedrich et al., 2009; R. J. Hill., 1997; Hadi, 2002) จะได้ว่า

$$-U'_{RE}(x) - [I_R(x) + dI_R(x)] R'_R dx + U'_{RE}(x) + dU'_{RE}(x) = 0 \quad (3.1)$$

เมื่อ $U'_{RE}(x)$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่รางเทียบกับดิน
 $I_R(x)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ราง

ดังนั้น

$$dU'_{RE}(x) = [I_R(x) + dI_R(x)] R'_R dx \quad (3.2)$$

เมื่อ $dI_R(x) = 0$ จะได้ว่า

$$\frac{dU'_{RE}(x)}{dx} = I_R(x) R'_R \quad (3.3)$$

และกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์เป็นไปตามสมการ

$$I_R(x) + dI_R(x) = I_R(x) + U'_{RE}(x) G'_{RE} dx \quad (3.4)$$

ดังนั้น

$$\frac{dI_R(x)}{dx} = U'_{RE}(x) G'_{RE} \quad (3.5)$$

อนุพันธ์สมการที่ (3.5) เทียบกับ x จะได้ว่า

$$\frac{d^2 I_R(x)}{dx^2} = \frac{dU_{RE}(x)}{dx} G'_{RE} \quad (3.6)$$

นำสมการที่ (3.3) แทนลงในสมการที่ (3.6) จะได้สมการต่อไปนี้

$$\frac{d^2 I_R(x)}{dx^2} = I_R(x) R'_R G'_{RE} \quad (3.7)$$

หรือ

$$\frac{d^2 I_R(x)}{dx^2} - \alpha^2 I_R(x) = 0 \quad (3.8)$$

เมื่อ $\alpha = \sqrt{R'_R G'_{RE}}$ และผลเฉลยทั่วไปของสมการอนุพันธ์อันดับสองเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$I_R(x) = Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x} \quad (3.9)$$

หลังจากนั้นทำการหาค่า A และ B ในแต่ละส่วน รายละเอียดและแนวทางการหาคำตอบสามารถพิจารณาได้จากขอบเขตของกระแสไฟฟ้าในแต่ละส่วนที่ได้พิจารณา โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1

การหาขอบเขตของกระแสไฟฟ้าในส่วนที่ 1 สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.3 (section 1) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เป็นระยะ x_1 จากจุด b ไปยังจุด a เป็นระยะทาง L_1 ดังนั้นขอบเขตของกระแสไฟฟ้าในส่วนนี้สามารถเขียนได้โดยที่ $x_1 = 0$ (ที่จุด b) แล้วนำค่าดังกล่าวแทนลงในสมการที่ (3.9) สามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้าที่จุด b ได้ดังสมการที่ (3.10)

$$I'_R(0) = A + B = I_3 \quad (3.10)$$

เมื่อ $I'_R(0) = I_3$ และที่ $x_1 = L_1$ (ที่จุด a) นำค่าดังกล่าวแทนลงในสมการที่ (3.9) สามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้าที่จุด a ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I'_R(L_1) = Ae^{\alpha L_1} + Be^{-\alpha L_1} = I_1 \quad (3.11)$$

และเมื่อ $I'_R(L_1) = I_1$ จากสมการดังกล่าวจะพบว่าติดอยู่ในรูปของตัวแปร A และ B จากสมการที่ (3.10) จะได้ว่า

$$B = I_3 - A \quad (3.12)$$

นำสมการที่ (3.12) แทนในสมการที่ (3.11) จะได้ว่า

$$Ae^{\alpha L_1} + (I_3 - A)e^{-\alpha L_1} = I_1 \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.13) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$A(e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}) = I_1 - I_3 e^{-\alpha L_1} \quad (3.14)$$

ดังนั้น A เขียนได้ดังนี้

$$A = \frac{I_1 - I_3 e^{-\alpha L_1}}{e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}} \quad (3.15)$$

นำค่า A แทนในสมการที่ (3.9) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} B &= I_3 - \frac{I_1 - I_3 e^{-\alpha L_1}}{e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}} \\ &= \frac{I_3 e^{\alpha L_1} - I_3 e^{-\alpha L_1} - I_1 + I_3 e^{-\alpha L_1}}{e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}} \\ &= -\frac{I_1 - I_3 e^{\alpha L_1}}{e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

นำค่า A และ B ในสมการที่ (3.15) และ (3.16) แทนในสมการที่ (3.9) จะได้คำตอบของกระแสไฟฟ้าในส่วนที่ 1 ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 I'_R(x) &= \frac{I_1 - I_3 e^{-\alpha L_1}}{e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}} e^{\alpha x} - \frac{I_1 - I_3 e^{\alpha L_1}}{e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}} e^{-\alpha x} \\
 &= \frac{I_1 \sinh(\alpha x) + I_3 \sinh(\alpha(L_1 - x))}{\sinh(\alpha L_1)}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

และสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางไปยังดินได้จากสมการที่ (3.5) และ (3.12) ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 U'_{RE}(x) &= \frac{1}{G'_{RE}} \frac{dI'_T(x)}{dx} \\
 &= \frac{\alpha}{G'_{RE}} \left[\frac{I_1 \cosh(\alpha x) - I_3 \cosh(\alpha(L_1 - x))}{\sinh(\alpha L_1)} \right] \\
 &= Z_C \left[\frac{I_1 \cosh(\alpha x) - I_3 \cosh(\alpha(L_1 - x))}{\sinh(\alpha L_1)} \right]
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

โดยที่ $Z_C = \alpha/G'_{RE}$ หรือ $Z_C = \sqrt{R'_R/G'_{RE}}$

ดังนั้นสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดิน v'_b ที่จุด b และ v'_a ที่จุด a ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 u'_b = U'_{RE}(0) &= Z_C \left[\frac{I_1 \cosh(0) - I_3 \cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1)} \right] \\
 &= Z_C \left[\frac{I_1 - I_3 \cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1)} \right]
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned}
 u'_a = U'_{RE}(L_1) &= Z_C \left[\frac{I_1 \cosh(\alpha L_1) - I_3 \cosh(0)}{\sinh(\alpha L_1)} \right] \\
 &= Z_C \left[\frac{I_1 \cosh(\alpha L_1) - I_3}{\sinh(\alpha L_1)} \right]
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

ส่วนที่ 2

การพิจารณาที่ขอบเขตของกระแสไฟฟ้าในส่วนนี้จะพิจารณาในกรณีที่รถไฟเคลื่อนที่เป็นระยะ x_2 จากจุด a ไปยังจุด c เป็นระยะทาง L_2 เมื่อ L_2 มีระยะเป็นอนันต์จะทำให้ $I''_R(L_2) = 0$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้าที่จุด a และจุด d ได้ดังสมการที่ (3.21) และ (3.22) ตามลำดับ

$$I_R''(0) = A + B = -I_2 \quad (3.21)$$

$$I_R''(L_2) = Ae^{\alpha L_2} + Be^{-\alpha L_2} = 0 \quad (3.22)$$

แก้สมการด้านบนจะได้ค่า A และ B ดังสมการต่อไปนี้

$$A = \frac{I_2 e^{-\alpha L_2}}{e^{\alpha L_2} - e^{-\alpha L_2}}, \quad B = -\frac{I_2 e^{\alpha L_2}}{e^{\alpha L_2} - e^{-\alpha L_2}}$$

นำค่าที่ได้แทนในสมการที่ (3.9) จะได้คำตอบของกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางกับดินในส่วนที่ 2 ได้ดังนี้

$$I_R''(x) = -\frac{I_2 \sinh(\alpha(L_2 - x))}{\sinh(\alpha L_2)} \quad (3.23)$$

$$U_{RE}''(x) = Z_C \left[\frac{I_2 \cosh(\alpha(L_2 - x))}{\sinh(\alpha L_2)} \right] \quad (3.24)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดิน v_a'' ที่จุด a ได้ดังนี้

$$u_a'' = U_{RE}''(0) = Z_C \left[\frac{I_2 \cosh(\alpha L_2)}{\sinh(\alpha L_2)} \right] \quad (3.25)$$

ส่วนที่ 3

การพิจารณาที่ขอบเขตของกระแสไฟฟ้าในส่วนนี้จะพิจารณาในกรณีที่รถไฟเคลื่อนที่เป็นระยะ x_3 จากจุด b ไปยังจุด d เป็นระยะทาง L_3 เมื่อ L_3 มีระยะเป็นอนันต์จะทำให้ $I_R''(L_3) = 0$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้าที่จุด b และจุด d ได้ดังสมการที่ (3.26) และ (3.27) ตามลำดับ

$$I_R'''(0) = A + B = I_4 \quad (3.26)$$

$$I_R'''(L_3) = Ae^{\alpha L_3} + Be^{-\alpha L_3} = 0 \quad (3.27)$$

แก้สมการด้านบนจะได้ค่า A และ B ดังสมการต่อไปนี้

$$A = -\frac{I_4 e^{-\alpha L_3}}{e^{\alpha L_3} - e^{-\alpha L_3}}, \quad B = \frac{I_4 e^{\alpha L_3}}{e^{\alpha L_3} - e^{-\alpha L_3}}$$

นำค่าที่ได้แทนในสมการที่ (3.9) จะได้คำตอบของกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางกับดินในส่วนที่ 3 ดังสมการต่อไปนี้

$$I_R'''(x) = \frac{I_4 \sinh(\alpha(L_3 - x))}{\sinh(\alpha L_3)} \quad (3.28)$$

$$U_{RE}'''(x) = -Z_C \left[\frac{I_4 \cosh(\alpha(L_3 - x))}{\sinh(\alpha L_3)} \right] \quad (3.29)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดิน v_b''' ที่จุด b ได้ดังต่อไปนี้

$$u_b''' = U_{RE}'''(0) = -Z_C \left[\frac{I_4 \cosh(\alpha L_3)}{\sinh(\alpha L_3)} \right] \quad (3.30)$$

จากสมการเบื้องต้นจะพบว่าสมการทั้งหมดจะติดตัวแปร I_1 I_2 I_3 และ I_4 โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่โนด a จะมีค่าเท่ากัน นั่นคือ $u_a' = u_a''$ เขียนได้ดังสมการ

$$Z_C \left[\frac{I_1 \cosh(\alpha L_1) - I_3}{\sinh(\alpha L_1)} \right] = Z_C \left[\frac{I_2 \cosh(\alpha L_2)}{\sinh(\alpha L_2)} \right] \quad (3.31)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{I_1 \cosh(\alpha L_1) - I_3}{\sinh(\alpha L_1)} = \frac{I_2 \cosh(\alpha L_2)}{\sinh(\alpha L_2)} \quad (3.32)$$

หรือ

$$I_1 \frac{1}{\tanh(\alpha L_1)} - I_3 \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} - I_2 \frac{1}{\tanh(\alpha L_2)} = 0 \quad (3.33)$$

และแรงดันที่โนด b จะมีค่าเท่ากัน นั่นคือ $u'_b = u''_b$ เขียนได้ดังสมการ

$$Z_C \left[\frac{I_1 - I_3 \cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1)} \right] = -Z_C \left[\frac{I_4 \cosh(\alpha L_3)}{\sinh(\alpha L_3)} \right] \quad (3.34)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{I_1 - I_3 \cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1)} = -\frac{I_4 \cosh(\alpha L_3)}{\sinh(\alpha L_3)} \quad (3.35)$$

หรือ

$$I_1 \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} - I_3 \frac{1}{\tanh(\alpha L_1)} + I_4 \frac{1}{\tanh(\alpha L_3)} = 0 \quad (3.36)$$

หลังจากนั้นเพื่อให้แก้สมการได้ง่ายขึ้นจะทำการจัดรูปสมการให้เหลือ 2 ตัวแปร นั่น คือ I_1 และ I_3 จากกระแสไฟฟ้าที่โนด a จะได้ว่า

$$I_2 = I - I_1 \quad (3.37)$$

นำสมการที่ (3.37) แทนในสมการที่ (3.33) จะเขียนได้ดังสมการ

$$I_1 \frac{1}{\tanh(\alpha L_1)} - I_3 \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} - (I - I_1) \frac{1}{\tanh(\alpha L_2)} = 0 \quad (3.38)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$I_1 \left[\frac{1}{\tanh(\alpha L_1)} + \frac{1}{\tanh(\alpha L_2)} \right] - I_3 \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} = I \frac{1}{\tanh(\alpha L_2)} \quad (3.39)$$

และจากกระแสที่โนด b จะได้ว่า

$$I_4 = I - I_3 \quad (3.40)$$

นำสมการที่ (3.40) แทนในสมการที่ (3.36) จะเขียนได้ดังสมการ

$$I_1 \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} - I_3 \frac{1}{\tanh(\alpha L_1)} + (I - I_3) \frac{1}{\tanh(\alpha L_3)} = 0 \quad (3.41)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$-I_1 \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} + I_3 \left[\frac{1}{\tanh(\alpha L_1)} + \frac{1}{\tanh(\alpha L_3)} \right] = I \frac{1}{\tanh(\alpha L_3)} \quad (3.42)$$

จากสมการที่ (3.39) และ (3.42) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} b+c & -a \\ -a & b+d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_3 \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

เมื่อ

$$a = \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} \quad b = \frac{1}{\tanh(\alpha L_1)} \quad c = \frac{1}{\tanh(\alpha L_2)} \quad \text{และ} \quad d = \frac{1}{\tanh(\alpha L_3)}$$

ดังนั้นสามารถหา I_1 I_2 I_3 และ I_4 ได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} Ic & -a \\ Id & b+d \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} b+c & -a \\ -a & b+d \end{vmatrix}} = I \left(\frac{cb+cd+ad}{b^2+bd+cb+cd-a^2} \right) \quad (3.44)$$

และ

$$I_3 = \frac{\begin{vmatrix} b+c & Ic \\ -a & Id \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} b+c & -a \\ -a & b+d \end{vmatrix}} = I \left(\frac{bd+cd+ac}{b^2+bd+cb+cd-a^2} \right) \quad (3.45)$$

จาก $I_2 = I - I_1$ จะได้ว่า

$$I_2 = I - I \frac{cb+cd+ad}{b^2+bd+cb+cd-a^2} = I \left(\frac{b^2+bd-a^2-ad}{b^2-bd-cb+cd-a^2} \right) \quad (3.46)$$

และจาก $I_4 = I - I_3$ จะได้ว่า

$$I_4 = I - I \frac{bd+cd+ac}{b^2+bd+cb+cd-a^2} = I \left(\frac{b^2+cb-a^2-ac}{b^2+bd+cb+cd-a^2} \right) \quad (3.47)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} -a^2 + b^2 &= \left(-\frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} \right)^2 + \left(\frac{1}{\tanh(\alpha L_1)} \right)^2 \\ &= -\operatorname{csch}^2(\alpha L_1) + \operatorname{coth}^2(\alpha L_1) \\ &= 1 \end{aligned} \quad (3.48)$$

ดังนั้น I_1 I_2 I_3 และ I_4 มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} I_1 &= I \left(\frac{cb+cd+ad}{b^2+bd+cb+cd-a^2} \right) & I_2 &= I \left(\frac{b^2+bd-a^2-ad}{b^2-bd-cb+cd-a^2} \right) \\ I_3 &= I \left(\frac{bd+cd+ac}{b^2+bd+cb+cd-a^2} \right) & I_4 &= I \left(\frac{b^2+cb-a^2-ac}{b^2+bd+cb+cd-a^2} \right) \end{aligned}$$

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว

เป็นแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว (Simplified mathematical model for single-side power supply: SMM-SPS) เป็นการประมาณค่าจากแบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์แบบพื้นฐานสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวเนื่องจากสมการเบื้องต้นมีความซับซ้อนค่อนข้างสูงดังนั้นเพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณจะกำหนดให้ L_2 และ L_3 มีค่าเป็นอนันต์ และกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามสมการ

$$I_1 = I_3 \quad (3.49)$$

$$I_2 = I_4$$

ดังนั้นคำตอบของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางไปยังดินในส่วนที่ 1 เขียนได้ดังสมการ

$$I'_R(x) = I_1 \left[\frac{\sinh(\alpha x) + \sinh(\alpha(L_1 - x))}{\sinh(\alpha L_1)} \right] \quad (3.50)$$

$$U'_{RE}(x) = Z_C I_1 \left[\frac{\cosh(\alpha x) - \cosh(\alpha(L_1 - x))}{\sinh(\alpha L_1)} \right] \quad (3.51)$$

คำตอบของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางไปยังดินในส่วนที่ 2 เขียนได้ดังสมการ

$$I''_R(x) = -I_2 \left[\frac{\sinh(\alpha(L_2 - x))}{\sinh(\alpha L_2)} \right] \quad (3.52)$$

จาก

$$\sinh(\alpha L_2 - \alpha x) = \sinh \alpha L_2 \cosh \alpha x - \cosh \alpha L_2 \sinh \alpha x$$

จะพบว่า

$$\begin{aligned} I''_R(x) &= -I_2 \left[\frac{\sinh(\alpha L_2) \cosh(\alpha x) - \cosh(\alpha L_2) \sinh(\alpha x)}{\sinh(\alpha L_2)} \right] \\ &= -I_2 [\cosh(\alpha x) - \coth(\alpha L_2) \sinh(\alpha x)] \end{aligned} \quad (3.53)$$

โดยที่

$$\cosh(\alpha x) - \sinh(\alpha x) = e^{-\alpha x} \text{ และ } \coth(\alpha L_2) = \frac{1}{\tanh(\alpha L_2)} = 1$$

ดังนั้น

$$I_R''(x) = -I_2 e^{-\alpha x} \quad (3.54)$$

และแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางไปยังดินในส่วนของที่ 2 เขียนได้ดังสมการ

$$U_{RE}''(x) = I_2 Z_C e^{-\alpha x} \quad (3.55)$$

และคำตอบของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางไปยังดินในส่วนของที่ 2 จะคำนวณเช่นเดียวกับสมการในส่วนที่ 2 สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_R'''(x) = I_2 e^{-\alpha x} \quad (3.56)$$

$$U_{RE}'''(x) = -I_2 Z_C e^{-\alpha x} \quad (3.57)$$

จากสมการข้างต้นจะพบว่าติดอยู่ในรูปตัวแปร I_1 และ I_2 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.39) และ (3.50) สามารถเขียนสมการที่ (3.39) ใหม่ได้ดังสมการ

$$I_1 \left[\frac{\cos(\alpha L_1) + \sinh(\alpha L_1) - 1}{\tanh(\alpha L_1)} \right] = I \quad (3.58)$$

ดังนั้น I_1 มีค่าเป็น

$$I_1 = I \left[\frac{\sinh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1) + \cosh(\alpha L_1) - 1} \right] = I \left[\frac{\sinh(\alpha L_1)}{e^{\alpha L_1} - 1} \right] \quad (3.59)$$

โดยที่

$$\cosh(\alpha L_1) + \sinh(\alpha L_1) = e^{\alpha L_1}$$

และ I_2 มีค่าเป็น

$$\begin{aligned}
 I_2 &= I - I_1 = I - I \left[\frac{\sinh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1) + \cosh(\alpha L_1) - 1} \right] \\
 &= I \left[\frac{\cosh(\alpha L_1) - 1}{e^{\alpha L_1} - 1} \right]
 \end{aligned} \tag{3.60}$$

ดังนั้นคำตอบของกระแสไฟฟ้าในส่วนที่ 1 เขียนได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 I'_R(x) &= I \left[\frac{\sinh(\alpha L_1)}{e^{\alpha L_1} - 1} \right] \left[\frac{\sinh(\alpha x) + \sinh(\alpha(L_1 - x))}{\sinh(\alpha L_1)} \right] \\
 &= I \left[\frac{\sinh(\alpha x) + \sinh(\alpha(L_1 - x))}{e^{\alpha L_1} - 1} \right] \\
 &= \frac{I}{2} \left[\frac{(1 - e^{-\alpha L_1})e^{\alpha x} + (e^{\alpha L_1} - 1)e^{-\alpha x}}{e^{\alpha L_1} - 1} \right]
 \end{aligned} \tag{3.61}$$

และแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางไปยังดินในส่วนที่ 1 เขียนได้ดังสมการ

$$U'_{RE}(x) = \frac{IZ_C}{2} \left[\frac{(1 - e^{-\alpha L_1})e^{\alpha x} - (e^{\alpha L_1} - 1)e^{-\alpha x}}{e^{\alpha L_1} - 1} \right] \tag{3.62}$$

กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางไปยังดินในส่วนที่ 2 เขียนได้ดังสมการ

$$I''_R(x) = -I \left[\frac{\cosh(\alpha L_1) - 1}{e^{\alpha L_1} - 1} \right] e^{-\alpha x} = -\frac{I}{2} \left[\frac{e^{\alpha L_1} + e^{-\alpha L_1} - 2}{e^{\alpha L_1} - 1} \right] e^{-\alpha x} \tag{3.63}$$

$$U''_{RE}(x) = \frac{IZ_C}{2} \left[\frac{e^{\alpha L_1} + e^{-\alpha L_1} - 2}{e^{\alpha L_1} - 1} \right] e^{-\alpha x} \tag{3.64}$$

กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางไปยังดินในส่วนที่ 3 เขียนได้ดังสมการ

$$I'''_R(x) = -\frac{I}{2} \left[\frac{e^{\alpha L} + e^{-\alpha L} - 2}{e^{\alpha L} - 1} \right] e^{-\alpha x} \tag{3.65}$$

$$U_{RE}'''(x) = -\frac{IZ_C}{2} \left[\frac{e^{\alpha L} + e^{-\alpha L} - 2}{e^{\alpha L} - 1} \right] e^{-\alpha x} \quad (3.66)$$

จากแบบจำลองทั้งสองจะพบว่าแบบจำลองแบบดั้งเดิมจะมีการคำนวณที่ซับซ้อนมากและจะติดอยู่ในรูปตัวแปรมากมายแต่ก็สามารถคำนวณค่าในช่วงที่ความยาวแต่ละส่วนที่จำกัดและแตกต่างกันได้ ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายจะทำให้รูปแบบสมการง่ายขึ้นสามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์มีสำคัญต่อกระแสรั่วไหลได้ง่ายขึ้นแต่ไม่สามารถนำมาคำนวณค่าในช่วงที่ความยาวที่จำกัดได้อย่างแม่นยำ

3. การประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ราง

จากสมการแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางกับดินในส่วนที่ 1 ในแบบจำลองลดความซับซ้อนจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อรถไฟอยู่ที่ตำแหน่ง $x = L$ ดังนั้นมีค่าเป็น

$$U'_{RE}(L) = \frac{IZ_C}{2} \left[\frac{e^{\alpha L} + e^{-\alpha L} - 2}{e^{\alpha L} - 1} \right] = \frac{IZ_C}{2} \left[1 + \frac{e^{-\alpha L} - 1}{e^{\alpha L} - 1} \right] \quad (3.67)$$

เมื่อค่า L สูงมากๆ จะพบว่าสมการคำนวณอย่างง่ายสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว (Simple calculation equation for single-side power supply: SCE-SPS) ของการประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางแสดงได้ดังสมการ

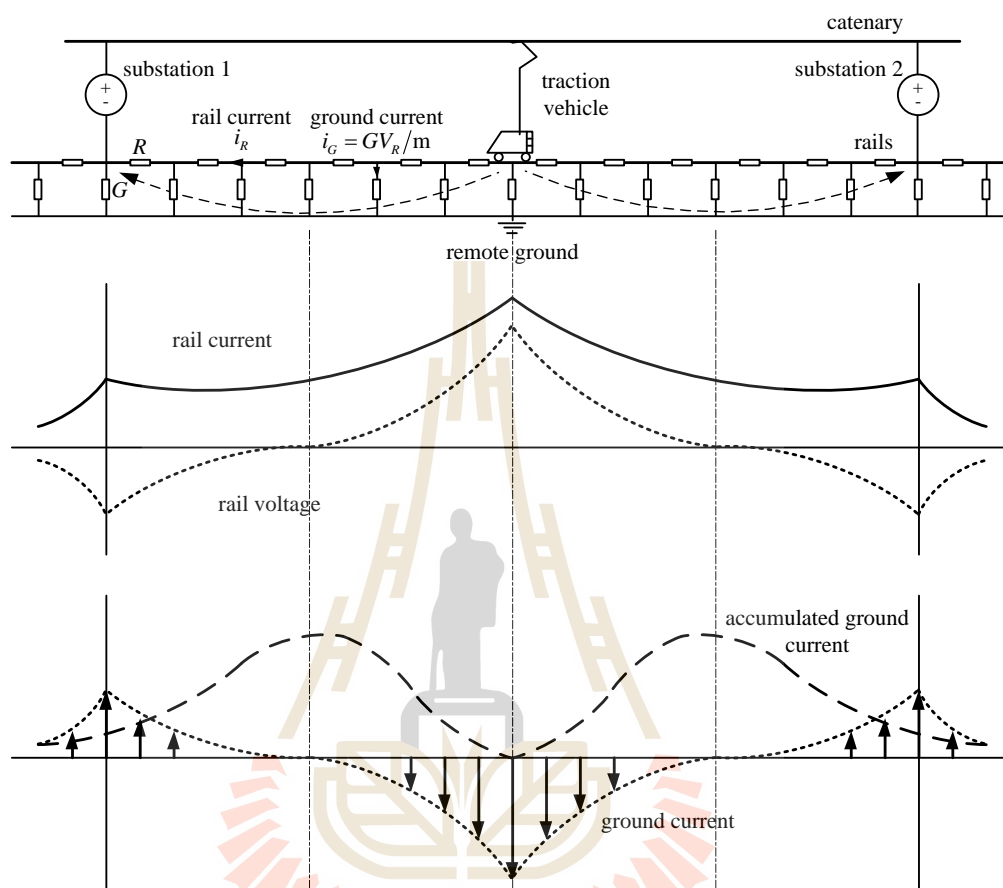
$$U'_{RE}(L) = \frac{IZ_C}{2} \left[1 + \frac{-1}{e^{\alpha L}} \right] = \frac{IZ_C}{2} [1 + e^{-\alpha L}] \quad (3.68)$$

จากสมการดังกล่าวจะพบว่ามีค่าเหมือนกันกับสมการ C.1 ในมาตรฐาน EN 50122-2 เมื่อ $\alpha = 1/L_C$ เนื่องจากเป็นสมการในการประมาณจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

3.2.2 กรณีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้านเพื่อคำนวณกระแสรั่วไหลจะต้องสามารถคำนวณหาศักย์ไฟฟ้าที่ราง กระแสไฟฟ้าที่ราง และกระแสรั่วไหล แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งได้แสดงแบบจำลองสายส่งกับกราฟศักย์ไฟฟ้าที่ราง กระแสไฟฟ้าที่ราง และกระแสสะสมในดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยที่ไม่มีการต่อลงดินทางไฟฟ้า (Friedrich et al., 2009; Hadi, 2002)

ดังนั้นแบบจำลองที่นำเสนอจะเป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าสองด้านให้แก่รถไฟ 1 ขบวน โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.5

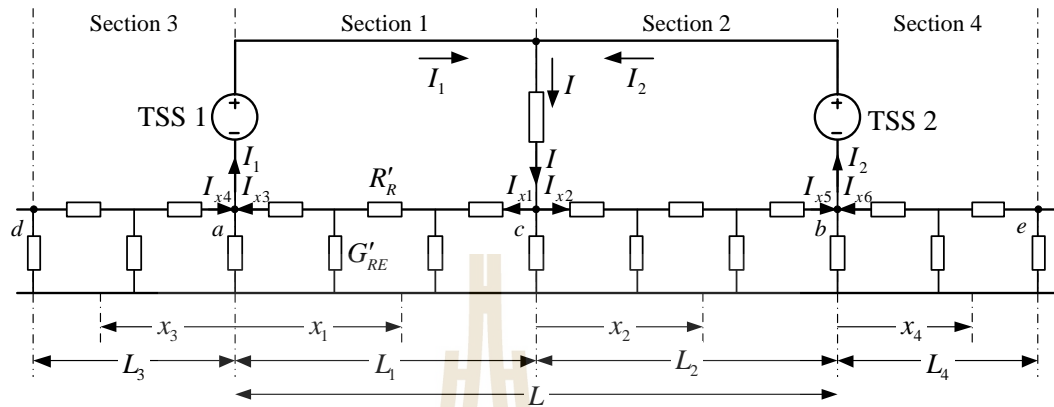


รูปที่ 3.5 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพื้นฐานสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน

เป็นแบบจำลองแบบพื้นฐานสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน (Classical mathematical model for double-side power supply: CMM-DPS) จะพิจารณาจากแบบจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนให้แก่รถไฟประกอบไปด้วย สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า รถไฟ ความต้านทานรางต่อหน่วยความยาวและความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว เพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณจากรูปที่ 3.6 สามารถแบ่งช่วงในการคำนวณจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ส่วนที่ 2 ส่วนที่ 3 และ ส่วนที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เมื่อ I_1 I_{x3} I_{x4} และ L_1 คือ กระแสที่ไหลเข้าออกที่จุด a และความยาวที่พิจารณาในส่วนที่ 1 ตามลำดับ I I_{x1} I_{x2} และ L_2 คือ กระแสที่ไหลเข้าออกที่จุด c และความยาวที่

พิจารณาในส่วนที่ 2 ตามลำดับ I_2 , I_{x5} และ I_{x6} คือ กระแสที่ไหลออกเข้าออกที่จุด b และ ตามลำดับ และ L_3 และ L_4 คือ ความยาวที่พิจารณาในส่วนที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 การแบ่งช่วงการคำนวณสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน

ส่วนที่ 1

การหาขอบเขตของกระแสไฟฟ้าในส่วนที่ 1 สามารถพิจารณาได้จากแบบจำลองในรูปที่ 3.6 (section 1) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เป็นระยะ x_1 จากจุด a ไปยังจุด c เป็นระยะทาง L_1 ดังนั้นขอบเขตของกระแสไฟฟ้าในส่วนที่ 1 โดยกำหนดให้ที่ $x_1 = 0$ (ที่จุด a) และที่ $x_1 = L_1$ (ที่จุด c) และนำค่าดังกล่าวแทนในสมการที่ (3.9) สามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้าที่จุด a และจุด c ได้ดังสมการที่ (3.69) และ (3.70) ตามลำดับ

$$I'_R(0) = Ae^{\alpha(0)} + Be^{-\alpha(0)} = A + B \quad (3.69)$$

$$I'_T(L_1) = Ae^{\alpha L_1} + Be^{-\alpha L_1} \quad (3.70)$$

เมื่อ $I'_R(0) = I_{x3}$ และ $I'_T(L_1) = I_{x1}$ จากสมการดังกล่าวจะพบว่าติดอยู่ในรูปของตัวแปร A และ B ซึ่งคำนวณได้ดังต่อไปนี้

จาก

$$B = I_{x3} - A \quad (3.71)$$

ดังนั้น

$$Ae^{\alpha L_1} + (I_{x3} - A)e^{-\alpha L_1} = I_{x1}$$

$$A = \frac{I_{x1} - I_{x3}e^{-\alpha L_1}}{e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}} \quad (3.72)$$

และ

$$B = I_{x3} - \frac{I_{x1} - I_{x3}e^{-\alpha L_1}}{e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}} = \frac{-I_{x1} + I_{x3}e^{\alpha L_1}}{e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}} \quad (3.73)$$

นำค่า A และ B แทนในสมการที่ (3.9) จะได้เป็นคำตอบของกระแสที่รางในส่วนที่ 1 ดังสมการ

$$I'_R(x) = \frac{I_{x1} - I_{x3}e^{-\alpha L_1}}{e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}} e^{\alpha x} + \frac{-I_{x1} + I_{x3}e^{\alpha L_1}}{e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}} e^{-\alpha x}$$

$$= \frac{I_{x1} \sinh(\alpha x) + I_{x3} \sinh(\alpha(L_1 - x))}{\sinh(\alpha L_1)} \quad (3.74)$$

จากสมการที่ (3.5) และสมการที่ (3.74) สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่รางได้ดังต่อไปนี้

$$U'_{RE}(x) = \frac{1}{G'_{RE}} \frac{d}{dx} \left(\frac{I_{x1} \sinh(\alpha x) + I_{x3} \sinh(\alpha(L_1 - x))}{\sinh(\alpha L_1)} \right)$$

$$= \frac{1}{G'_{RE}} \left(\frac{\alpha I_{x1} \cosh(\alpha x) + (-\alpha) I_{x3} \cosh(\alpha(L_1 - x))}{\sinh(\alpha L_1)} \right) \quad (3.75)$$

$$= Z_C \left(\frac{I_{x1} \cosh(\alpha x) - I_{x3} \cosh(\alpha(L_1 - x))}{\sinh(\alpha L_1)} \right)$$

โดยที่ $Z_C = \alpha/G'_{RE}$ หรือ $Z_C = \sqrt{R'_R/G'_{RE}}$ ดังนั้นสามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่ราง U'_a และ U'_c ที่จุด a และ c ในรูปที่ 3 ได้ดังต่อไปนี้

$$U'_A = U'_{RE}(0) = Z_C \left(\frac{I_{x1} - I_{x3} \cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1)} \right) \quad (3.76)$$

$$U'_C = U'_{RE}(L_1) = Z_C \left(\frac{I_{x1} \cosh(\alpha L_1) - I_{x3}}{\sinh(\alpha L_1)} \right) \quad (3.77)$$

ส่วนที่ 2

การพิจารณาที่ขอบเขตของกระแสไฟฟ้าในส่วนที่ 2 จะพิจารณาในกรณีที่รถไฟเคลื่อนที่เป็นระยะ x_2 จากจุด c ไปยังจุด b เป็นระยะทาง L_2 สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกันกับในส่วนที่ 1 ได้ดังสมการที่ (3.78) และ (3.79) ตามลำดับ

$$I''_R(0) = I_{x2} = A + B \quad (3.78)$$

$$I''_R(L_2) = I_{x4} = Ae^{\alpha L_2} + Be^{-\alpha L_2} \quad (3.79)$$

จากสมการที่ (3.78) และ (3.79) สามารถคำนวณ A และ B ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$A = \frac{-I_{x2}e^{-\alpha L_2} + I_{x4}}{e^{\alpha L_2} - e^{-\alpha L_2}} \text{ และ } B = \frac{I_{x2}e^{\alpha L_2} - I_{x4}}{e^{\alpha L_2} - e^{-\alpha L_2}}$$

จะได้เป็นคำตอบของกระแสในส่วนที่ 2 ดังสมการที่ (3.80)

$$I''_R(x) = \frac{I_{x2} \sinh(\alpha(L_2 - x)) + I_{x4} \sinh(\alpha x)}{\sinh(\alpha L_2)} \quad (3.80)$$

จะได้คำตอบของแรงดันไฟฟ้าที่รางในส่วนที่ 2 ดังสมการที่ (3.81)

$$U''_{RE}(x) = Z_C \left(\frac{-I_{x2} \cosh(\alpha(L_2 - x)) + I_{x4} \cosh(\alpha x)}{\sinh(\alpha L_2)} \right) \quad (3.81)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่ราง U''_c และ U''_b ที่จุด c และ b ได้ดังนี้

$$U''_c = U''_{RE}(0) = I_{x2} Z_C \left(\frac{-I_{x2} \cosh(\alpha L_2) + I_{x4}}{\sinh(\alpha L_2)} \right) \quad (3.82)$$

$$U_b'' = U_{RE}''(L) = I_{x2} Z_C \left(\frac{-I_{x2} + I_{x4} \cos(\alpha L_2)}{\sinh(\alpha L_2)} \right) \quad (3.83)$$

ส่วนที่ 3

การพิจารณาที่ขอบเขตของกระแสไฟฟ้าในส่วนนี้จะพิจารณาในกรณีที่รถไฟเคลื่อนที่เป็นระยะ x_3 จากจุด a ไปยังจุด d เป็นระยะทาง L_3 สามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้าที่จุด a และจุด d และกำหนดให้ L_3 มีระยะเป็นอนันต์จะทำให้ $I_R'''(L_3) = 0$ ดังนั้นสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.84) และ (3.85) ตามลำดับ

$$I_R'''(0) = I_{x5} = A + B \quad (3.84)$$

$$I_R'''(L_3) = 0 = Ae^{\alpha L_3} + Be^{-\alpha L_3} \quad (3.85)$$

แก้สมการด้านบนได้สมการ A และ B ดังต่อไปนี้

$$A = -I_{x5} \frac{e^{-\alpha L_3}}{e^{\alpha L_3} - e^{-\alpha L_3}} \text{ และ } B = I_{x5} \frac{e^{\alpha L_3}}{e^{\alpha L_3} - e^{-\alpha L_3}}$$

ดังนั้นกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่รางในส่วนที่ 3 ได้ดังสมการ

$$I_R'''(x) = I_{x5} \frac{\sinh(\alpha(L_3 - x))}{\sinh(\alpha L_3)} \quad (3.86)$$

$$U_{RE}'''(x) = -I_{x5} Z_C \left(\frac{\cosh(\alpha(L_3 - x))}{\sinh(\alpha L_3)} \right) \quad (3.87)$$

สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดิน U_a''' ที่จุด a ได้ดังนี้

$$U_a''' = U_{RE}'''(0) = -I_{x5} Z_C \left(\frac{\cosh(\alpha L_3)}{\sinh(\alpha L_3)} \right) \quad (3.88)$$

ส่วนที่ 4

การพิจารณาที่ขอบเขตของกระแสไฟฟ้าในส่วนที่ 4 จะพิจารณาในกรณีที่รถไฟเคลื่อนที่เป็นระยะ x_4 จากจุด b ไปยังจุด e เป็นระยะทาง L_4 สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกันกับในส่วนที่ 3 ได้ดังสมการที่ (3.89) และ (3.90) ตามลำดับ

$$I_R^{IV}(0) = I_{x6} = A + B \quad (3.89)$$

$$I_R^{IV}(L_4) = L_4 = Ae^{\alpha L_4} + Be^{-\alpha L_4} \quad (3.90)$$

แก้สมการด้านบนได้สมการ A และ B ดังต่อไปนี้

$$A = -I_{x6} \frac{e^{-\alpha L_4}}{e^{\alpha L_4} - e^{-\alpha L_4}} \text{ และ } B = I_{x6} \frac{e^{\alpha L_4}}{e^{\alpha L_4} - e^{-\alpha L_4}}$$

ดังนั้นคำตอบของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่รางในส่วนที่ 4 แสดงได้สมการที่ (3.91) และ (3.92) ตามลำดับ

$$I_R^{IV}(x) = I_{x6} \frac{\sinh(\alpha(L_4 - x))}{\sinh(\alpha L_4)} \quad (3.91)$$

$$U_{RE}^{IV}(x) = -I_{x6} Z_C \left(\frac{\cosh(\alpha(L_4 - x))}{\sinh(\alpha L_4)} \right) \quad (3.92)$$

สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่ราง U_b^{IV} ที่จุด b ได้ดังต่อไปนี้

$$U_b^{IV} = U_{RE}^{IV}(0) = -I_{x6} Z_C \left(\frac{\cosh(\alpha L_4)}{\sinh(\alpha L_4)} \right) \quad (3.93)$$

จากสมการเบื้องต้นจะพบว่าสมการของกระแสไฟฟ้าทั้งหมดจะติดตัวแปร $I_{x1} I_{x2} I_{x3} I_{x4} I_{x5}$ และ I_{x6} โดยที่แรงดันที่โหนด a b และ c จะมีค่าเท่ากัน นั่นคือ จาก $U'_A = U'''_A$ จะได้ว่า

$$Z_C \left(\frac{I_{x1} - I_{x3} \cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1)} \right) = -I_{x5} Z_C$$

$$\left(I_{x1} \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} - I_{x3} \frac{\cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1)} \right) + I_{x5} = 0 \quad (3.94)$$

จาก $U_b'' = U_b^{IV}$ จะได้ว่า

$$Z_C \left(\frac{I_{x2} - I_{x4} \cos(\alpha L_2)}{\sinh(\alpha L_2)} \right) = -I_{x6} Z_C$$

$$\left(I_{x2} \frac{1}{\sinh(\alpha L_2)} - I_{x4} \frac{\cos(\alpha L_2)}{\sinh(\alpha L_2)} \right) + I_{x6} = 0 \quad (3.95)$$

และจาก $U_c' = U_c''$ จะพบว่า

$$Z_C \left(\frac{I_{x1} \cosh(\alpha L_1) - I_{x3}}{\sinh(\alpha L_1)} \right) = Z_C \left(\frac{-I_{x2} \cosh(\alpha L_2) + I_{x4}}{\sinh(\alpha L_2)} \right)$$

$$I_{x1} \frac{\cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1)} - I_{x3} \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} = -I_{x2} \frac{\cosh(\alpha L_2)}{\sinh(\alpha L_2)} + I_{x4} \frac{1}{\sinh(\alpha L_2)} \quad (3.96)$$

จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ที่โหนด a , b และ c ในรูปที่ 3.6 จะมีค่าดังสมการที่ (3.94) – (3.95) แสดงได้ดังนี้

$$I_1 = I_{x3} + I_{x5} \quad (3.97)$$

$$I_2 = I_{x4} + I_{x6} \quad (3.98)$$

$$I = I_{x1} + I_{x2} \quad (3.99)$$

โดยที่

$$I_1 = \frac{L - L_1}{L} I = \frac{L_2}{L} I \quad (3.100)$$

$$I_2 = \frac{L_1}{L} I \quad (3.101)$$

จากสมการที่ (3.97) – (3.101) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$aI_{x1} - cI_{x3} + eI_{x5} = 0 \quad (3.102)$$

$$bI_{x2} - dI_{x4} + fI_{x6} = 0 \quad (3.103)$$

$$cI_{x1} - dI_{x2} - aI_{x3} + bI_{x4} = 0 \quad (3.104)$$

$$I_{x3} + I_{x5} = I_1 = \frac{L_2}{L} I \quad (3.105)$$

$$I_{x4} + I_{x6} = I_2 = \frac{L_1}{L} I \quad (3.106)$$

$$I_{x1} + I_{x2} = I \quad (3.107)$$

เมื่อ

$$a = \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} \quad b = \frac{1}{\sinh(\alpha L_2)} \quad c = \frac{1}{\tanh(\alpha L_1)} \quad d = \frac{1}{\tanh(\alpha L_2)}$$

และ $f = \frac{1}{\tanh(\alpha L_4)}$

และสามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปเมตริกซ์เพื่อง่ายแก่การแก้สมการได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} a & 0 & -c & 0 & e & 0 \\ 0 & b & 0 & -d & 0 & f \\ c & -d & -a & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{x1} \\ I_{x2} \\ I_{x3} \\ I_{x4} \\ I_{x5} \\ I_{x6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ IL_2/L \\ IL_1/L \\ I \end{bmatrix} \quad (3.108)$$

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน

เป็นแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน (Simplified mathematical model for double-side power supply: SMM-DPS) เป็น การ ป ระ มาณ ค ่า จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพื้นฐาน เนื่องจากสมการเบื้องต้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพื้นฐานมีความซับซ้อนค่อนข้างสูง โดยพิจารณาให้ L_3 และ L_4 มีค่าเป็นอนันต์ จะพบว่าพจน์ในสมการที่ (3.109) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพื้นฐานมีค่าเป็น 1 ดังสมการ

$$\frac{\cosh(\alpha L_3)}{\sinh(\alpha L_3)} = 1, \quad \left(\frac{\cosh(\alpha L_4)}{\sinh(\alpha L_4)} \right) = 1 \quad (3.109)$$

หลังจากนั้นทำการจัดลดตัวแปรให้อยู่ในรูปแปร I_{x1} I_{x2} I_{x3} และ I_{x4} ได้จากสมการที่ (3.109) แทนในสมการที่ (3.94) – (3.96) ได้ดังนี้

$$I_{x1} \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} - I_{x3} \frac{\cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1)} + I_{x5} = 0 \quad (3.110)$$

$$I_{x2} \frac{1}{\sinh(\alpha L_2)} - I_{x4} \frac{\cosh(\alpha L_2)}{\sinh(\alpha L_2)} + I_{x6} = 0 \quad (3.111)$$

$$I_{x1} \frac{\cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1)} - I_{x2} \frac{\cosh(\alpha L_2)}{\sinh(\alpha L_2)} - I_{x3} \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} + I_{x4} \frac{1}{\sinh(\alpha L_2)} = 0 \quad (3.112)$$

จากสมการที่ (3.97) และ (3.98) แทนในสมการที่ (3.110) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} I_{x1} \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} - I_{x3} \frac{\cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1)} + \frac{L_2}{L_1 + L_2} I - I_{x3} &= 0 \\ I_{x1} \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} - I_{x3} \left(\frac{1}{\tanh(\alpha L_1)} + 1 \right) &= -\frac{L_2}{L_1 + L_2} I \end{aligned} \quad (3.113)$$

และ แทนในสมการที่ (3.111) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
I_{x2} \frac{1}{\sinh(\alpha L_2)} - I_{x4} \frac{\cos(\alpha L_2)}{\sinh(\alpha L_2)} + \frac{L_1}{L_1 + L_2} I - I_{x4} &= 0 \\
I_{x2} \frac{1}{\sinh(\alpha L_2)} - I_{x4} \left(\frac{1}{\tanh(\alpha L_2)} + 1 \right) &= -\frac{L_1}{L_1 + L_2} I
\end{aligned} \tag{3.114}$$

นำสมการที่ (3.113) (3.114) (3.112) และ (3.107) เขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (3.115) – (3.119) ตามลำดับ ดังแสดงต่อไปนี้

$$aI_{x1} - (c+1)I_{x3} = -\frac{L_2}{L_1 + L_2} I \tag{3.115}$$

$$bI_{x2} - (d+1)I_{x4} = -\frac{L_1}{L_1 + L_2} I \tag{3.116}$$

$$cI_{x1} - dI_{x2} - aI_{x3} + bI_{x4} = 0 \tag{3.117}$$

$$I_{x1} + I_{x2} = I \tag{3.118}$$

เมื่อ

$$a = \frac{1}{\sinh(\alpha L_1)} \quad b = \frac{1}{\sinh(\alpha L_2)} \quad c = \frac{1}{\tanh(\alpha L_1)} \quad \text{และ} \quad d = \frac{1}{\tanh(\alpha L_2)}$$

จากสมการที่ (3.115) – (3.118) สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} a & 0 & -(c+1) & 0 \\ 0 & b & 0 & -(d+1) \\ c & -d & -a & b \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{x1} \\ I_{x2} \\ I_{x3} \\ I_{x4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -IL_2/L \\ -IL_1/L \\ 0 \\ I \end{bmatrix} \tag{3.119}$$

3. การประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ราง

จากสมการแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางกับดินในส่วนที่ 1 (ในรูปที่ 3.6) จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อรถไฟอยู่ที่ตำแหน่ง $x = L/2$ หรือ $L_1 = L_2$ ดังนั้นจะทำให้ $L_1 = L_2 = L/2$ และ $I_{x3} = I_{x4}$ แล้วจะพบว่า

$$I_{x1} = I_{x2} = \frac{I}{2} \quad (3.120)$$

จากสมการที่ (3.120) เขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (3.121)

$$\frac{I}{2} \frac{1}{\sinh(\frac{\alpha L}{2})} - I_{x3} \left(\frac{1}{\tanh(\frac{\alpha L}{2})} + 1 \right) = -\frac{I}{2} \quad (3.121)$$

และจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_{x3} \left(\frac{1}{\tanh(\alpha L/2)} + 1 \right) &= \frac{I}{2} \left(1 + \frac{1}{\sinh(\alpha L/2)} \right) \\ I_{x3} \left(\frac{\cosh(\alpha L/2) + \sinh(\alpha L/2)}{\sinh(\alpha L/2)} \right) &= \frac{I}{2} \left(\frac{\sinh(\alpha L/2) + 1}{\sinh(\alpha L/2)} \right) \\ I_{x3} &= \frac{I}{2} \left(\frac{\sinh(\alpha L/2) + 1}{\cosh(\alpha L/2) + \sinh(\alpha L/2)} \right) \end{aligned} \quad (3.122)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการอย่างง่ายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
I_{x3} &= \frac{I}{2} \left(\frac{\sinh(\alpha L/2) + 1}{\cosh(\alpha L/2) + \sinh(\alpha L/2)} \right) \\
&= \frac{I}{2} (\sinh(\alpha L/2) + 1) (\cosh(\alpha L/2) - \sinh(\alpha L/2)) \\
&= \frac{I}{2} (\sinh(\alpha L/2) \cosh(\alpha L/2) - \sinh^2(\alpha L/2) + \cosh(\alpha L/2) - \sinh(\alpha L/2)) \\
&= \frac{I}{4} (1 + (\sinh(\alpha L) - \cosh(\alpha L)) + 2(\cosh(\alpha L/2) - \sinh(\alpha L/2))) \\
&= \frac{I}{4} (1 + e^{-\alpha L} + 2e^{-\alpha L/2}) \\
&= \frac{I}{4} (1 + e^{-\alpha L/2})^2
\end{aligned} \tag{3.123}$$

เมื่อ

$$\frac{\cosh 2x + 1}{2} = \cosh^2 x \text{ และ } \frac{\sinh 2x}{2} = \sinh x \cosh x$$

จากสมการที่ (3.114) จัดรูปให้อยู่ในรูปตัวแปร I_{x5} จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
I_{x5} &= \frac{I}{2} - \frac{I}{2} \left(\frac{\sinh(\alpha L/2) + 1}{\cosh(\alpha L/2) + \sinh(\alpha L/2)} \right) \\
&= \frac{I}{2} \left(1 - \frac{\sinh(\alpha L/2) + 1}{\cosh(\alpha L/2) + \sinh(\alpha L/2)} \right) \\
&= \frac{I}{2} \left(\frac{\cosh(\alpha L/2) + \sinh(\alpha L/2) - \sinh(\alpha L/2) - 1}{\cosh(\alpha L/2) + \sinh(\alpha L/2)} \right) \\
&= \frac{I}{2} \left(\frac{\cosh(\alpha L/2) - 1}{\cosh(\alpha L/2) + \sinh(\alpha L/2)} \right)
\end{aligned} \tag{3.124}$$

หรือเขียนใหม่ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}
I_{x5} &= \frac{I}{2} (\cosh(\alpha L/2) - 1) (\cosh(\alpha L/2) - \sinh(\alpha L/2)) \\
&= \frac{I}{2} (\cosh^2(\alpha L/2) - \cosh \alpha L/2 \sinh \alpha L/2 - \cosh(\alpha L/2) + \sinh(\alpha L/2))
\end{aligned} \tag{3.125}$$

หรือ

$$\begin{aligned}
 I_{x5} &= \frac{I}{2} \left(\frac{\cosh(\alpha L) + 1}{2} - \frac{\sinh(\alpha L)}{2} - (\cosh(\alpha L/2) - \sinh(\alpha L/2)) \right) \\
 &= \frac{I}{4} (1 - 2(\cosh(\alpha L/2) - \sinh(\alpha L)) + (\cosh(\alpha L) - \sinh(\alpha L))) \\
 &= \frac{I}{4} (1 - 2e^{-\alpha L/2} + e^{-\alpha L}) \\
 &= \frac{I}{4} (1 - e^{-\alpha L/2})^2
 \end{aligned} \tag{3.126}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 \cosh 2x &= \cosh^2 x + \sinh^2 x \\
 &= 2\cosh^2 x - 1 \quad \sinh 2x = 2\sinh x \cosh x \quad \text{และ} \quad \frac{\cosh 2x - 1}{2} = \sinh^2 x \\
 &= 2\sinh^2 x + 1
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3.123) และ (3.126) สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่จุด a b และ c ได้ดัง
สมการต่อไปนี้

$$U_a''' = -I_{x5} Z_c = -\frac{I}{4} Z_c (1 - e^{-\alpha L/2})^2 \tag{3.127}$$

$$\begin{aligned}
 U_a' &= U_b' = Z_c \left(\frac{I_{x1} - I_{x3} \cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\alpha L_1)} \right) \\
 &= Z_c \frac{I}{2} \left(\frac{1 - \cosh(\alpha L/2)}{\cosh(\alpha L/2) + \sinh(\alpha L/2)} \right) \\
 &= Z_c \frac{I}{2} (\cosh(\alpha L/2) - \sinh(\alpha L/2) - \cosh^2(\alpha L/2) + \cosh(\alpha L/2) \sinh(\alpha L/2)) \\
 &= Z_c \frac{I}{2} \left(\cosh(\alpha L/2) - \sinh(\alpha L/2) - \frac{\cosh(\alpha L) + 1}{2} + \frac{\sinh(\alpha L)}{2} \right) \\
 &= Z_c \frac{I}{4} (-1 + 2e^{-\alpha L/2} - e^{\alpha L}) \\
 &= -Z_c \frac{I}{4} (1 - e^{-\alpha L/2})^2
 \end{aligned} \tag{3.128}$$

$$\begin{aligned}
U'_c &= Z_c \left(\frac{I_{x1} \cosh(\alpha L/2) - I_{x3}}{\sinh(\alpha L/2)} \right) \\
&= \frac{I}{2} Z_c \frac{1}{\sinh(\alpha L/2)} \left(-\sinh(\alpha L/2) \cosh(\alpha L/2) + \sinh^2(\alpha L/2) + \sinh(\alpha L/2) \right) \\
&= \frac{I}{2} Z_c \left(-\cosh(\alpha L/2) + \sinh(\alpha L/2) + 1 \right) \\
&= \frac{I}{2} Z_c \left(1 - e^{-\alpha L/2} \right)
\end{aligned} \tag{3.130}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.127) – (3.130) จะพบว่าสมการคำนวณอย่างง่ายสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน (simple calculation equation for double-side power supply: SCE-DPS) ของการประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางแสดงได้ดังสมการที่ (3.131)

$$U_{RE} = \frac{I}{2} Z_c \left(1 - e^{-\alpha L/2} \right) \tag{3.131}$$

และการประมาณขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$U_s = \frac{I}{4} Z_c \left(1 - e^{-\alpha L/2} \right)^2 \tag{3.132}$$

จากสมการที่ (3.131) จะพบว่าสมการดังกล่าวมีค่าเหมือนกับสมการในมาตรฐาน EN 50122-2 ภาคผนวก C เมื่อ $\alpha = 1/L_c$ โดยที่ $L_c = 1/\sqrt{R'_R G'_{RE}}$ เนื่องจากสมการนี้เป็นสมการในการประมาณจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตามสมการในแบบจำลองที่สร้างขึ้นสอดคล้องกับมาตรฐาน EN 50122-2 เมื่อคำนึงถึงเงื่อนไขเฉพาะของการใช้งานสามารถดูได้ในภาคผนวก C

3.3 ผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้คำนวณในกรณีสถานการณ์ทั่วไป รถไฟหยุดอยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ และการประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

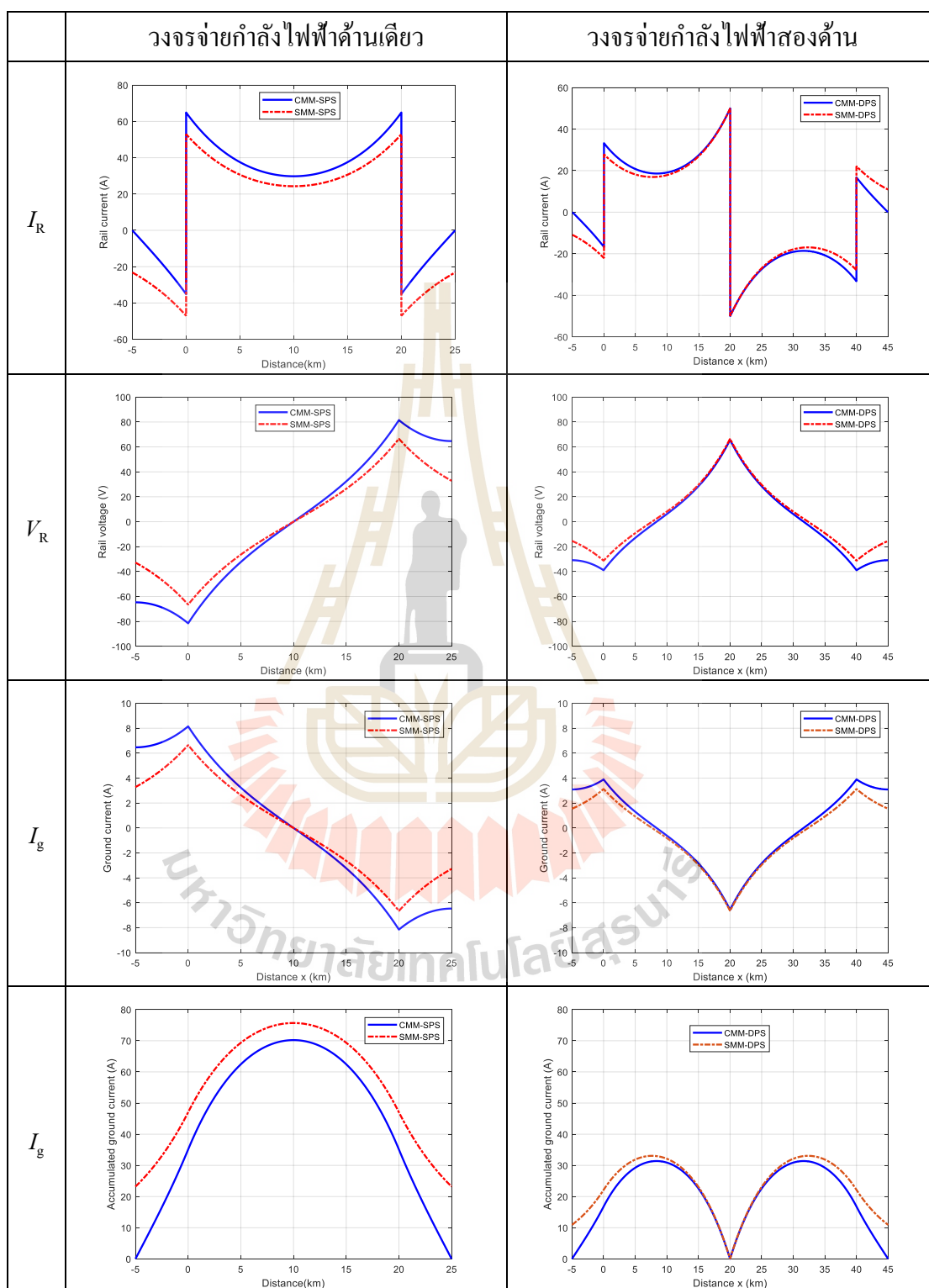
3.3.1 การคำนวณโดยทั่วไป

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบรูปร่างของแรงดันไฟฟ้าที่ราง กระแสไฟฟ้าที่ราง กระแสรั่วไหลลงดิน และกระแสสมในดิน โดยกำหนดให้ค่าความต้านของรางมีค่าเป็น $0.2 \Omega/\text{km}$ ค่าความนำต่อหน่วยความยาวมีค่าเป็น 0.1 S/km ระยะทางที่พิจารณา 5 km และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แกร็ด 100 A การจำลองผลสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวและสองด้าน แสดงได้ดังตารางที่ 3.1 แสดงกราฟของกระแสไฟฟ้าที่ราง กระแสรั่วไหลลงดิน และกระแสสมในดินสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวและสองด้านมีแนวโน้มเดียวกันกับรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.5 ตามลำดับ ซึ่งสามารถยืนยันความถูกต้องได้และยังพบว่าแบบจำลอง CMM และ SMM ที่ได้นำเสนอมีความแตกต่างกันเนื่องจากแบบจำลอง CMM มีการกำหนดขอบเขตด้านข้างที่จำกัดแต่แบบจำลอง SMM มีการกำหนดขอบเขตด้านข้างที่เป็นอนันต์ นอกจากนี้ยังพบว่าวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวเกิดศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางเกิดขึ้นที่สถานีไฟฟ้าและรถไฟ ส่วนวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้านเกิดศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางเกิดขึ้นที่รถไฟเท่านั้น

3.3.2 กรณีรถไฟหยุดอยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทั้งสองเพื่อเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลลงดิน โดยใช้ระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (Metropolitan Rapid Transit Chalong Ratchadham Line) หรือรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) (MRT Purple Line) ผลการจำลองแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 โดยมีสถานีให้บริการ 16 สถานี และสถานีเรียงกระแส 10 สถานี กำลังไฟฟ้าจ่ายไปยังรถไฟผ่านรางที่สามที่พิกัดแรงดัน 750 V มีกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนที่พิกัด $2 \times 2.5 \text{ MW}$ ความต้านด้านต่อหน่วยความยาว $0.017 \Omega/\text{km}$ สำหรับสองรางและความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว 0.1 S/km

ตารางที่ 3.1 การคำนวณโดยทั่วไปสำหรับแบบจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวและสองด้าน
เมื่อพิจารณาระยะด้านข้างยาว 5 km



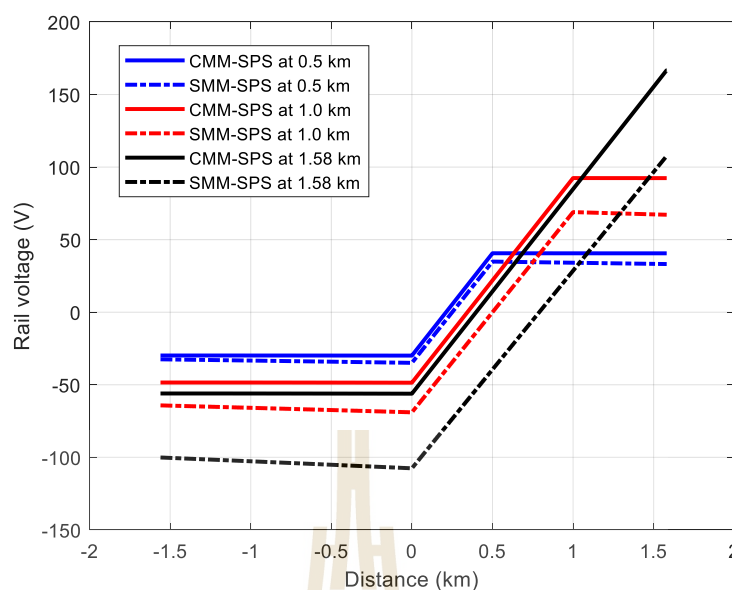
ตารางที่ 3.2 ระบบรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

รหัสสถานี	สถานี	ระยะทาง (km)	Route map
PP01	คลองบางไผ่	0.00	
PP02	ตลาดบางใหญ่	1.27	
PP03	สามแยกบางใหญ่	1.56	
PP04	บางพลู	1.57	
PP05	บางรักใหญ่	1.20	
PP06	บางรักน้อย-ท่าอิฐ	1.25	
PP07	ไทรมา	1.25	
PP08	สะพานพระนั่งเกล้า	1.47	
PP09	แยกถนนพหลโยธิน 1	1.63	
PP10	บางกระสอ	1.26	
PP11	ศูนย์ราชการจังหวัดนนทบุรี	0.90	
PP12	กระทรวงสาธารณสุข	1.79	
PP13	แยกติวานนท์	1.20	
PP14	วงศ์สว่าง	1.72	
PP15	บางซ่อน	1.29	
PP16	เตาปูน	1.58	

การจำลองผลในกรณีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวและสองด้านที่พิกัดกระแสไฟฟ้า 6666 A (คิดจากพิกัดของกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน) สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

- วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว

ช่วงวงจรที่จ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวจะพิจารณาเป็นช่วงสถานี PP15-P16 เป็นระยะทาง 1.58 km โดยกำหนดให้ $L_2 = 1.58 - L_1$ km และ $L_3 = 1.29$ km ผลการคำนวณของแบบจำลอง CMM-SPS และ SMM-SPS ได้ผลของศักย์ไฟฟ้าที่รางเมื่อรถไฟอยู่ที่ตำแหน่ง 0.5 km 1 km และ 1.58 km ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จากผลการจำลองจะพบว่ากราฟศักย์ไฟฟ้าที่รางมีแนวโน้มเดียวกันทั้งสองวิธีซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนของศักย์ไฟฟ้าที่รางเมื่อเทียบกับมาตรฐาน EN 50122-2 จะมีค่าเป็น 14.13% 25.38% และ 35.46% เมื่อรถไฟอยู่ที่ตำแหน่ง 0.5 km 1.0 km และ 1.58 km ตามลำดับ

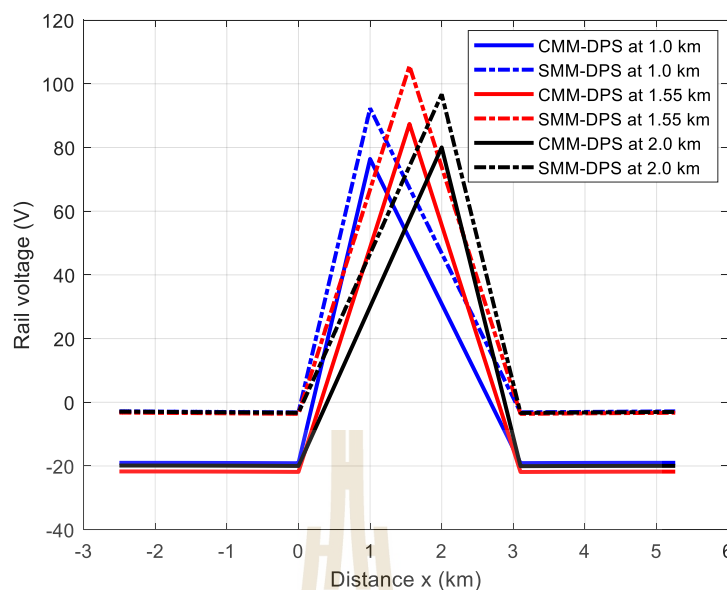


รูปที่ 3.7 แรงดันไฟฟ้าที่รางสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียว

- วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน

การจำลองผลจะพิจารณากรณีที่มีระยะทางยาวที่สุดเพราะว่าระยะทางมีผลต่อขนาดของศักย์ไฟฟ้าที่ราง นั่นคือ ระยะทางจาก PP07-PP09 เป็นระยะทาง 3.10 km และระยะห่างด้านข้างเป็น 2.50 km และ 2.16 km ผลการจำลองของแบบจำลอง CMM-DPS และ SMM-DPS ได้แสดงผลของศักย์ไฟฟ้าที่รางเมื่อรถไฟอยู่ที่ตำแหน่ง 1 km 1.55 km และ 2 km ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จากผลการจำลองจะพบว่ากราฟของศักย์ไฟฟ้าที่รางมีแนวโน้มเดียวกันทั้งสองวิธี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของศักย์ไฟฟ้าที่รางเมื่อเทียบกับมาตรฐาน EN 50122-2 จะมีค่าเป็น 25.40% 24.50% และ 25.40% เมื่อรถไฟอยู่ที่ตำแหน่ง 1 km 1.55 km และ 2 km ตามลำดับ

จากการจำลองผลในกรณีจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวและสองด้านแบบจำลอง CMM และ SMM ที่ได้นำเสนอนั้นจะมีปริมาณความคลาดเคลื่อนของศักย์ไฟฟ้าที่รางแตกต่างเนื่องจากการกำหนดขอบเขตด้านข้างของแบบจำลองทั้งสองซึ่งเป็นปัจจัยหลักสำคัญและเป็นข้อที่ควรระมัดระวังในการใช้แบบจำลองทาง SMM



รูปที่ 3.8 แรงดันไฟฟ้าที่รางสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน

3.3.3 การประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

การจำลองในหัวข้อนี้จะจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟโดยที่โหลดคงที่ของทั้งสองแบบจำลองสามารถคำนวณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนโดยการเปรียบเทียบกันระหว่างการประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางตามมาตรฐาน EN 50122-2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพื้นฐาน (CMM) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย (SMM) และสมการคำนวณอย่างง่าย (SCE) การประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวจะพิจารณาเป็นช่วงสถานี PP01-P02 และ PP15-P16 ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ และตารางที่ 3.5 และ 3.6 แสดงการประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้าน

จากตารางที่ 3.3 - 3.6 เป็นการประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับการจ่ายกำลังด้านเดียวและสองด้านพบว่าตามมาตรฐาน EN 50122-2 กับแบบจำลอง SMM และ SCE มีค่าเท่ากันเนื่องจากการประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางตามมาตรฐาน EN 50122-2 และ SCE เป็นสมการเดียวกันซึ่งมีที่มาจากแบบจำลอง SMM ดังนั้นจึงมีค่าเท่ากัน และตามมาตรฐาน EN 50122-2 ไม่มีการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ดังนั้นสามารถใช้แบบจำลอง SCE ในการเปรียบเทียบแทนได้

ตารางที่ 3.3 ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่วางสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวของระบบรถไฟฟ้า
มหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

ตำแหน่งของ สถานีจ่ายไฟ	ระยะทาง (km)	มาตรฐาน EN 50122-2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์		
			CMM-DPS	SMM-DPS	SME-DPS
PP01-PP02	1.27	87.0718	138.8682	87.0718	87.0718
PP15-PP16	1.58	107.5640	166.6556	107.5640	107.5640

ตารางที่ 3.4 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวของระบบ
รถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

ตำแหน่งของ สถานีจ่ายไฟ	ระยะทาง (km)	มาตรฐาน EN 50122-2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์		
			CMM-DPS	SMM-DPS	SME-DPS
PP01-PP02	1.27	-87.0718	-40.2780	-87.0718	-87.0718
PP15-PP16	1.58	-107.5640	-48.5640	-107.5640	-107.5640

ตารางที่ 3.5 ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่วางสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้านของระบบรถไฟฟ้า
มหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

ตำแหน่งของ สถานีจ่ายไฟ	ระยะทาง (km)	มาตรฐาน EN 50122-2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์		
			CMM-DPS	SMM-DPS	SME-DPS
PP02-PP03	1.56	54.0787	52.7047	54.0787	54.0787
PP03-PP05	2.77	94.7079	77.4690	94.7079	94.7079
PP05-PP07	2.50	85.7396	74.9345	85.7396	85.7396
PP07-PP09	3.10	105.5937	87.4019	105.5937	105.5937
PP09-PP11	2.16	74.3668	66.1605	74.3668	74.3668
PP11-PP13	2.99	101.9742	82.0871	101.9742	101.9742
PP13-PP14	1.72	59.5163	51.9474	59.5163	59.5163
PP14-PP15	1.29	44.8573	38.7582	44.8573	44.8573

ตารางที่ 3.6 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้านของระบบ
รถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

ตำแหน่งของ สถานีจ่ายไฟ	ระยะทาง (km)	มาตรฐาน EN 50122-2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์				
			CMM-DPS		SMM-DPS		SME-DPS
			V_{s1} (V)	V_{s2} (V)	V_{s1} (V)	V_{s2} (V)	
PP01-PP02	1.27	-*	-			-	-
PP02-PP03	1.56	-*	-7.6995	-7.6807	-0.9533	-0.9533	-0.9533
PP03-PP05	2.77	-*	-19.8711	-19.8173	-2.9238	-2.9238	-2.9238
PP05-PP07	2.50	-*	-13.2249	-13.2137	-2.3963	-2.3963	-2.3963
PP07-PP09	3.10	-*	-21.8607	-21.8845	-3.6346	-3.6346	-3.6346
PP09-PP11	2.16	-*	-10.0180	-10.0204	-1.8028	-1.8028	-1.8028
PP11-PP13	2.99	-*	-22.9544	-22.9859	-3.3897	-3.3897	-3.3897
PP13-PP14	1.72	-*	-8.7161	-8.7425	-1.1547	-1.1547	-1.1547
PP14-PP15	1.29	-*	-6.4039	-6.4052	-0.6559	-0.6559	-0.6559
PP15-PP16	1.58	-*	-			-	-

หมายเหตุ * ตามมาตรฐาน EN 50122-2 ไม่มีการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า

จากตารางที่ 3.3 ได้แสดงการคำนวณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวเทียบกับมาตรฐาน EN 50122-2 พบว่าแบบจำลอง SME-SPS มีความคลาดเคลื่อน 37.34% และ 35.46% สำหรับ PP01-PP02 และ PP15-PP16 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแบบจำลอง SMM-SPS และจากตารางที่ 3.4 แสดงการแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวพบว่าแบบจำลอง SME-SPS มีศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางมีความคลาดเคลื่อน 116.17% และ 139.12% สำหรับ PP01-PP02 และ PP15-PP16 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแบบจำลอง SMM-SPS ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงมากซึ่งเป็นผลมาจากระยะด้านข้างที่ใช้สำหรับการพิจารณา

จากตารางที่ 3.5 แสดงการคำนวณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าสองด้านพบว่าแบบจำลอง SME-DPS มีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 24.23% ระหว่างสถานี PP11-PP13 เมื่อเทียบกับแบบจำลอง SMM-DPS และจากตารางที่ 3.6 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวพบว่ามี แบบจำลอง SME-DPS มีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 89.76 และ 89.76% ที่สถานี PP14 และ PP15 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแบบจำลอง SMM-DPS

จากการคำนวณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) พบว่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเกิดขึ้นที่สถานีให้บริการ PP15 และ PP16 พิกัดแรงดัน 107.5640 V

ถึงแม้ว่าสมการการประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางตามมาตรฐาน EN 50122-2 แบบจำลอง SMM และ SME จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพื้นฐานแต่ก็ยังสามารรถ ดังนั้นเพื่อให้่ายในการวิเคราะห์และประเมินกระแสรั่วไหลในรถไฟฟ้ากระแสตรงโดยการประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางควรระมัดระวังในการใช้สมการคำนวณนี้โดยควรละเอียดได้ในมาตรฐาน EN 50122-2 เนื่องจากสมการในมาตรฐาน EN 50122-2 เป็นสมการที่ได้จากการประมาณ

3.4 สรุป

การวิเคราะห์และประเมินกระแสรั่วไหลในรถไฟฟ้ากระแสตรงโดยการพิจารณาศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางได้นำเสนอ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพื้นฐาน (CMM) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย (SMM) พบว่าทั้งสองแบบจำลองที่นำเสนอมีความแตกต่างกันเนื่องจากแบบจำลอง CMM ได้กำหนดขอบเขตด้านข้างที่จำกัดแต่แบบจำลองทาง SMM มีขอบเขตด้านข้างที่เป็นอนันต์ ดังนั้นเมื่อระยะด้านข้างของแบบจำลอง CMM มีระยะด้านข้างที่มากขึ้นจะทำให้กระแสและศักย์ไฟฟ้าที่รางมีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ยังได้แสดงสมการการคำนวณอย่างง่าย (SCE) สำหรับการประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าถึงแม้ว่าจะเกิดความคลาดเคลื่อนสูงแต่ก็ยังสามารรถนำไปใช้ได้สำหรับการประเมินกระแสรั่วไหลเนื่องจากมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางไม่เกิน 120 V ตามมาตรฐาน EN 50122-1 ที่ได้กำหนดไว้และยังสามารถระบุได้ว่าโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ผ่านมาตรฐานการประเมินกระแสรั่วไหลเบื้องต้นภายใต้พารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดไว้ในงานวิจัยนี้ และควรระมัดระวังในการใช้สมการคำนวณอย่างง่ายนี้โดยสามารถดูรายละเอียดตามมาตรฐาน EN 50122-2 ดังนั้นสมการนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์และประเมินกระแสรั่วไหลได้และยังได้ตรวจสอบความถูกต้องว่าสมการเป็นไปตามมาตรฐาน EN 50122-2 นอกจากการประเมินกระแสรั่วไหลด้วยการประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางแล้วเพื่อให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นควรจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่สามารถพิจารณาศักย์ไฟฟ้าที่รางได้ซึ่งได้นำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 4

กระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรง สำหรับโครงสร้างทางยกระดับ

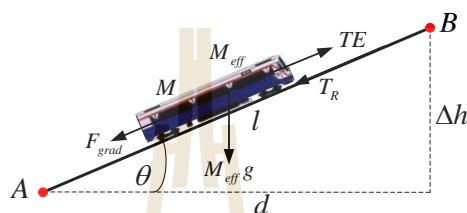
4.1 บทนำ

การศึกษากระแสรั่วไหลระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรง จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะสมบัติของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า แนวการวางทางวิ่ง แบบจำลองการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้า เป็นต้น ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ส่งผลที่ซับซ้อนต่อการวางแผน การออกแบบและการจัดการ ปัจจุบัน คอมพิวเตอร์มีสมรรถนะในการประมวลผลที่สูงขึ้นกว่าแต่ก่อนมาก มีซอฟต์แวร์ที่สามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการพัฒนาโปรแกรมช่วยในการออกแบบวางแผนและวิเคราะห์มากมาย การพัฒนาการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยคำนวณผ่านการสร้างแบบจำลองของระบบในภาพรวมช่วยให้ผู้ออกแบบวางแผนระบบได้ตามสภาพการจราจรที่ใช้งานจริงหรือตามแผนที่ได้คาดการณ์ไว้ล่วงหน้า ในบทนี้ได้นำเสนอขั้นตอนการสร้างแบบจำลองระบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรง ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองและลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า แบบจำลองระบบจ่ายไฟของรถไฟฟ้ากระแสตรง และแบบจำลองการต่อลงดินของทางยกระดับเพื่อพิจารณาศักยภาพไฟฟ้าที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่โครงสร้าง โดยเน้นการพิจารณาไปที่แบบจำลองการต่อลงดินของทางยกระดับ ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

4.2 แบบจำลองและลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

การจ่ายพลังงานให้กับขบวนรถไฟฟ้าเพื่อใช้เร่งให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นไปตามทางวิ่ง โดยที่การเคลื่อนที่เชิงเส้นของขบวนรถไฟฟ้าเป็นผลมาจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ใช้สร้างแรงบิดไปขับล้อรถไฟฟ้า ถ้าการจ่ายพลังงานมากพอที่จะเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่าง ๆ ได้ แรงลัพธ์ที่เหลือจะกระทำกับขบวนรถไฟฟ้าเพื่อเร่งให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร่งได้ ในส่วนนี้จะนำเสนอการพิจารณาการคำนวณทางพลวัตของรถไฟฟ้า (train vehicle dynamic) เริ่มต้นจากแผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่ของหัวรถจักรไฟฟ้าที่มีค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟฟ้า (effective vehicle mass) ดังรูปที่ 4.1 รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปบนรางวิ่ง เพื่อให้การวิเคราะห์อยู่ในรูปทั่วไปรางวิ่งจะถูกยกให้เอียงทำมุมกับแนวราบ ส่งผลให้แรงโน้มถ่วงมีผลต่อการเคลื่อนที่นี้ด้วย อาจจะช่วยเสริมการเคลื่อนที่หรือต้านการเคลื่อนที่ก็ได้ จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้รถไฟฟ้ากำลัง

เคลื่อนที่ไปตามรางวิ่งที่เอียงทำมุม q กับแนวระดับ ด้วยความเร่ง α แรงกระทำที่เกี่ยวข้อง คือ แรง
 ดุดของหัวรถจักร (tractive effort) แรงเกรเดียนต์ (gradient force) แรงต้านการเคลื่อนที่ของขบวน
 รถไฟฟ้า (train resistance) ซึ่งแรงต้านการเคลื่อนที่นี้แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ แรงเสียดทานที่
 ด้านการเคลื่อนที่ (frictional force or train rolling resistance) และแรงต้านอากาศ (aerodynamic
 drag force) ดังนั้นสมการพื้นฐานการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าพิจารณาด้วยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของ
 นิวตัน (Newton's Second Law) ดังสมการที่ (4.1)



รูปที่ 4.1 แผนภาพการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

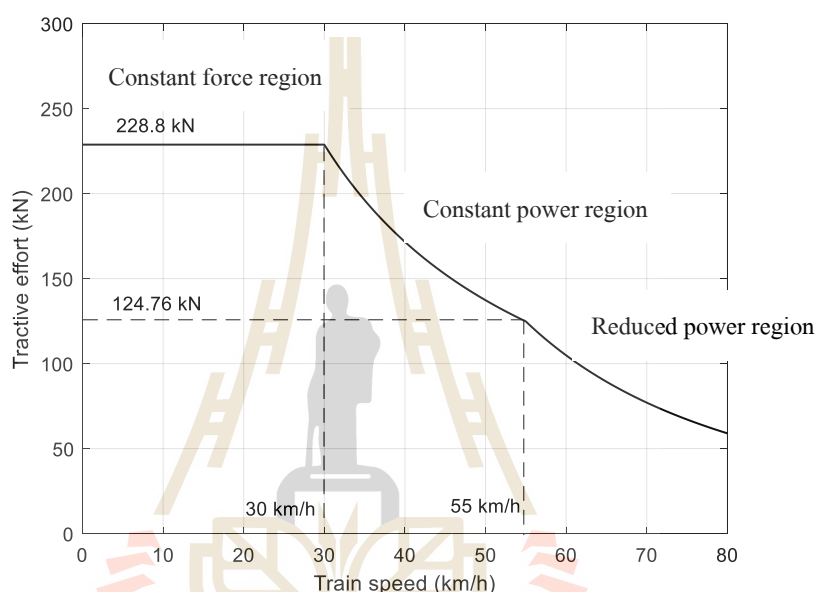
$$F = TE - F_{grad} - T_R = M_{eff} \alpha \quad (4.1)$$

โดยที่	M_{eff}	คือ ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟฟ้า (kg)
	TE	คือ แรงดุดของหัวรถจักร (N)
	T_R	คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า (N)
	F_{grad}	คือ แรงเกรเดียนต์ (N)
	α	คือ ความเร่งของรถไฟฟ้า (train acceleration; m/s^2) ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกสำหรับทาง ขึ้นเนินและมีค่าเป็นลบสำหรับทางลงเนิน

แรงดุดและแรงเบรกขบวนรถไฟฟ้า

แรงขับเคลื่อนรถไฟฟ้าหรือแรงดุดขบวนรถไฟฟ้าได้มาจากมอเตอร์ลากจูง (traction motor) ขับผ่านเพลาของมอเตอร์ซึ่งนำมาขับล้อของรถไฟ แรงดุดขบวนรถไฟฟ้าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยเฉพาะที่สำคัญ ได้แก่ น้ำหนักและความเร็วของรถไฟฟ้า ผู้ผลิตรถไฟฟ้าจะทำการทดสอบและนำเสนอในรูปของแรงดุดขบวนรถไฟฟ้าเทียบกับความเร็วของรถไฟฟ้า คุณลักษณะโดยทั่วไปของแรงดุดขบวนรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.2 แสดงกราฟลักษณะสมบัติแรงดุดหัวรถจักรสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ตามนิยามเส้นกราฟลักษณะสมบัติแรงดุดของหัวรถ

จักรมาตรฐานของ UIC ตัวแปร v_t เป็นความเร็วสุดท้ายที่หัวรถจักรจะให้แรงตึงที่ค่าสูงสุด เมื่อความเร็วของหัวรถจักรมากกว่าค่าความเร็วฐาน แรงตึงจะลดลง แต่การทำงานจะเปลี่ยนจากแรงตึงคงที่ (constant force region) เป็นกำลังงานคงที่ (constant power region) ส่วนแรงเบรกขบวนรถไฟจะได้มาจากการทดสอบของผู้ผลิตรถไฟฟ้าเช่นกันขึ้นอยู่กับว่าระบบรถไฟฟ้าจะใช้เบรกทางกล (mechanical brake) หรือเบรกทางไฟฟ้า (electrical brake) แสดงดังรูปที่ 4.3 แสดงคุณลักษณะสมบัติแรงของเบรกสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

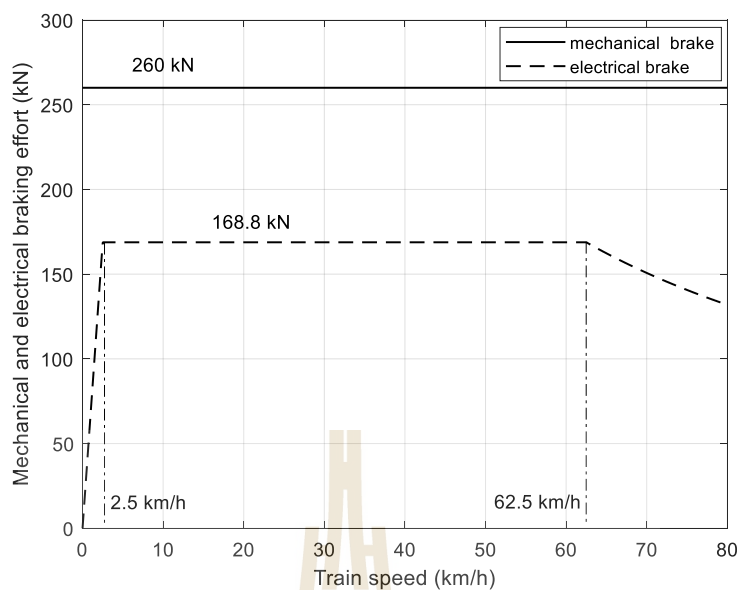


รูปที่ 4.2 ลักษณะสมบัติแรงตึงของหัวรถจักร

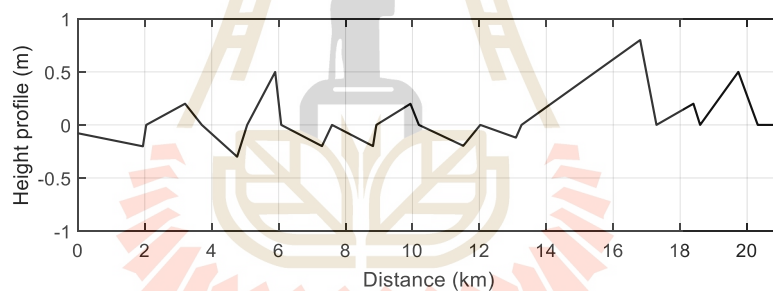
แรงเกรเดียนต์

โดยทั่วไปเส้นทางการเดินรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ระดับเกรเดียนต์หรือความชันจะน้อย และจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับความชันบ่อย (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, 2560) ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.1 และแสดงอยู่ในรูปของ $\Delta h/l$ ซึ่ง Δh คือ ระยะในแนวดิ่ง และ l คือ ระยะความชันหรือระยะในแนวระนาบจากจุด A ไปยังจุด B แสดงดังรูปที่ 4.4 แสดงระดับเกรเดียนต์ของเส้นทางรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง(เหนือ) แรงเกรเดียนต์หรือแรงเนื่องจากความลาดเอียงของการเคลื่อนที่ สามารถหาได้ดังสมการที่ (4.2)

$$F_{grad} = M_{eff} g \sin \theta = \frac{M_{eff} g \Delta h}{l} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.3 คุณลักษณะสมบัติแรงของเบรก



รูปที่ 4.4 ระดับกระเดียนต์ของเส้นทางรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจะมีแรงต้านซึ่งเกิดจากการเสียดสีระหว่างล้อกับรางและแรงต้านอากาศ ผู้ผลิตหัวรถจักรนิยมนิยามมูลค่าแรงเสียดทานด้านการเคลื่อนที่รวมกับแรงต้านอากาศ ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะเฉพาะของขบวนรถที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางเดินรถ เรียกโดยรวมว่า แรงต้านการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการกำลังสอง (quadratic equation) หรือเรียกว่า สมการเดวี (Davis equation) ดังแสดงในสมการที่ (4.3) (รัชต์ชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2557)

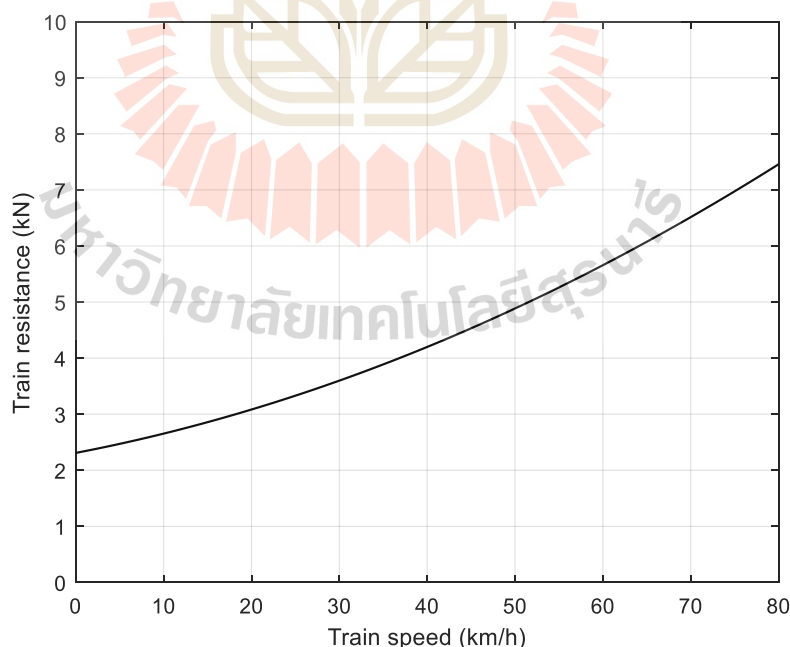
$$T_R = A + Bv + Cv^2 \quad (4.3)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วของรถไฟ (km/h) และ A (kN), B (kN·h/km) และ C (kN·h²/km²) คือ สัมประสิทธิ์เดวี (Davis coefficients) การรถไฟประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกได้พัฒนาสมการเดวีเพื่อนำมาใช้คำนวณแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมกับการให้บริการเดินรถของประเทศนั้น ๆ (न्छัย กุลรวาณิชพงษ์, 2557) เช่น สมการที่ (4.4) ได้นำเสนอสมการเดวีของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ตามมาตรฐาน JIS E 6002 (มาตรฐานทางอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น) และได้แสดงกราฟแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ดังรูปที่ 4.5

$$T_R = (1.65 + 0.0247v)W_m + (0.78 + 0.0028v)W_t + \{0.78 + 0.0078(n-1)\}v^2 \quad (4.4)$$

เมื่อ

- T_R คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถ (kgf)
 v คือ ความเร็วของรถไฟ (km/h)
 W_m คือ น้ำหนักทั้งหมดของมอเตอร์ในรถไฟ (ton)
 W_t คือ น้ำหนักทั้งหมดของตู้รถไฟ (ton)
 n คือ จำนวนรถในรถไฟ



รูปที่ 4.5 แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

กำลังไฟฟ้าของรถไฟ

กำลังไฟฟ้าจริงที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่ (train power consumption: P_{tr}) ประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าเสริม (auxiliary power: P_{aux}) ที่เกิดจากระบบแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ ระบบ สัญญาณ และอื่น ๆ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟที่ขึ้นอยู่กับแรงฉุดขบวนรถไฟ ความเร็ว v ของรถไฟและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า (η) แสดงได้ดัง สมการที่ (4.5) (Kulworawanichpong, 2003)

$$P_{tr} = \frac{TE \times v}{\eta} + P_{aux} \quad (4.5)$$

ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟ

แรงเนื่องจากการหมุนของล้อรถไฟนั้นจะต้องถูกนำมาคำนวณเพื่อหาความเร่งของรถไฟ ซึ่งปกติมักจะทำการเพิ่มตัวประกอบการหมุน (rotary allowance) หรือตัวประกอบน้ำหนักผู้โดยสาร (passenger mass factor) เข้าไปในการคำนวณค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟด้วย ซึ่งค่า ประสิทธิภาพของน้ำหนักรถไฟสามารถหาได้จากสมการที่ (4.6) (ชนิดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2557)

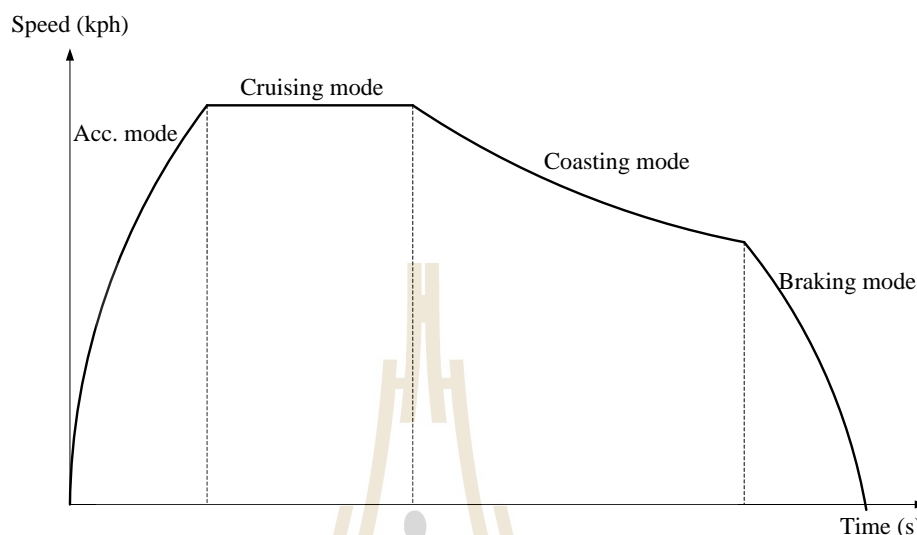
$$M_{eff} = M_t (1 + \lambda_w) + M_l \quad (4.6)$$

โดยที่ M_t คือ น้ำหนักรถไฟเปล่า (tare weight) λ_w คือ ตัวประกอบน้ำหนักผู้โดยสาร และ M_l คือ น้ำหนักของผู้โดยสาร (passenger load)

4.2.1 การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟ

การเคลื่อนที่ของรถไฟเพื่อรับส่งผู้โดยสารระหว่างสถานีผู้โดยสารสองสถานี นั้นจะมีรูปแบบการเคลื่อนที่ตามลักษณะสมบัติเส้นโค้งความเร็ว-เวลา (train's speed-time curve) โหมดการทำงานพื้นฐานของรถไฟจะเคลื่อนที่ภายใต้โหมดการทำงาน 4 โหมด ได้แก่ โหมดเร่ง ความเร็ว (accelerating mode) โหมดความเร็วคงที่ (cruising or constant-speed mode) โหมดแล่น ด้วยความเฉื่อย (coasting mode) และโหมดการเบรก (braking mode) (Kulworawanichpong, 2003) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยแรงฉุดขบวนรถไฟในแต่ละโหมดขึ้นอยู่กับเทคนิคการควบคุมที่ใช้ อย่างไรก็ตาม การทำงานของรถไฟอาจจะมีการสลับโหมดการทำงานไปตามวัตถุประสงค์

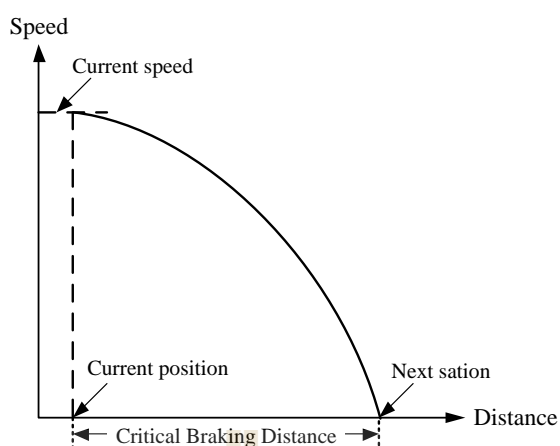
ที่ต้องการ เช่น หากต้องการประหยัดพลังงานอาจจะใช้การควบคุมด้วย coasting mode สลับกับ accelerating mode เพื่อให้ใช้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด เป็นต้น



รูปที่ 4.6 โหมดการทำงานของรถไฟฟ้า

โหมดเร่งความเร็วจะเริ่มเร่งความเร็วออกจากสถานีด้วยความเร่งที่กำหนดจนถึงที่ความเร็วทำงาน (service speed) โดยค่าความเร่งของรถไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวก (a_{acc}) และแรงดูดขบวนรถไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (4.1) เมื่อความเร็วของรถไฟฟ้าถึงความเร็วทำงานก็จะเข้าสู่โหมดความเร็วคงที่ โหมดนี้จะรักษาความเร็วไว้ที่ความเร็วทำงาน ($a = 0$) จนกระทั่งถึงตำแหน่งเริ่มโหมดการแล่น (L_{coast}) เมื่อถึงโหมดการแล่นด้วยความเฉื่อย โหมดนี้แรงดูดขบวนรถไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ ($TE = 0$) และค่าความเร่งจะมีค่าเป็นลบ แต่อย่างไรก็ตามความเร่งสามารถมีค่าเป็นบวกได้ในกรณีที่ลงเนินลาดชัน และจะเปลี่ยนเป็นโหมดการเบรกก็ต่อเมื่อถึงความเร็วที่ต้องเบรกด้วยความเร่งเป็นลบ (a_{dec}) หรือถึงระยะที่จะต้องเบรก เรียกว่า ระยะวิกฤตการเบรก (Critical Braking Distance: CBD) เพื่อจะเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยค่า CBD สามารถหาได้จากสมการที่ (4.7) (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, 2560)

$$CBD = -0.5 \times \frac{v^2}{\alpha_{dec}} \quad (4.7)$$



รูปที่ 4.7 การควบคุมการทำงานโหมดการเบรก

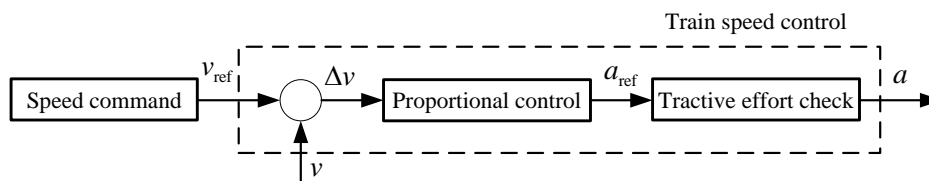
ในงานวิจัยนี้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจะเป็นการสร้างการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าให้วิ่งตามเส้นร่างความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ (design speed profile) โดยใช้หลักการควบคุมแบบสัดส่วน (proportional control) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจะแบ่งการทำงานออกเป็น 3 โหมด ได้แก่ โหมดวิ่ง (running mode) โหมดเบรก (braking และ โหมดหยุดที่สถานี (station stop mode) ดังรายละเอียดต่อไปนี้ (Sumpavakup, Ratniyomchai and Kulworawanichpong, 2017)

1) โหมดวิ่ง ทำหน้าที่เริ่มต้นในการคำนวณและใช้สำหรับการควบคุมความเร็วขณะที่รถเคลื่อนที่ โดยการควบคุมความเร็วในโหมดนี้แบ่งเป็น 2 เงื่อนไข คือ เมื่อความเร็วต่ำกว่าความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ให้รถไฟฟ้าเข้าสู่โหมดเร่งความเร็ว (accelerating mode) แต่ถ้าความเร็วสูงกว่าความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ให้รถไฟฟ้าเข้าสู่โหมดควบคุมความเร็วคงที่ (cruising mode)

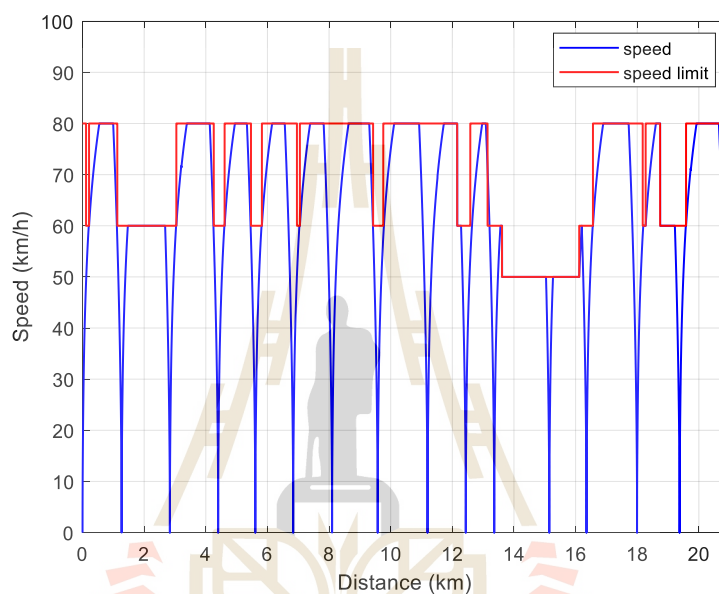
2) โหมดเบรก ทำหน้าที่ลดความเร็วของรถไฟฟ้าเพื่อเข้าจอดที่สถานี

3) โหมดหยุดที่สถานี ทำหน้าที่นับเวลาหยุดที่สถานีให้ครบตาม dwell time

ในรูปที่ 4.9 ผลการควบคุมความเร็วตามเส้นร่างความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)



รูปที่ 4.8 การควบคุมความเร็วแบบสัดส่วน



รูปที่ 4.9 ผลการควบคุมความเร็วตามเส้นร่างความเร็วที่ได้ออกแบบไว้สำหรับ
รถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

4.2.2 การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่

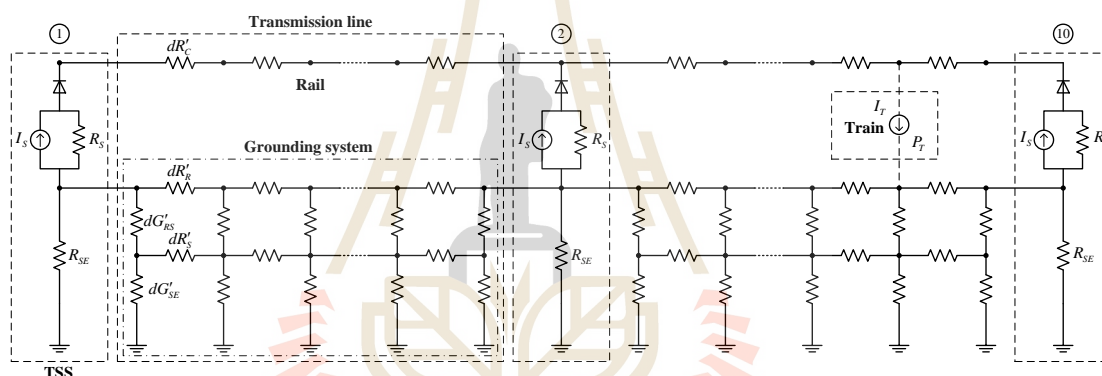
การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.8) และ (4.9) ตามลำดับ โดยที่ v_{i+1} และ v_i คือ ความเร็วรถไฟฟ้าหลังและก่อนปรับปรุง Δt คือ time step s_{i+1} และ s_i คือ ตำแหน่งรถไฟฟ้าหลังและก่อนปรับปรุง

$$v_t = v_i + \alpha \Delta t \quad (4.8)$$

$$s_t = s_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} \alpha \Delta t^2 \quad (4.9)$$

4.2.3 แบบจำลองระบบรถไฟไฟฟ้า

ในระบบรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชนจะมีความเป็นพลวัต ค่าจะแปรเปลี่ยนไปตามเวลา และตำแหน่งของรถไฟไฟฟ้าที่กำลังวิ่งอยู่บนรางตามตารางการให้บริการ (ชนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2557) เพื่อให้แบบจำลองระบบรถไฟไฟฟ้ามีสมจริงและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นพิจารณากระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชนซึ่งพิจารณาได้จากปริมาณของศักย์ไฟฟ้าที่รางที่เกิดขึ้นในขณะที่รถไฟวิ่งอยู่ จึงทำให้แบบจำลองมีความซับซ้อนมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.10 และขั้นตอนการสร้างแบบจำลองระบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชนประกอบด้วย แบบจำลองสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน แบบจำลองสายส่ง แบบจำลองรถไฟ (Mongkoldee, Leeton and Kulworawanichpong, 2016; Chuchit, Ratniyomchai and Kulworawanichpong, 2018) แบบจำลองระบบรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชนแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.10 แบบจำลองระบบรถไฟไฟฟ้าในโครงสร้างทางยกระดับที่มีการต่อลงดินแบบสองชั้น

แบบจำลองของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะรับกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้สถานีไฟฟ้าเรียงกระแสเพื่อให้เป็นกระแสตรงเพื่อจ่ายให้แก่ระบบทางรถไฟ (railway system) ในบทความนี้ สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (traction substation) จะมองว่าเป็นวงจรสมมูลของนอร์ตัน (Norton equivalent circuit) ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าขนานกับความต้านทานของสถานีไฟฟ้า (R_s) และเชื่อมต่อกับไดโอดที่เหมาะสมและความต้านทานต่อสายดิน (R_{se}) ดังแสดงในส่วน TSS ของรูปที่ 4.10 โดยที่ C คือ รางตัวนำหรือรางที่สาม R คือ รางที่ใช้งานได้และในการจำลองความต้านทานต่อสายดินถูกตั้งค่าเป็นอนันต์เนื่องจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนไม่ได้เชื่อมต่อลงดินโดยตรง (directly grounded) หรือลอยผ่านอุปกรณ์ป้องกัน (floated through the protective devices)

ค่า R_s สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.10) และค่า I_s สามารถคำนวณได้จากการไหลของกำลังไฟ ซึ่ง V_{nl} คือ ค่าแรงดันไร้โหลดที่สถานีจ่ายไฟ (no-load substation voltage) P_{sc} คือ ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าจริงลัดวงจรที่สถานีจ่ายไฟ (substation short-circuit capacity)

$$R_s = \frac{(V_{nl})^2}{P_{sc}} \quad (4.10)$$

แบบจำลองสายส่ง

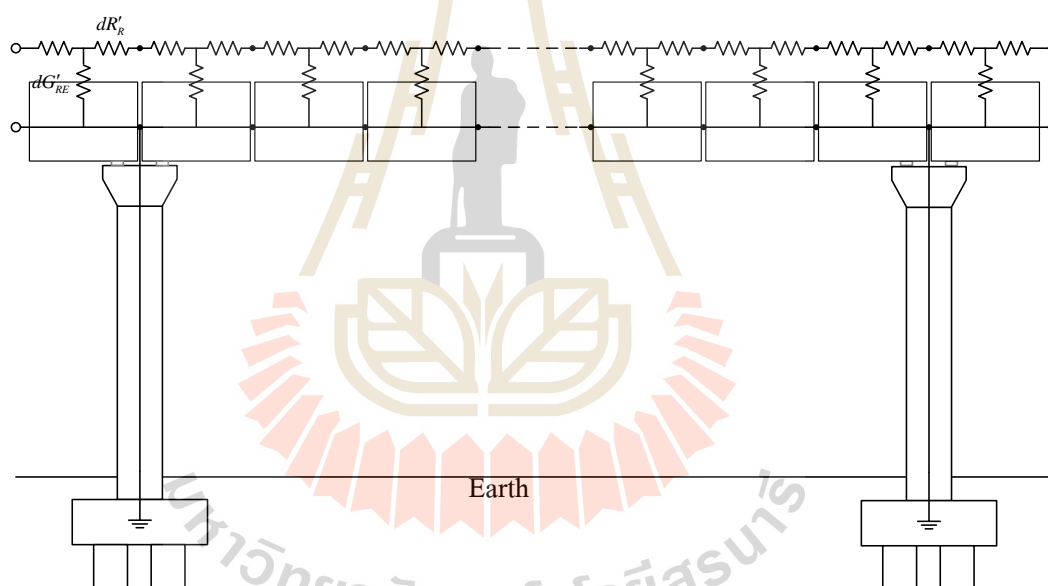
สายส่งในที่นี้หมายถึงระบบสายป้อนประกอบด้วยรางตัวนำหรือรางที่สาม รางวิ่งเป็นเส้นทางย้อนกลับกระแสไฟฟ้า และฉนวนระหว่างรางวิ่งกับดิน สายส่งถือว่าเป็นรูปแบบการกระจายตัวนำตามระยะทางโดยแบ่งเป็นระยะห่าง d คู่สายส่งของรูปที่ 4.10 แสดงส่วนของสายส่งระหว่างบัส p และ q รางตัวนำเป็นตัวต้านทานของรางที่สาม ในทำนองเดียวกันรางวิ่งจะแสดงด้วยการใช้ตัวต้านทานของราง ความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งไปยังโครงสร้าง (G'_{rs}) เป็นค่าความต้านทานระหว่างรางวิ่งไปยังโครงสร้าง ความต้านทานต่อหน่วยความยาวในโครงสร้าง (R'_{rs}) เป็นค่าความต้านทานตามแนวความยาวของโครงสร้างโลหะในคอนกรีตได้รางและความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างโครงสร้างไปยังดิน (G'_{se}) เป็นค่าความต้านทานตามแนวตั้งระหว่างโครงสร้างไปยังดิน ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่รางจะเป็นแรงดันที่กระจายไปตามราง แรงดันและกระแสไฟฟ้าในโครงสร้าง และ แรงกระแสรั่วไหลลงดินในโครงสร้างทางยกระดับโดยแบ่งแบบจำลองของสายส่งเป็นสามแบบจำลองซึ่งประกอบไปด้วย แบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียว แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นและแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นที่เสาโครงสร้างทางยกระดับ โดยแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) แบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียว

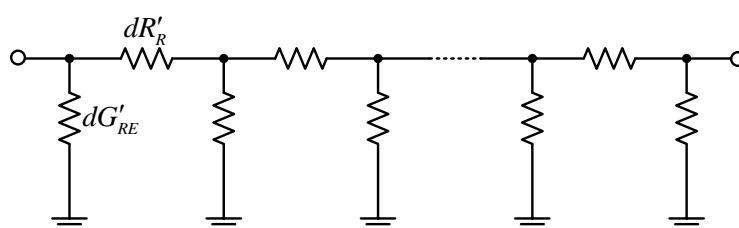
แบบจำลองการต่อลงดิน ชั้นเดียว (One-layer grounding model: OGM) เป็นแบบจำลองที่อยู่บนพื้นฐานตามมาตรฐาน EN 50122-2 เป็นแบบจำลองที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับการพิจารณาศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลลงดินโดยไม่มีการพิจารณาโครงสร้างทางยกระดับแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 และเพื่อให้ง่ายแก่การจำลองผลสามารถเขียนเป็นแบบจำลองอย่างง่ายได้ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งประกอบไปด้วยรางวิ่งจะแสดงด้วยการใช้ตัวต้านทานของราง ความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งไปยังดิน

2) แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น

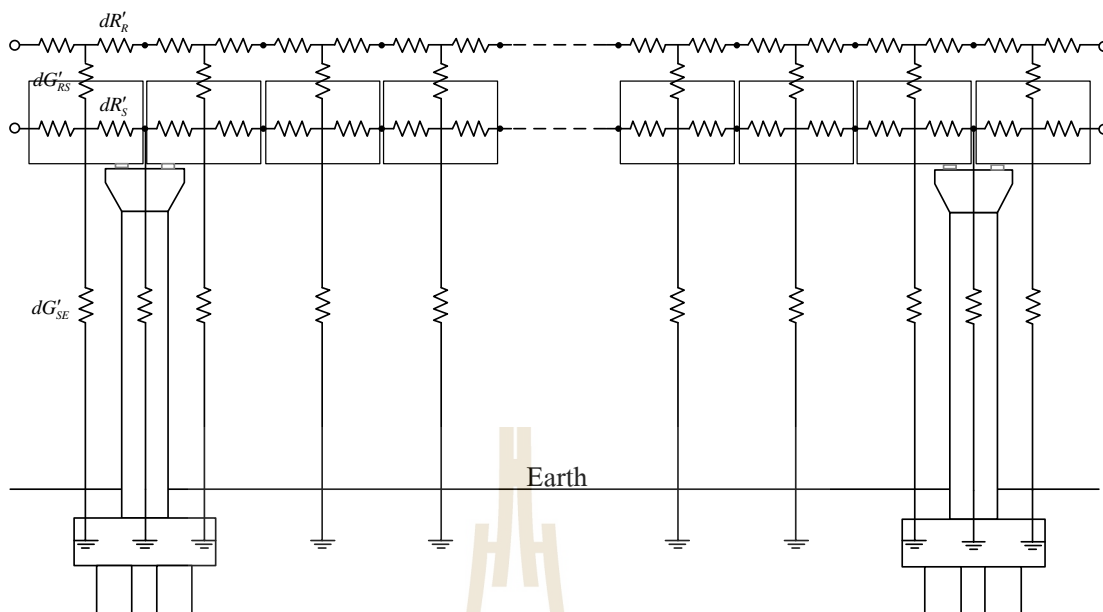
แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น (Two-layer grounding model: TGM) เป็นแบบจำลองสำหรับการพิจารณาศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลลงดินโดยพิจารณาโครงสร้างทางยกระดับซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 และเพื่อให้ง่ายแก่การจำลองผลสามารถเขียนเป็นแบบจำลองอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งประกอบไปด้วยรางวิ่งจะแสดงด้วยการใช้ตัวต้านทานของราง ความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งไปยังโครงสร้าง (G'_{RS}) เป็นค่าความต้านทานระหว่างรางวิ่งไปยังโครงสร้าง ความต้านทานต่อหน่วยความยาวในโครงสร้าง (G'_{RS}) เป็นค่าความต้านทานตามแนวความยาวของโครงสร้างโลหะในคอนกรีตใต้ราง และความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างโครงสร้างไปยังดิน (G'_{SE}) เป็นค่าความต้านทานตามแนวดิ่งระหว่างโครงสร้างไปยังดิน (Chuchit, Ratniyomchai and Kulworawanichpong, 2018)



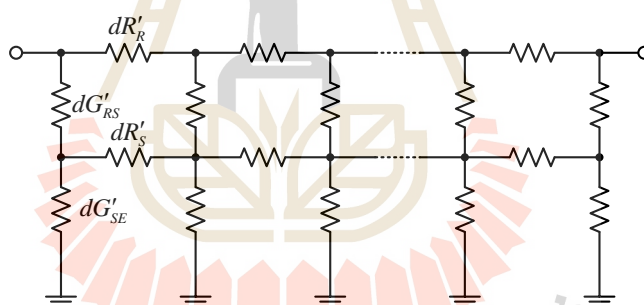
รูปที่ 4.11 แบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียว



รูปที่ 4.12 แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับแบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียว



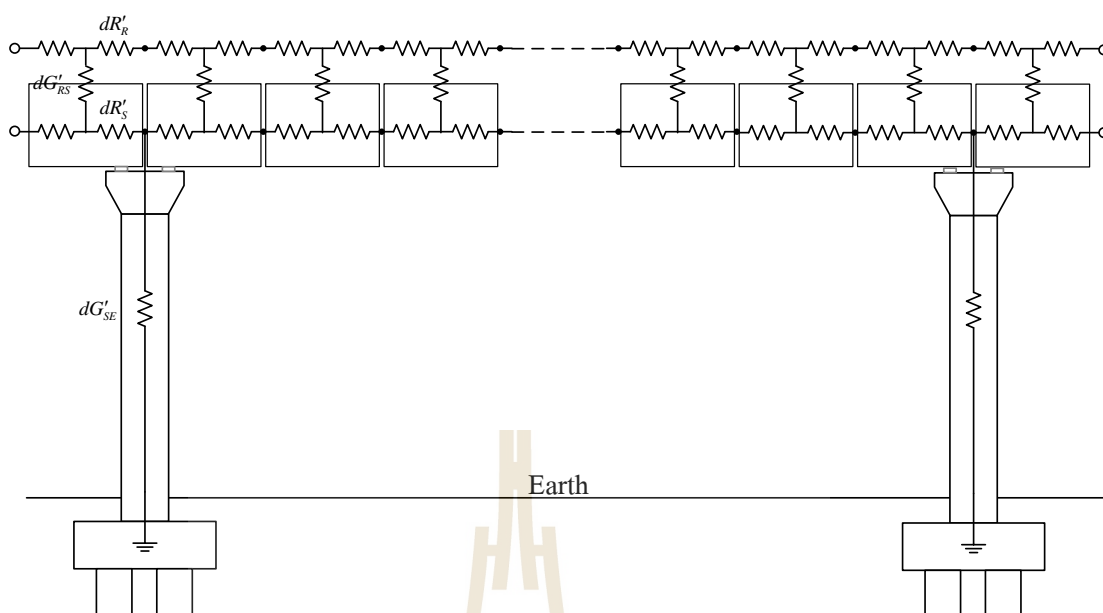
รูปที่ 4.13 แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น



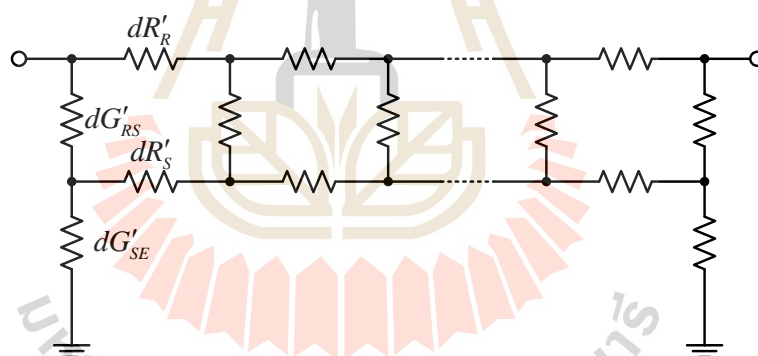
รูปที่ 4.14 แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น

3) แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นที่เสาโครงสร้างทางยกระดับ

แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นที่เสาโครงสร้างทางยกระดับ (Two-layer grounding model at the poles: $TGM_{@poles}$) เป็นแบบจำลองสำหรับการพิจารณาศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วไหลลงดินโดยพิจารณาโครงสร้างทางยกระดับแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 และเพื่อให้ง่ายแก่การจำลองผลสามารถเขียนเป็นแบบจำลองอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 4.16 $TGM_{@poles}$ เป็นเช่นเดียวแบบจำลอง TGM แต่มีการต่อลงดินที่เฉพาะเสาโครงสร้างทางยกระดับเท่านั้น



รูปที่ 4.15 แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นที่เสาโครงสร้างทางยกระดับ



รูปที่ 4.16 แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นที่เสาโครงสร้างทางยกระดับ

แบบจำลองรถไฟ

แบบจำลองรถไฟจะอยู่ในรูปของแหล่งจ่ายกระแสและสามารถคำนวณ I_{tr} ได้จากสมการที่ (4.11) เมื่อ P_{tr} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่ (train power consumption) และ V_{tr} ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขบวนรถไฟ

$$I_{tr} = \frac{P_{tr}}{V_{tr}} \quad (4.11)$$

4.2.4 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

การคำนวณแรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้ากำลังไฟที่ใช้สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละสถานี ศักย์ไฟฟ้าที่วาง แรงดันไฟฟ้าในโครงสร้าง การสูญเสียพลังงานในระบบ และสิ่งสำคัญคือการหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้วิธีการฉีดกระแสในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยระบบหลายตัวนำ (multi-conductor system) การแก้ปัญหาเครือข่ายกำลังไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับวิเคราะห์แบบโนดซึ่งประกอบไปด้วยสถานีไฟฟ้าเรียงกระแสและรถไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองที่นำเสนอภาพประกอบในรูปที่ 4.10 สำหรับกรณีการต่อลงดินที่พิจารณาโครงสร้างทางยกระดับที่มีการต่อลงดินแบบสองชั้น และสามารถหาผลเฉลยได้จากสมการ โหนดดังแสดงในสมการที่ (4.14) โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นทุก ๆ บัส จะถูกตั้งเป็นศูนย์

$$[I] = [G][V] \quad (4.12)$$

โดยที่ $[I]$ คือ เมทริกซ์กระแสไฟฟ้า (A)
 $[G]$ คือ เมทริกซ์ความนำไฟฟ้า (S)
 $[V]$ คือ เมทริกซ์แรงดันไฟฟ้า (V)

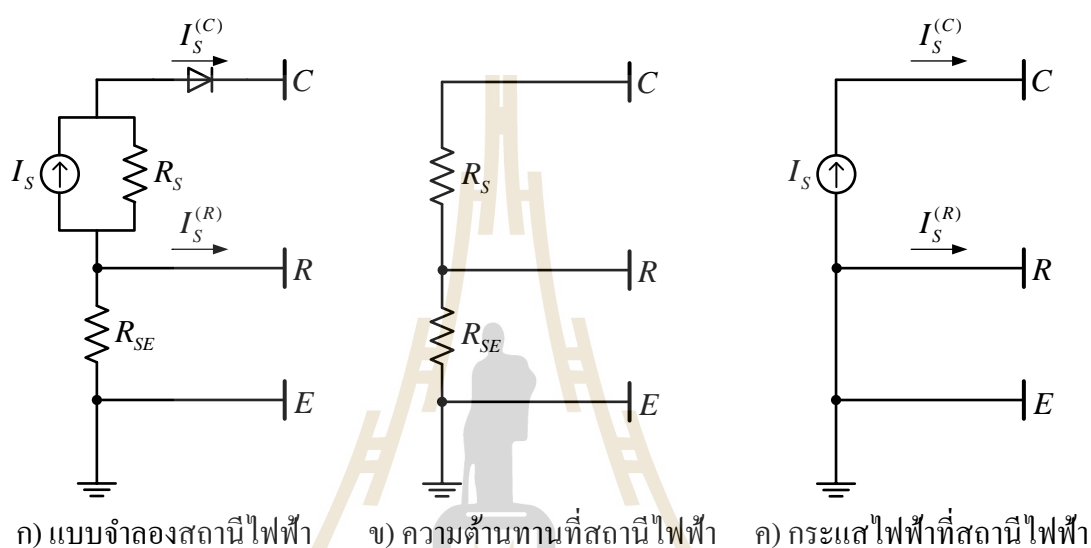
เมทริกซ์ความนำไฟฟ้า $[G]$ จะถูกสร้างขึ้น โดยการสร้างเมทริกซ์ย่อย (conductance submatrix) ของความนำไฟฟ้าสำหรับแต่ละบัสตามซึ่งเมทริกซ์ย่อยจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระบบหลายตัวนำที่ต่อกันในแต่ละบัส จากแบบจำลองกันต่อลงดินที่ได้นำเสนอไว้สามารถแบ่งระบบหลายตัวนำได้ 2 แบบ คือ ระบบตัวนำไฟฟ้าสองระดับและระบบตัวนำไฟฟ้าสามระดับดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

1. ระบบตัวนำไฟฟ้าสองระดับ

ระบบตัวนำไฟฟ้าสองระดับต่อหนึ่งบัสเป็นระบบที่ใช้กับแบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียวสามารถหาเมทริกซ์ย่อยของความนำไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยเมทริกซ์ย่อยที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและสายส่ง ดังนั้นการหาเมทริกซ์ย่อยของความนำไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของแบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียวได้ดังสมการที่ (4.13) โดยพิจารณาได้จากรูปที่ 4.17 ซึ่งแสดงการต่อตัวนำที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบสองระดับต่อหนึ่งบัส

$$[I_s] = [G_s][V_s] \quad (4.13)$$

เมื่อ $[I_s]$ คือ เมทริกซ์ย่อยกระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (A)
 $[V_s]$ คือ เมทริกซ์ย่อยแรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (V)
 $[G_s]$ คือ เมทริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)



รูปที่ 4.17 การต่อตัวนำที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบสองระดับต่อหนึ่งบัส

จากรูปที่ 4.17 และสมการที่ (4.13) สามารถหาเมทริกซ์ย่อยที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบสองระดับต่อหนึ่งบัสได้ดังสมการนี้

$$\begin{bmatrix} I_s^{(C)} \\ I_s^{(R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_s^{(C,C)} & G_s^{(C,R)} \\ G_s^{(R,C)} & G_s^{(R,R)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s^{(C)} \\ V_s^{(R)} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

เมื่อ $I_s^{(C)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกรางที่สามที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (A)
 $I_s^{(R)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกรางวิ่งที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (A)
 $V_s^{(C)}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่รางที่สามที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (V)
 $V_s^{(R)}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (V)
 $G_s^{(C,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของรางที่สามที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)
 $G_s^{(C,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางที่สามและรางวิ่งที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)

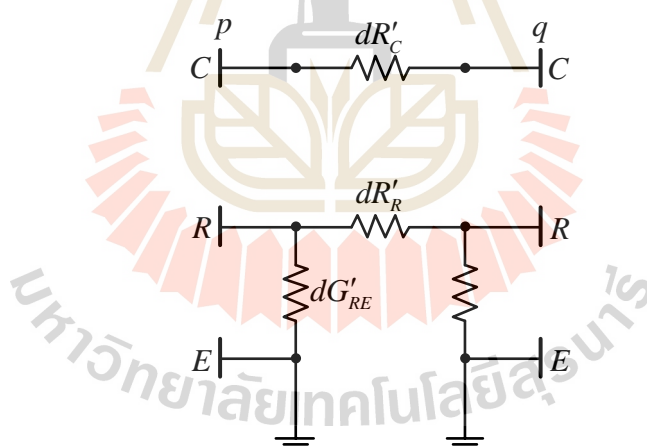
$G_S^{(R,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งและรางที่สามที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)

$G_S^{(R,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งและรางที่สามที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)

จากสมการที่ (4.13) และรูปที่ 4.17 ข) สามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและรูปที่ 4.17 ค) สามารถหาเมตริกซ์ย่อยกระแสไฟฟ้าที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ได้ดังสมการที่ (4.15) และ (4.16) ตามลำดับ เมื่อ I_S คือ กระแสไฟฟ้าที่บัสสถานีไฟฟ้าย่อย

$$[G_S] = \begin{bmatrix} G_S^{(C,C)} & G_S^{(C,R)} \\ G_S^{(R,C)} & G_S^{(R,R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_S} & -\frac{1}{R_S} \\ -\frac{1}{R_S} & \frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_{SE}} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$[I_S] = \begin{bmatrix} I_S^{(C)} \\ I_S^{(R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_S \\ -I_S \end{bmatrix} \quad (4.16)$$



รูปที่ 4.18 การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใดๆ แบบสองระดับ

ส่วนการหาเมตริกซ์ย่อยที่สายส่งจะพิจารณาเฉพาะเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าเท่านั้นเนื่องจากในส่วนของสายส่งไม่มีแหล่งจ่ายคู่ได้จากรูปที่ 4.10 (ในส่วนของสายส่ง) พิจารณาได้จากรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงการต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใดๆ แบบสองระดับ สามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าระหว่างโนด p และ q ใดๆ ได้ตามสมการที่ (4.17)

$$[G]_{pq} = \begin{bmatrix} [G_{pp}] & [G_{pq}] \\ [G_{qp}] & [G_{qq}] \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

- เมื่อ $[G]_{pq}$ คือ เมทริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าของสายส่งระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $[G_{pp}]$ คือ เมทริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าระหว่างโนด p ใด ๆ (S)
 $[G_{pq}]$ คือ เมทริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $[G_{qp}]$ คือ เมทริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าระหว่างโนด q และ p ใด ๆ (S)
 $[G_{qq}]$ คือ เมทริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าโนด q ใด ๆ (S)

ดังนั้นจากสมการที่ (4.17) สามารถหาเมทริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้า $[G_{pq}]$ และ $[G_{qp}]$ หาได้จากสมการที่ (4.18)

$$[G_{pq}] = [G_{qp}] = \begin{bmatrix} G_{pq}^{(C,C)} & G_{pq}^{(C,R)} \\ G_{pq}^{(R,C)} & G_{pq}^{(R,R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dR'_C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{dR'_R} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

- เมื่อ $G_{pq}^{(C,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของรางที่สามระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $G_{pq}^{(C,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางที่สามและรางวิ่งระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $G_{pq}^{(R,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งและรางที่สามระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $G_{pq}^{(R,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของรางวิ่งระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)

และสามารถหาเมทริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้า $[G_{pp}]$ และ $[G_{qq}]$ หาได้จากสมการที่ (4.19)

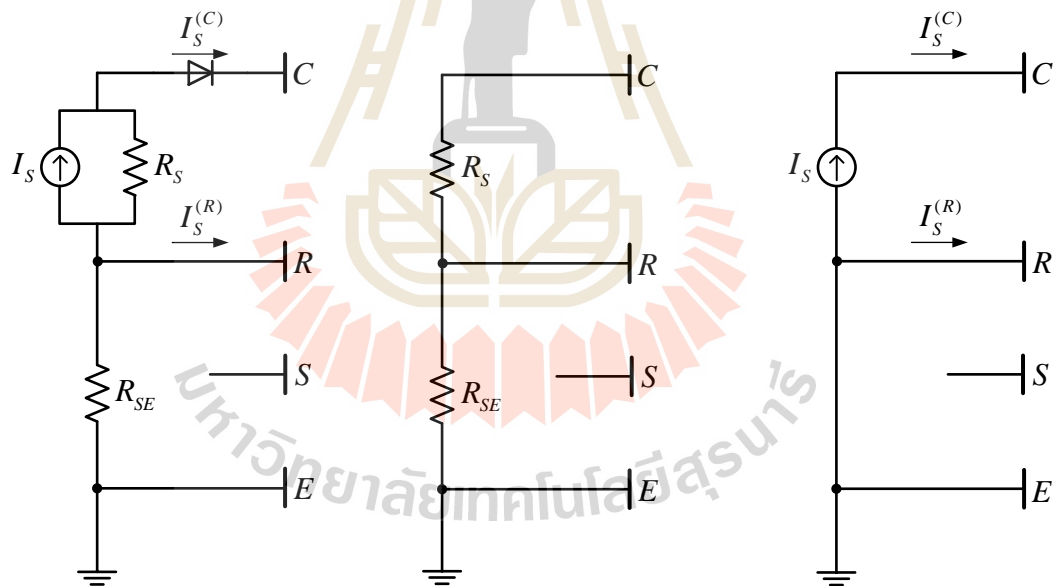
$$[G_{pp}]_{RE} = [G_{qq}]_{RE} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & dG'_{RE} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

จากนั้นทำการรวมสมการเมทริกซ์ย่อยเหล่านี้เพื่อสร้างเมทริกซ์ความนำไฟฟ้าและสมการโนดสำหรับระบบ N_{bus} เขียนได้ดังสมการที่ (4.20)

$$\begin{bmatrix} I_1^{(C)} \\ I_1^{(R)} \\ I_2^{(C)} \\ I_2^{(R)} \\ \vdots \\ I_N^{(R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11}^{(C,C)} & G_{11}^{(C,R)} \\ G_{11}^{(R,C)} & G_{11}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{12}^{(C,C)} & G_{12}^{(C,R)} \\ G_{12}^{(R,C)} & G_{12}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \vdots & \begin{bmatrix} G_{1N}^{(C,C)} & G_{1N}^{(C,R)} \\ G_{1N}^{(R,C)} & G_{1N}^{(R,R)} \end{bmatrix} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} G_{21}^{(C,C)} & G_{21}^{(C,R)} \\ G_{21}^{(R,C)} & G_{21}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{22}^{(C,C)} & G_{22}^{(C,R)} \\ G_{22}^{(R,C)} & G_{22}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \vdots & \begin{bmatrix} G_{2N}^{(C,C)} & G_{2N}^{(C,R)} \\ G_{2N}^{(R,C)} & G_{2N}^{(R,R)} \end{bmatrix} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} G_{N1}^{(C,C)} & G_{N1}^{(C,R)} \\ G_{N1}^{(R,C)} & G_{N1}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{N2}^{(C,C)} & G_{N2}^{(C,R)} \\ G_{N2}^{(R,C)} & G_{N2}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \vdots & \begin{bmatrix} G_{NN}^{(C,C)} & G_{NN}^{(C,R)} \\ G_{NN}^{(R,C)} & G_{NN}^{(R,R)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{(C)} \\ V_1^{(R)} \\ V_2^{(C)} \\ V_2^{(R)} \\ \vdots \\ V_N^{(R)} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

2. ระบบตัวนำไฟฟ้าสามระดับ

ระบบตัวนำไฟฟ้าสามระดับต่อหนึ่งบัสเป็นระบบที่ใช้กับแบบจำลอง TGM และ TGM_{@poles} ดังรูปที่ 4.19 สามารถหาเมตริกซ์ย่อยของความนำไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสำหรับเมตริกซ์ย่อยที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้จากสมการที่ (4.13)



ก) แบบจำลองสถานีไฟฟ้า ข) ความต้านทานที่สถานีไฟฟ้า ค) กระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า

รูปที่ 4.19 การต่อตัวนำที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบสามระดับต่อหนึ่งบัส

จากรูปที่ 4.19 และสมการที่ (4.13) สามารถหาเมตริกซ์ย่อยที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบสองระดับต่อหนึ่งบัสได้ดังสมการนี้

$$\begin{bmatrix} I_S^{(C)} \\ I_S^{(R)} \\ I_S^{(S)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_S^{(C,C)} & G_S^{(C,R)} & G_S^{(C,S)} \\ G_S^{(R,C)} & G_S^{(R,R)} & G_S^{(R,S)} \\ G_S^{(S,C)} & G_S^{(S,R)} & G_S^{(S,S)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S^{(C)} \\ V_S^{(R)} \\ V_S^{(S)} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

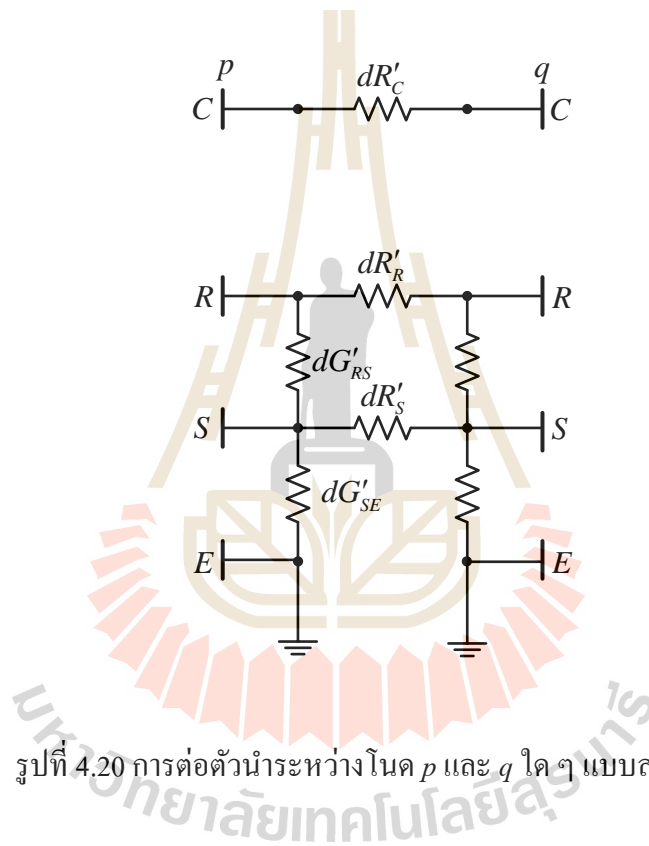
เมื่อ	$I_S^{(C)}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกรางที่สามที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (A)
	$I_S^{(R)}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกรางวิ่งที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (A)
	$I_S^{(S)}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกโครงสร้างที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (A)
	$V_S^{(C)}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่รางที่สามที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (V)
	$V_S^{(R)}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (V)
	$V_S^{(S)}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่โครงสร้างที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (V)
	$G_S^{(C,C)}$	คือ ความนำไฟฟ้าของรางที่สามที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)
	$G_S^{(C,R)}$	คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางที่สามและรางวิ่งที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)
	$G_S^{(C,S)}$	คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางที่สามและโครงสร้างที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)
	$G_S^{(R,C)}$	คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งและรางที่สามที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)
	$G_S^{(R,R)}$	คือ ความนำไฟฟ้าของรางวิ่งที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)
	$G_S^{(R,S)}$	คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งและโครงสร้างที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)
	$G_S^{(S,C)}$	คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างและรางที่สามที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)
	$G_S^{(S,R)}$	คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างและรางที่สามที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)
	$G_S^{(S,S)}$	คือ ความนำไฟฟ้าของโครงสร้างที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อน (S)

จากสมการที่ (4.21) และรูปที่ 4.19 ข) สามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อนและรูปที่ 4.19 ค) สามารถหาเมตริกซ์ย่อยกระแสไฟฟ้าที่บัสสถานไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ดังสมการที่ (4.24) และ (4.25) ตามลำดับ

$$[G_S] = \begin{bmatrix} G_S^{(C,C)} & G_S^{(C,R)} & G_S^{(C,S)} \\ G_S^{(R,C)} & G_S^{(R,R)} & G_S^{(R,S)} \\ G_S^{(S,C)} & G_S^{(S,R)} & G_S^{(S,S)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_S} & -\frac{1}{R_S} & 0 \\ -\frac{1}{R_S} & \frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_{SE}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_{SE}} & \frac{1}{R_{SE}} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$[I_S] = \begin{bmatrix} I_S^{(C)} \\ I_S^{(R)} \\ I_S^{(S)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_S \\ -I_S \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

ส่วนการหาเมตริกซ์ย่อยที่สายส่งจะพิจารณาเฉพาะเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าเท่านั้นเนื่องจากในส่วนของสายส่งไม่มีแหล่งจ่าย โดยพิจารณาได้จากรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงการต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบสามระดับ



รูปที่ 4.20 การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบสามระดับ

จากรูปที่ 4.20 สามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าระหว่างโนด p และ q ใด ๆ ได้ตามสมการที่ (4.13) สามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้า $[G_{pq}]$ และ $[G_{qp}]$ หาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$[G_{pq}] = [G_{qp}] = \begin{bmatrix} G_{pq}^{(C,C)} & G_{pq}^{(C,R)} & G_{pq}^{(C,S)} \\ G_{pq}^{(R,C)} & G_{pq}^{(R,R)} & G_{pq}^{(R,S)} \\ G_{pq}^{(S,C)} & G_{pq}^{(S,R)} & G_{pq}^{(S,S)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dR'_C} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{dR'_R} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{dR'_S} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

- เมื่อ $G_{pq}^{(C,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของรางที่สามระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $G_{pq}^{(C,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางที่สามและรางวิ่งระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $G_{pq}^{(C,S)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางที่สามและโครงสร้างระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $G_{pq}^{(R,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งและรางที่สามระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $G_{pq}^{(R,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของรางวิ่งระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $G_{pq}^{(R,S)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งและโครงสร้างระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $G_{pq}^{(S,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างและรางที่สามระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $G_{pq}^{(S,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างและรางวิ่งระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)
 $G_{pq}^{(S,S)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของโครงสร้างระหว่างโนด p และ q ใด ๆ (S)

และสามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้า $[G_{pp}]$ และ $[G_{qq}]$ หาได้จากสมการที่ (4.25)

$$[G_{pp}]_{SE} = [G_{qq}]_{SE} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & dG'_{RS} & -dG'_{RS} \\ 0 & -dG'_{RS} & dG'_{RS} + dG'_{SE} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

จากนั้นทำการรวมสมการเมตริกซ์ย่อยเหล่านี้เพื่อสร้างเมตริกซ์ความนำไฟฟ้าและสมการโนดสำหรับระบบ N_{bus} เขียนได้ดังสมการที่ (4.26)

$$\begin{bmatrix} I_1^{(C)} \\ I_1^{(R)} \\ I_1^{(S)} \\ I_2^{(C)} \\ I_2^{(R)} \\ I_2^{(S)} \\ M \\ I_N^{(C)} \\ I_N^{(R)} \\ I_N^{(S)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11}^{(C,C)} & G_{11}^{(C,R)} & G_{11}^{(C,S)} \\ G_{11}^{(R,C)} & G_{11}^{(R,R)} & G_{11}^{(R,S)} \\ G_{11}^{(S,C)} & G_{11}^{(S,R)} & G_{11}^{(S,S)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{12}^{(C,C)} & G_{12}^{(C,R)} & G_{12}^{(C,S)} \\ G_{12}^{(R,C)} & G_{12}^{(R,R)} & G_{12}^{(R,S)} \\ G_{12}^{(S,C)} & G_{12}^{(S,R)} & G_{12}^{(S,S)} \end{bmatrix} & L \\ \begin{bmatrix} G_{21}^{(C,C)} & G_{21}^{(C,R)} & G_{21}^{(C,S)} \\ G_{21}^{(R,C)} & G_{21}^{(R,R)} & G_{21}^{(R,S)} \\ G_{21}^{(S,C)} & G_{21}^{(S,R)} & G_{21}^{(S,S)} \end{bmatrix} & O & O \\ M & M & L \\ L & L & \begin{bmatrix} G_{N-1,N}^{(C,C)} & G_{N-1,N}^{(C,R)} & G_{N-1,N}^{(C,S)} \\ G_{N-1,N}^{(R,C)} & G_{N-1,N}^{(R,R)} & G_{N-1,N}^{(R,S)} \\ G_{N-1,N}^{(S,C)} & G_{N-1,N}^{(S,R)} & G_{N-1,N}^{(S,S)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} G_{N1}^{(C,C)} & G_{N1}^{(C,R)} & G_{N1}^{(C,S)} \\ G_{N1}^{(R,C)} & G_{N1}^{(R,R)} & G_{N1}^{(R,S)} \\ G_{N1}^{(S,C)} & G_{N1}^{(S,R)} & G_{N1}^{(S,S)} \end{bmatrix} & L & \begin{bmatrix} G_{N,N-1}^{(C,C)} & G_{N,N-1}^{(C,R)} & G_{N,N-1}^{(C,S)} \\ G_{N,N-1}^{(R,C)} & G_{N,N-1}^{(R,R)} & G_{N,N-1}^{(R,S)} \\ G_{N,N-1}^{(S,C)} & G_{N,N-1}^{(S,R)} & G_{N,N-1}^{(S,S)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{NN}^{(C,C)} & G_{NN}^{(C,R)} & G_{NN}^{(C,S)} \\ G_{NN}^{(R,C)} & G_{NN}^{(R,R)} & G_{NN}^{(R,S)} \\ G_{NN}^{(S,C)} & G_{NN}^{(S,R)} & G_{NN}^{(S,S)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{(C)} \\ V_1^{(R)} \\ V_1^{(S)} \\ V_2^{(C)} \\ V_2^{(R)} \\ V_2^{(S)} \\ M \\ V_N^{(C)} \\ V_N^{(R)} \\ V_N^{(S)} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

หลังจากการคำนวณเมตริกซ์ความนำไฟฟ้าเสร็จสมบูรณ์ เมตริกซ์กระแส $[I]$ ในสมการที่ (4.12) ของระบบจะถูกคำนวณโดยการรวมค่ากระแสไฟฟ้าของสถานีและกระแสไฟฟ้าของรถไฟ (I_{tr}) คูได้จากสมการที่ (4.11) ในที่สุดเมตริกซ์แรงดันไฟฟ้าที่บัส $[V]$ สามารถหาได้โดยการแก้สมการที่ (4.20) และ (4.26) กระบวนการนี้ได้รับการดำเนินการซ้ำจนกว่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสแต่ละอันจะน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้

การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟจะดำเนินการอย่างต่อเนื่อง เช่น ใช้ช่วงเวลาคำนวณทุก ๆ 0.5 s หรือ 1.0 s เป็นต้น ตำแหน่งของรถไฟและกำลังงานไฟฟ้าที่รถไฟได้รับไปจากสายจ่ายจะเปลี่ยนแปลงไปตามโหมดการทำงาน เช่น โหมดเร่งความเร็ว โหมดรักษาความเร็วคงที่ โหมดแล่นด้วยความเฉื่อย หรือโหมดเบรก เป็นต้น โหลดในรูปแบบกระแสไฟฟ้าช่วยให้แบบจำลองวงจรมีความเป็นเชิงเส้น ทำให้ง่ายในการคำนวณผลเฉลย นอกจากนี้อาจจะใช้แบบจำลองในรูปแบบความต้านทานได้เช่นกัน สำหรับแบบจำลองกำลังไฟฟ้าอาจจะนำมาใช้งานได้ แต่จะทำให้แบบจำลองวงจรไฟฟ้ามีความไม่เชิงเส้น การแก้ปัญหาต้องใช้กระบวนการแก้สมการแบบไม่เชิงเส้น เช่น วิธีคำนวณวนรอบของเกาส์ (gauss iterative method) วิธีคำนวณวนรอบนิวตันราฟสัน (newton-raphson iterative method) หรือวิธีการฉีดกระแส (current injection method) (Kulworawanichpong, 2015) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการฉีดกระแสหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า ซึ่งวิธีนี้ขึ้นอยู่กับสมการกระแสไฟฟ้าสมดุล (current-balance equation) ในแต่ละบัสมากกว่าสมการกำลังไฟฟ้าสมดุล (power-balance equation) ดังสมการที่ (4.27) และขั้นตอนการหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟด้วยวิธีการฉีดกระแสแสดงดังรูปที่ 4.21 (ชนิดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2557)

$$I_{iss,k} - \frac{P_{tr,k}}{V_k} = \sum_{i=1}^N G_{k,i} V_i \quad (4.27)$$

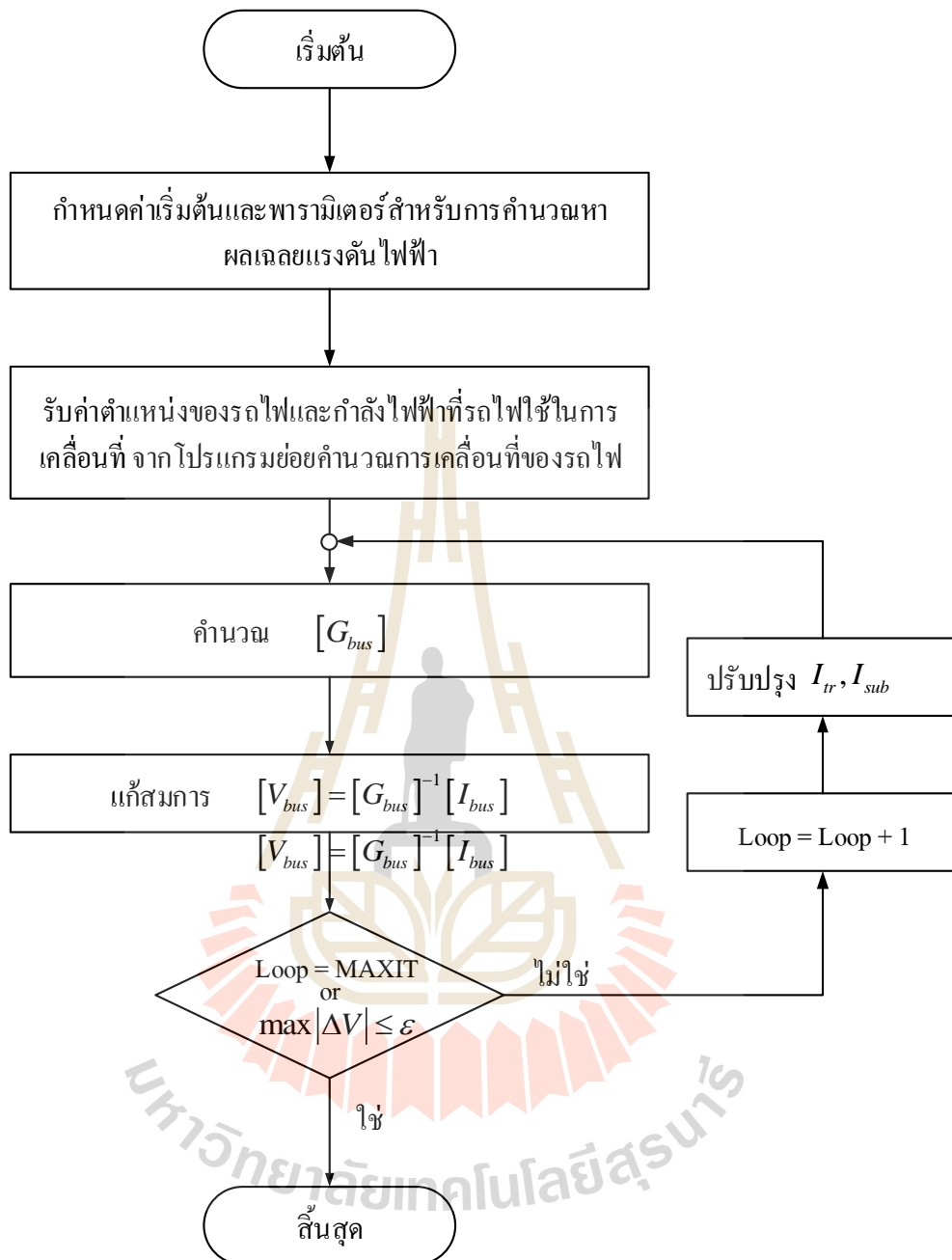
- เมื่อ V_i, V_k คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส i, k
 $I_{iss,k}$ คือ วัสดุสามารถลัดวงจรที่บัส k (กรณีพิจารณาบัสสถานีไฟฟ้า)
 มีค่าเป็น 0 ที่บัสอื่น ๆ
 $P_{tr,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าของขบวนรถไฟที่บัส k
 $G_{k,i}$ คือ สมาชิกของเมตริกซ์บัสอิมพีแดนซ์แถวที่ k หลักที่ i
 N คือ จำนวนบัสรวมทั้งระบบ

4.3 การจำลองผลการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขบวนเดียว

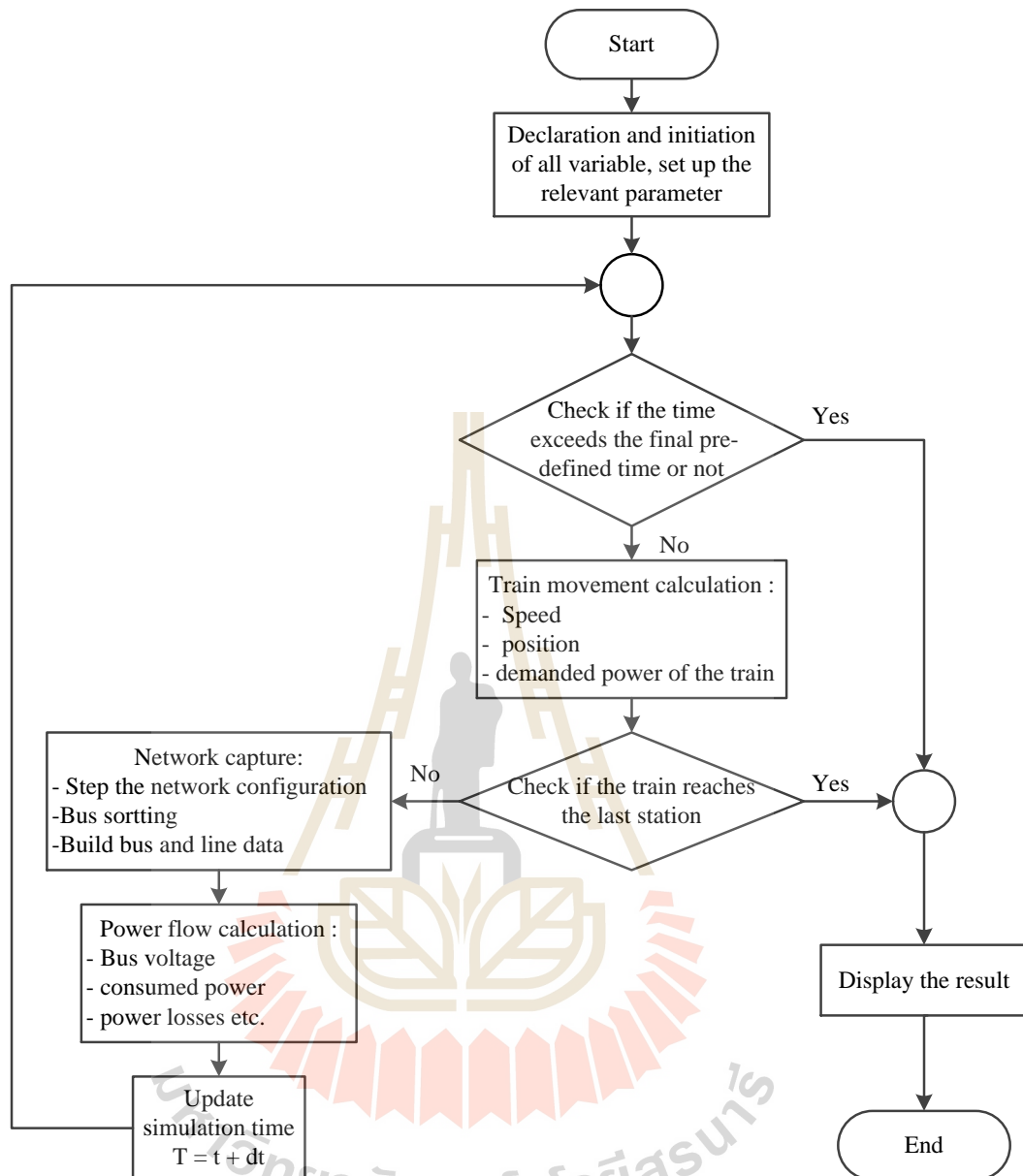
ขั้นตอนการจำลองผลการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 4.22 โปรแกรมจะเริ่มต้นด้วยการตั้งค่าพารามิเตอร์ของรถไฟและตัวแปรที่จำเป็นในกระบวนการ จากนั้นจะไปถึงรูปหลักที่เริ่มต้นด้วยการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟเพื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟเช่นความเร็ว ตำแหน่งและพลังงานที่ใช้ ถ้าวัดไฟมาถึงสถานีสุดท้ายให้ยุติกระบวนการ ถัดไปจะมีการจับภาพเครือข่ายเพื่อกำหนดค่าเครือข่ายพลังงานซึ่งมีการจัดเรียง bus number bus data และ line data หลังจากนั้นจะมีการคำนวณกระแสไฟฟ้าเพื่อค้นหาแรงดันไฟฟ้าของบัส ค่าพลังงานและการใช้พลังงานที่สถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละแห่ง และการสูญเสียพลังงาน เพิ่มเวลาด้วยขนาดของ time step และกลับไปสู่รูปหลักโดยทำซ้ำจนกว่าเวลาจะถึงเวลาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, 2560)

ระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (MRT purple line) ที่ให้บริการรถไฟในเขตเมืองหลวงของประเทศไทยเลือกเป็นกรณีศึกษาสำหรับขบวนรถไฟฟ้าขบวนเดียว การจำลองโดยใช้แบบจำลองระบบสำหรับการพิจารณาศักยภาพไฟฟ้าที่รางและแรงดันไฟฟ้าในโครงสร้าง ประกอบด้วยสถานีขนส่งผู้โดยสาร 16 สถานีและสถานีไฟฟ้าย่อย 10 สถานี ข้อมูลรถไฟและระบบของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วงได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ รถไฟได้รับพลังงานไฟฟ้าผ่านรางที่สามที่ด้วยแรงดันไฟฟ้าฟิวด์ 750 VDC จากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ฟิวด์ 2×2.5 MW เส้นทางและสถานีแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และข้อมูลสำหรับการจำลองผลแสดงได้ดังตารางที่ 4.1





รูปที่ 4.21 ขั้นตอนการหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟด้วยวิธีการนิคกระแส
ที่มา: ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ (2560)



รูปที่ 4.22 ขั้นตอนการจำลองผล

(Chuchit, Ratniyomchai, Kulworawanichpong, 2018)

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถ

Specific data	Information	
<i>Train parameters</i>		
Weight	tare weight	153 ton
	payload AW3	75 ton
Movement Feature	max. speed	80 km/h
	max. acceleration	1.2 m/s ²
	max. deceleration	0.9 m/s ²
Efficiency	gear	98%
	motor	90%
	motor power factor	86%
	inverter	96.5%
Auxiliary power	constant load	270 kW
Train resistance	equation (4.4)	
TE curve	max. TE	228.8 N
	v_1	30 km/h
	v_2	55 km/h
Route	Khlong Bang Phai station -> Tao Poon station	
Station dwell time	25 sec	
3 rd Rail Resistance	0.007 ohms/km at 15 degree C	
Running Rail Resistance (in parallel)	0.0175 ohms/km at 20 degree C	
rail-to-structure conductance per unit length	0.1 S/km	
structure's resistor	0.1 ohms/km	
structure-to-earth conductance per unit length	0.5 S/km	

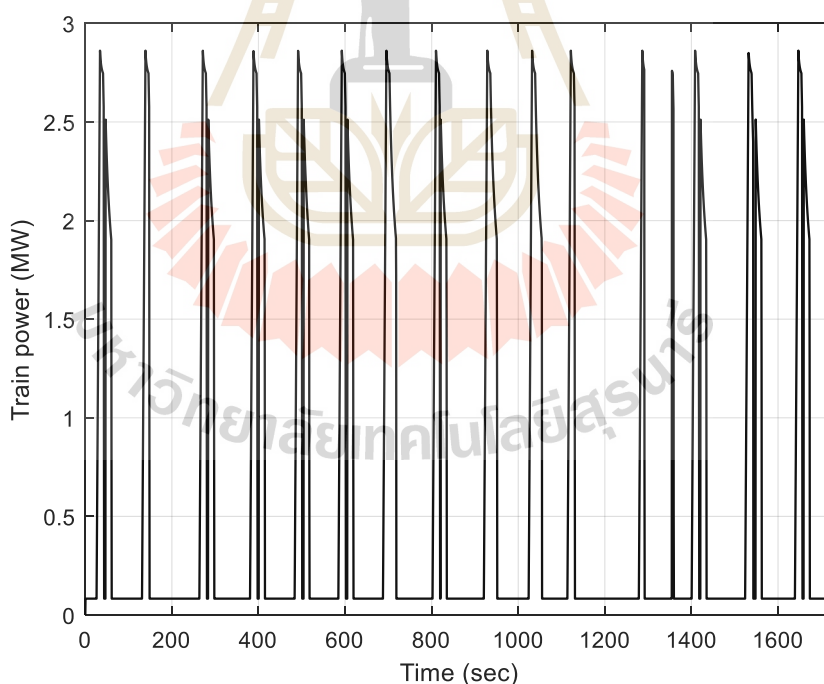
(+10% Temperature)

โปรแกรมการจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟเดี่ยวดำเนินการใน MATLAB/M-file โดยใช้แบบจำลองที่เสนอการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟและการคำนวณการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ โปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ที่จะวิ่งจากสถานี PP01 ไปยัง PP16 โดยใช้เวลา 25 วินาทีในการหยุดทำงานที่สถานีทุกสถานี ($dT = 0.5$ s)

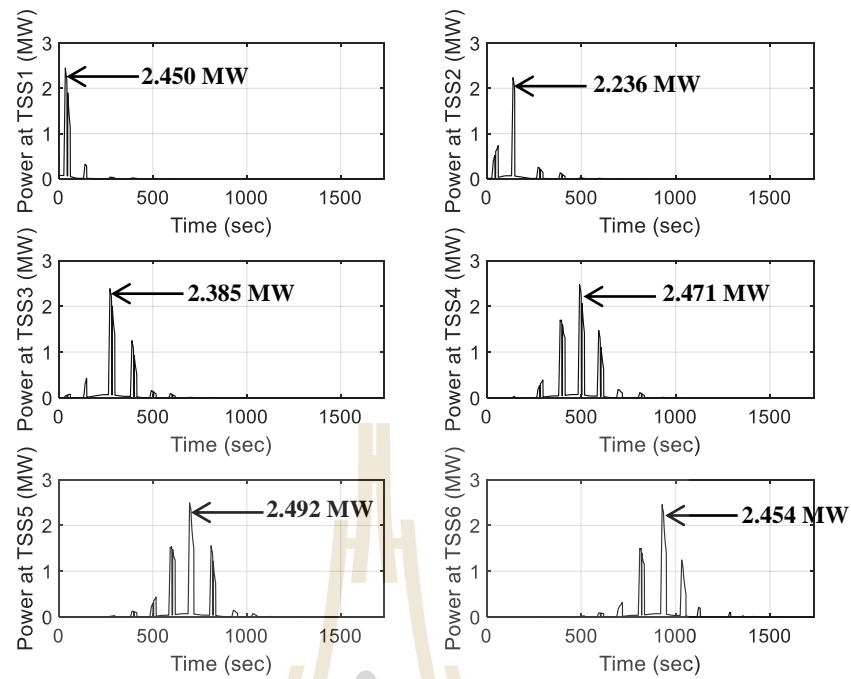
4.3.1 การจำลองผลโดยทั่วไป

การควบคุมความเร็วของรถไฟควบคุมโดยวิธีการที่เรียกว่าการควบคุมสัดส่วนที่แสดงในรูปที่ 4.10 ในหัวข้อก่อนหน้านี้ ผลที่ได้คาดว่าจะได้รับการจำลองผล คือ สักยภาพที่วาง แรงดันไฟฟ้าในโครงสร้าง กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในแต่ละสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนพลังงานสะสมของรถไฟและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนทุกสถานี และแรงดันไฟฟ้าของขบวนรถไฟสำหรับแบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียวแสดงได้ดังรูปที่ 4.23-4.29

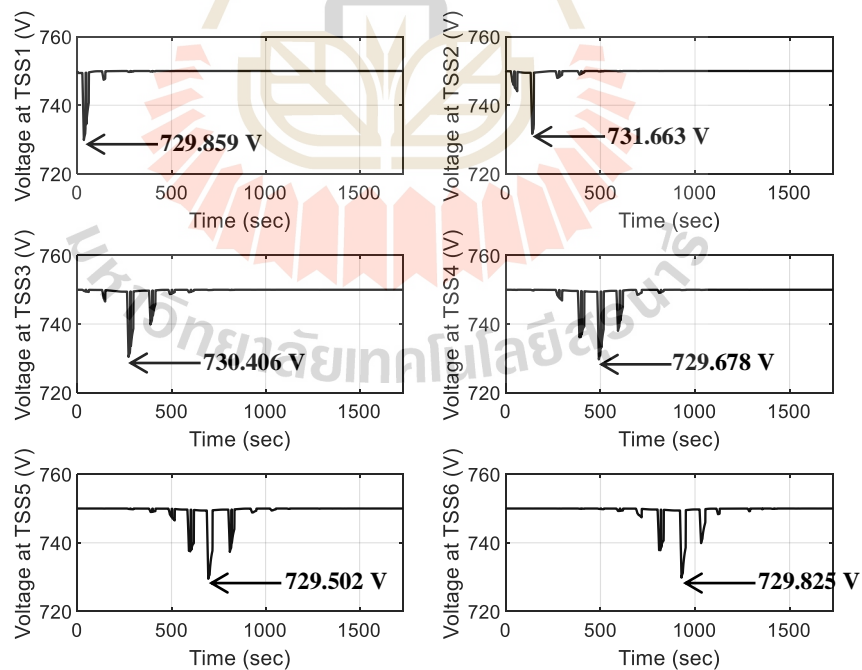
รูปที่ 4.9 แสดงความเร็วของรถไฟตามระยะทางที่เคลื่อนที่ผ่านโดยเส้นสีแดงที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดความเร็วของรถไฟ รถไฟดึงกำลังไฟฟ้าระหว่างโหมดความเร่งและโหมดการควบคุมความเร็วเพื่อวัตถุประสงค์ในขับเคลื่อนและใช้พลังงานเสริมเฉพาะช่วงหยุดที่สถานีดังแสดงในรูปที่ 4.23 รูปที่ 4.24-4.25 แสดงกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-6 รูปที่ 4.26 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่รถไฟ เมื่อรถไฟวิ่งเข้าใกล้สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนั้นจะให้กำลังมากกว่าสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ไกลออกไป ในลักษณะเดียวกัน แรงดันไฟฟ้าที่ TSS ใกล้กับรถไฟอาจมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าโดยปกติ



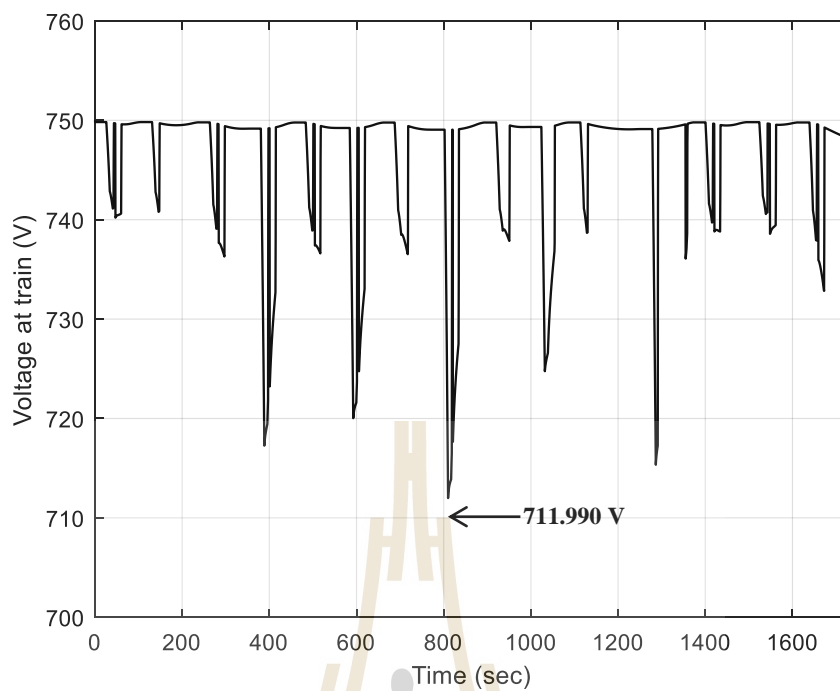
รูปที่ 4.23 กำลังไฟฟ้าที่ใช้โดยรถไฟ



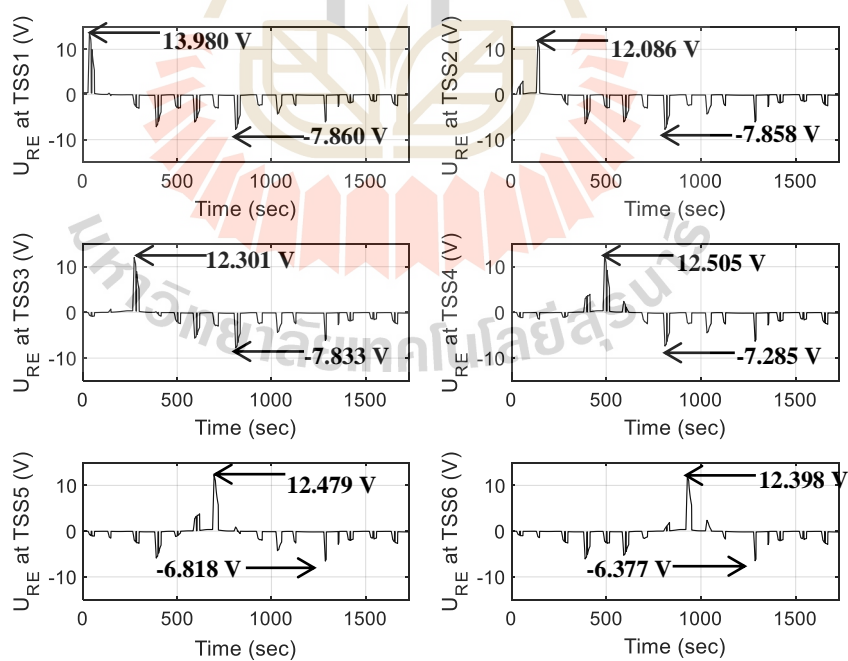
รูปที่ 4.24 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-6



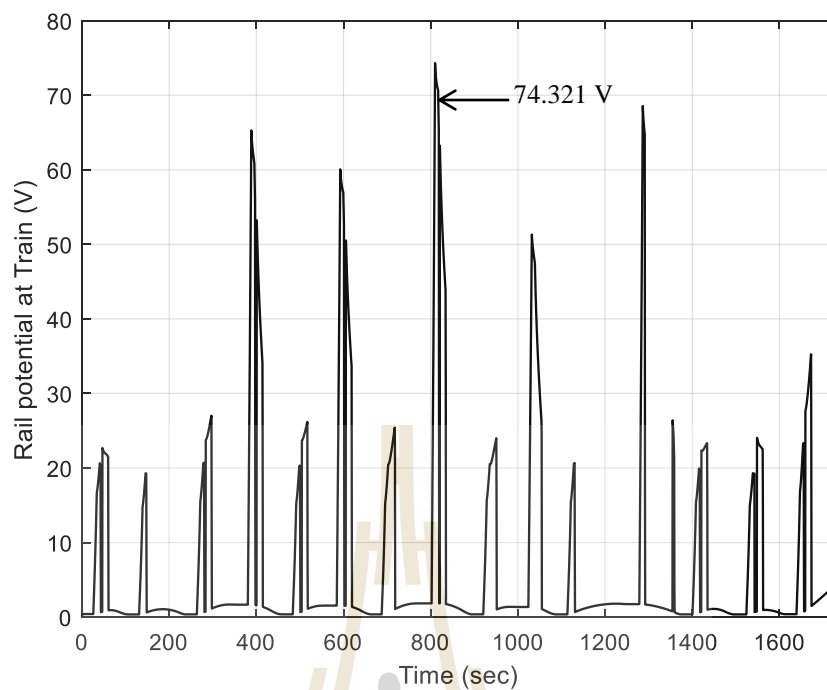
รูปที่ 4.25 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-6



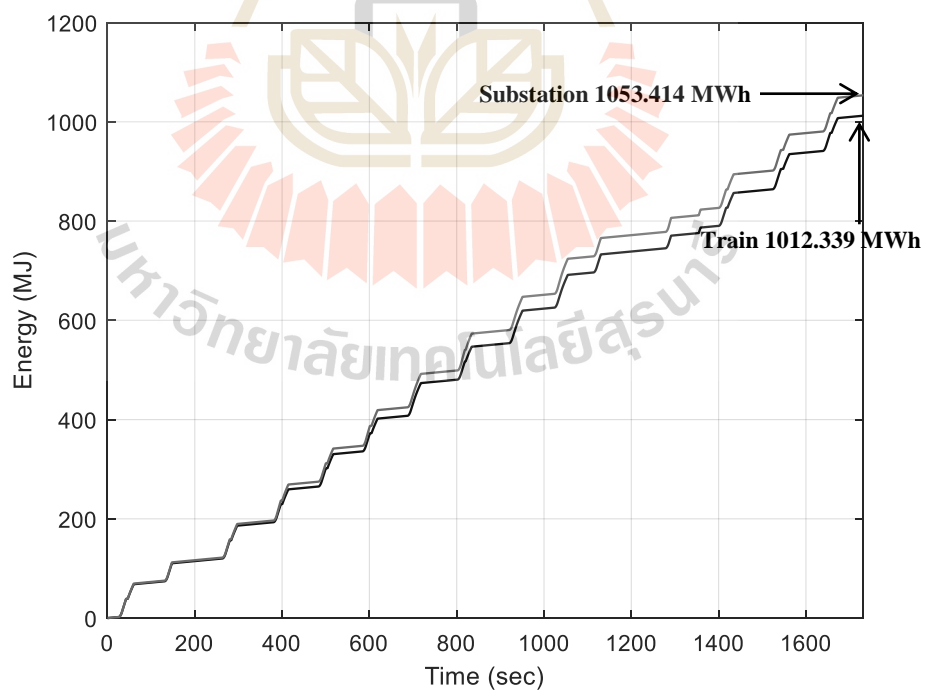
รูปที่ 4.26 แรงดันไฟฟ้าตามตำแหน่งของรถไฟ



รูปที่ 4.27 ศักย์ไฟฟ้าที่รางที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-6



รูปที่ 4.28 ศักย์ไฟฟ้าตามตำแหน่งของรถไฟ



รูปที่ 4.29 พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งรถไฟและสถานีไฟฟ้าย่อย

ศักย์ไฟฟ้าที่วางไว้เทียบกับดินของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและที่ตำแหน่งรถไฟฟ้าวัดแสดงไว้ในรูปที่ 4.27 – 4.28 และตารางที่ 4.2 พบว่ามีศักย์ไฟฟ้าที่วางสูงสุดมีค่าเป็น 13.98 V ที่ TSS1 และ 74.32 V ที่ตำแหน่งรถไฟ ซึ่งอาจเกิดจากกระแสไฟฟ้าจำนวนมากที่จ่ายให้แก่รถไฟในขณะนั้นเนื่องจากการเร่งความเร็วและระยะห่างของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ตามมาตรฐานยุโรป สำหรับศักย์ไฟฟ้าที่วางสูงสุดที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่สามารถเข้าถึงได้สูงสุดในระยะเวลาไม่น้อยกว่า 300 s และแรงดันไม่เกิน 120 V_{dc} ดังนั้นสำหรับกรณีจำลองนี้ถือว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

พลังงานไฟฟ้าสะสมของรถไฟและ TSS ทั้งหมดจะแสดงในรูปที่ 4.29 และจากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ TSS จะมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้โดยรถไฟซึ่งแสดงว่าต้องมีการสูญเสียพลังงานในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเนื่องจากประสิทธิภาพของรถไฟเป็นต้น เมื่อสิ้นสุดการจำลองพบว่ามีกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมเป็น 82.233 MWh

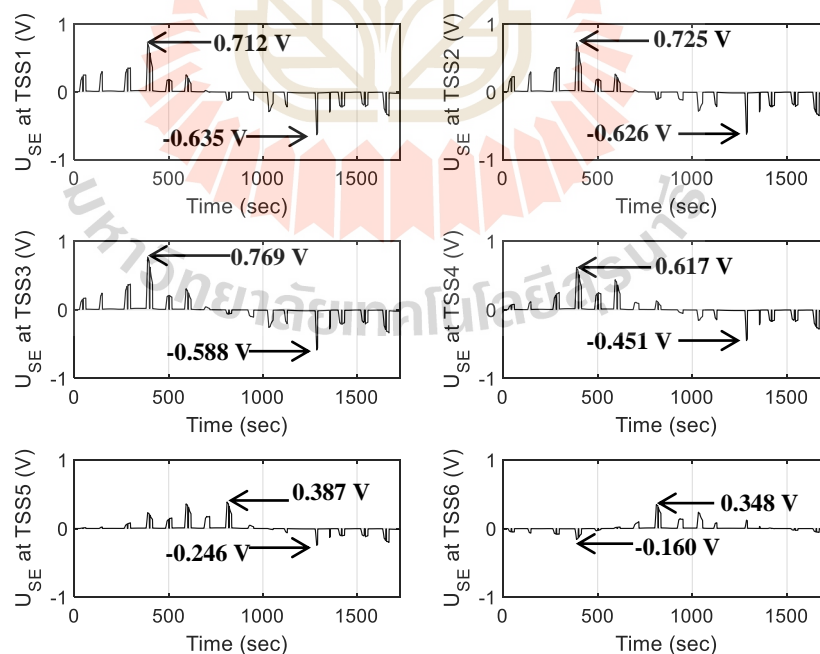
ตารางที่ 4.2 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่วางของแบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียวที่อยู่บนพื้นฐานตามมาตรฐาน EN 50122-2

TSS	$P_{S,max}$ (MW)	$V_{C,min}$ (V)	$U_{RE,max}$ (V)	$U_{RE,min}$ (V)
TSS1	2.449977	729.859	13.981	-7.889
TSS2	2.236038	731.663	12.083	-7.887
TSS3	2.385227	730.406	12.293	-7.862
TSS4	2.471415	729.678	12.505	-7.285
TSS5	2.492254	729.502	12.479	-6.818
TSS6	2.454063	729.825	12.398	-6.377
TSS7	2.463597	729.744	12.463	-7.200
TSS8	2.382788	730.427	12.295	-7.811
TSS9	2.241470	731.618	11.915	-7.824
TSS10	2.542112	729.080	13.149	-7.813

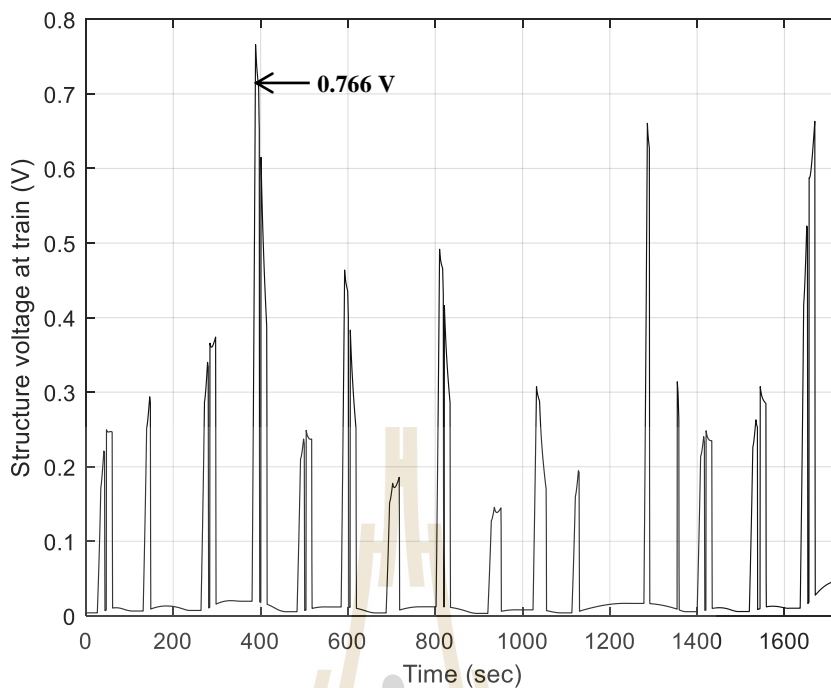
4.3.2 การเปรียบเทียบผลการจำลอง

การจำลองการเปรียบเทียบในกรณี OGM TGM และ TGM AT POLES การจำลองผลในกรณี TGM และ TGM AT POLES ให้ผลการจำลองเช่นเดียวกับ OGM ซึ่งแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ โดยแบบจำลอง TGM และ TGM AT POLES จะมีการพิจารณาแรงดันไฟฟ้าในโครงสร้างที่สถานีไฟฟ้าย่อยและรถไฟเพิ่มเติมดังรูปที่ 4.30 แสดงแรงดันไฟฟ้าในโครงสร้างที่สถานีไฟฟ้าย่อยของแบบจำลอง TGM พบว่ามีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในโครงสร้างโลหะมีค่าเป็น 0.769 V และ รูปที่ 4.31 แรงดันไฟฟ้าสูงสุดในโครงสร้างที่รถไฟเป็น 0.766 V ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีแรงดันไฟฟ้าในโครงสร้างสูงกว่า 200 mV ตามที่มาตรฐาน EN 50122-2 เนื่องจากพารามิเตอร์ของการต่อลงดินของโครงสร้างดิน (R'_S และ G'_{SE}) ที่กำหนดไว้ ดังนั้นถ้าต้องการพิจารณาแรงดันไฟฟ้าในโครงสร้างควรคำนึงถึงพารามิเตอร์ของ R'_S และ G'_{SE} ด้วย

สำหรับการเปรียบเทียบการจำลองผลในกรณี OGM TGM และ TGM_{@poles} ให้ผลการจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.5 จากผลการจำลองพบว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นแบบจำลอง OGM เหมาะสำหรับการพิจารณาโดยทั่ว ๆ ไป และเมื่อต้องการพิจารณาแรงดันไฟฟ้าในโครงสร้างที่สถานีไฟฟ้าย่อยและรถไฟสำหรับแบบจำลอง TGM สามารถใช้แทนแบบจำลอง TGM_{@poles} ได้



รูปที่ 4.30 แรงดันไฟฟ้าที่โครงสร้างที่สถานีไฟฟ้าย่อย 1-6 สำหรับแบบจำลอง TGM



รูปที่ 4.31 แรงดันไฟฟ้าที่โครงสร้างตามตำแหน่งของรถไฟสำหรับแบบจำลอง TGM

ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น

TSS	$P_{S,max}$ (MW)	$V_{C,min}$ (V)	$U_{RE,max}$ (V)	$U_{RE,min}$ (V)	$U_{SE,max}$ (V)	$U_{SE,min}$ (V)
TSS1	2.450040	729.859	13.980	-7.860	0.712	-0.635
TSS2	2.236092	731.663	12.086	-7.858	0.725	-0.626
TSS3	2.385315	730.406	12.301	-7.833	0.769	-0.588
TSS4	2.471501	729.677	12.512	-7.255	0.617	-0.451
TSS5	2.492702	729.498	12.487	-6.800	0.387	-0.246
TSS6	2.454142	729.824	12.402	-6.351	0.348	-0.160
TSS7	2.463443	729.745	12.467	-7.174	0.451	-0.363
TSS8	2.382638	730.428	12.299	-7.788	0.629	-0.554
TSS9	2.250557	731.541	11.968	-7.802	0.539	-0.618
TSS10	2.541464	729.085	13.155	-7.792	0.620	-0.650

ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นที่เสาโครงสร้างทางยกระดับ

TSS	$P_{S,max}$ (MW)	$V_{C,min}$ (V)	$U_{RE,max}$ (V)	$U_{RE,min}$ (V)	$U_{SE,max}$ (V)	$U_{SE,min}$ (V)
TSS1	2.450040	729.859	13.980	-7.860	0.711	-0.635
TSS2	2.236092	731.663	12.086	-7.858	0.725	-0.625
TSS3	2.385314	730.406	12.301	-7.833	0.769	-0.588
TSS4	2.471501	729.677	12.512	-7.254	0.617	-0.451
TSS5	2.492702	729.498	12.487	-6.800	0.387	-0.246
TSS6	2.454142	729.824	12.402	-6.351	0.349	-0.160
TSS7	2.463443	729.745	12.467	-7.173	0.451	-0.363
TSS8	2.382638	730.428	12.299	-7.788	0.629	-0.554
TSS9	2.250557	731.541	11.968	-7.802	0.539	-0.617
TSS10	2.541464	729.085	13.155	-7.791	0.620	-0.650

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบการจำลองผลการต่อลงดิน

Parameter		OGM	TGM	TGM _{@poles}
TSS	Maximum power (MW)	2.542	2.541	2.541
	Minimum voltage (V)	729.080	729.085	729.085
	Maximum rail potential (V)	13.981	13.980	13.980
	Minimum rail potential (V)	-7.889	-7.860	-7.860
	Maximum structure to earth voltage (V)	-	0.712	0.769
	Minimum structure to earth voltage (V)	-	-5.54	-0.650
Train	Maximum power (MW)	2.861	2.861	2.861
	Minimum voltage (V)	711.990	712.015	712.015
	Maximum rail potential (V)	74.312	74.354	74.354
	Maximum structure to earth voltage (V)	-	0.766	0.766
Sum energy at TSS (MW)		1053.414	1052.493	1052.493
Sum energy at train (MW)		1012.339	1011.410	1011.410
Sum energy less (MW)		82.233	82.249	82.249

จากการจำลองผลพบว่า มีศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางเป็น 74.31 V 74.35 V และ 74.35 V ตามลำดับ ซึ่งผ่านมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ นอกจากนี้แบบจำลอง TGM และ TGM_{@poles} ยังสามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าในโครงสร้างทางยกระดับได้ซึ่งมีค่าเป็น 0.766 V ทั้งสองแบบจำลอง

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟเดี่ยวที่นำเสนอถูกสร้างขึ้นและใช้งานได้ อย่างสมบูรณ์ในการจำลอง จากผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการประเมินศักย์ไฟฟ้าที่รางและแรงดันไฟฟ้าในโครงสร้าง ความต้องการกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กำลังงานสูญเสีย และแรงดันไฟฟ้าของรถไฟระหว่างการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาผลของการขับเคลื่อนเมื่อรถอยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ เพื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าของรางที่สาม ศักย์ไฟฟ้าที่ราง และแรงดันไฟฟ้าที่โครงสร้างตามแนวความยาวราง

4.4 สรุป

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟขบวนเดี่ยวที่นำเสนอถูกสร้างขึ้นและใช้งานได้ อย่างสมบูรณ์ในการจำลอง จากผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการประเมินศักย์ไฟฟ้าที่รางและแรงดันไฟฟ้าในโครงสร้าง ความต้องการกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กำลังงานสูญเสีย และแรงดันไฟฟ้าของรถไฟระหว่างการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาผลของการขับเคลื่อนเมื่อรถอยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ เพื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าของรางที่สาม ศักย์ไฟฟ้าที่ราง และแรงดันไฟฟ้าที่โครงสร้างตามแนวความยาวราง สำหรับการเปรียบเทียบการจำลองผลในกรณี OGM TGM และ TGM_{@poles} พบว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการใช้แบบจำลอง OGM เหมาะสำหรับการพิจารณาโดยทั่ว ๆ ไป และเมื่อต้องการพิจารณาแรงดันไฟฟ้าในโครงสร้างที่สถานีไฟฟ้าย่อยและรถไฟควรใช้แบบจำลอง TGM และ TGM_{@poles} นอกจากนี้เพื่อให้ง่ายแก่การจำลองผลควรใช้แบบจำลอง TGM แทนแบบจำลอง TGM_{@poles} ได้เช่นกัน แต่หากต้องการพิจารณาโครงสร้างทางยกระดับที่ละเอียดมากขึ้นควรใช้แบบจำลอง TGM_{@poles}

บทที่ 5

แบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับโครงสร้างยกระดับ

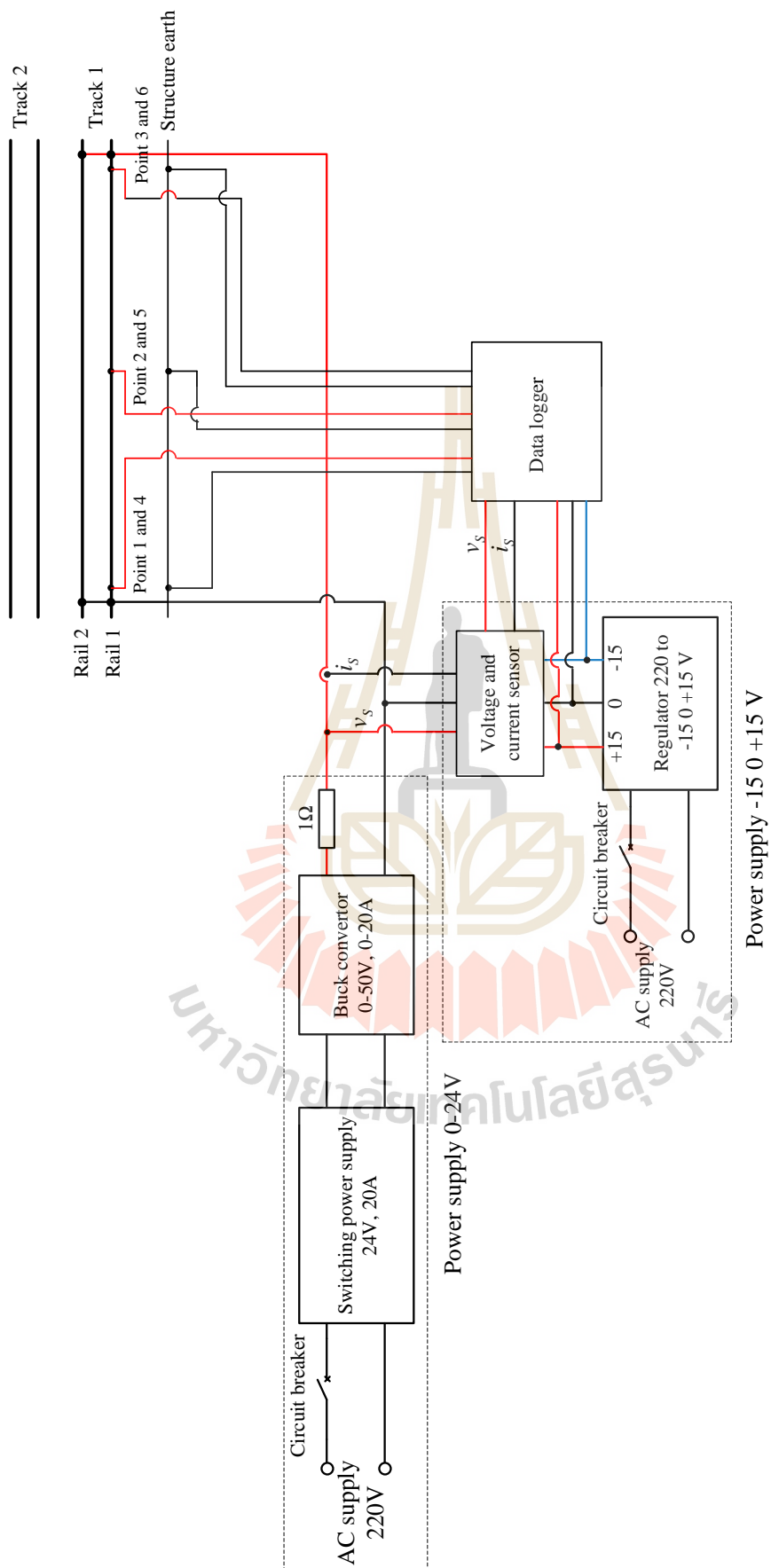
แบบทางเดียวย่อส่วน

5.1 บทนำ

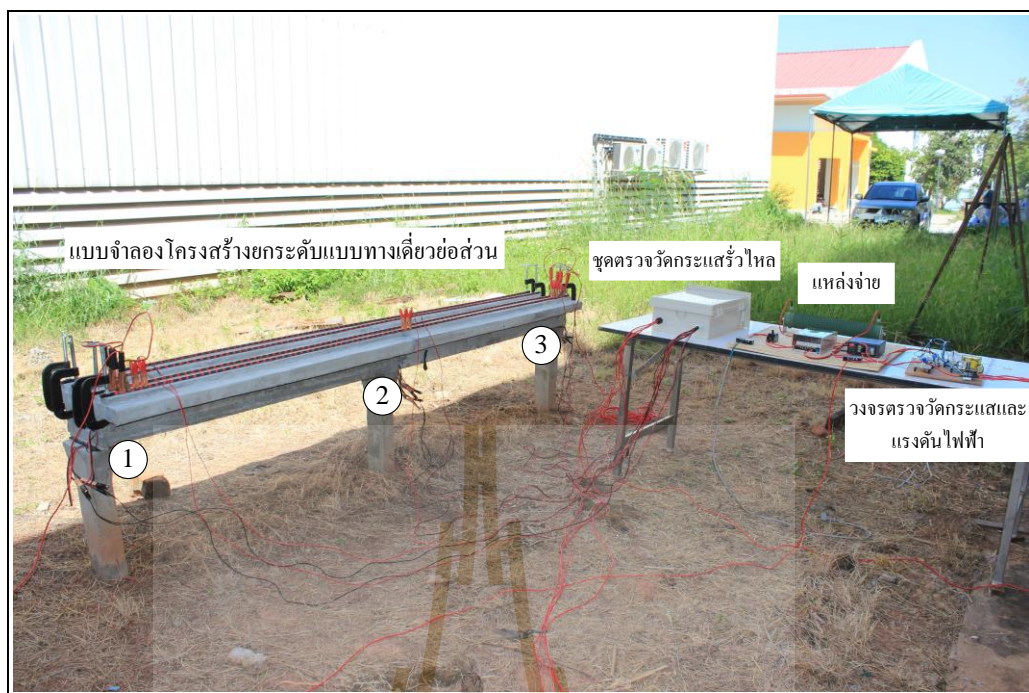
บทนี้ได้นำเสนอชุดทดสอบทางรถไฟที่เป็นโครงสร้างทางยกระดับแบบทางเดียวย่อส่วน สำหรับการทดสอบการตรวจวัดกระแสรั่วไหล เพื่อนำไปใช้สำหรับการพิจารณาเกี่ยวกับการตรวจวัดความต้านทานของรางวิ่งและความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว การตรวจวัดกระแสรั่วไหลในโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวย่อส่วนด้วยวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าที่รางในสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น ในสภาวะอากาศร้อน อากาศหนาว และฝนตก เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำไปใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองการต่อลงดินสำหรับ โครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวย่อส่วนแล้วทำการปรับปรุงแบบจำลองกระแสรั่วไหลดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.2 การประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวย่อส่วน

การประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางจำเป็นต้องทราบความต้านทานรางและความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวย่อส่วนเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการทดสอบการต่อลงดินของระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองการต่อลงดินสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวย่อส่วนในรูปของวงจรตัวต้านทานโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink ดังนั้นชุดทดสอบการตรวจวัดความต้านทานรางและความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวประกอบไปด้วย แบบจำลองโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวย่อส่วน แหล่งจ่าย วงจรตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า และ ชุดตรวจวัดกระแสรั่วไหลและเก็บข้อมูล สามารถแสดงแผนภาพชุดทดสอบในโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวย่อส่วนได้ดังรูปที่ 5.1 โดยรูปที่ 5.2 แสดงชุดทดสอบการตรวจวัดกระแสรั่วไหลในโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวย่อส่วนที่ได้สร้างขึ้น (รายละเอียดในแต่ละส่วนแสดงในภาคผนวก ก) คุณสมบัติของชุดทดสอบการตรวจวัดกระแสรั่วไหลในโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวย่อส่วนแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 และการตรวจวัดความต้านทานรางและความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวสามารถแสดงรายละเอียด ขั้นตอนการตรวจวัดและการคำนวณดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 วงจรการตรวจวัดกระแสรั่วไหล



รูปที่ 5.2 ชุดทดสอบการตรวจวัดกระแสรั่วไหลสำหรับ โครงสร้างยกระดับ
แบบทางเดี่ยวข้อส่วน

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลจำเพาะของชุดทดสอบการตรวจวัดกระแสรั่วไหลใน โครงสร้างยกระดับ
แบบทางเดี่ยวข้อส่วน

ขนาดของชุดทดสอบ	ขนาด		
กว้าง (cm), ยาว (cm), สูง (cm)	48, 140, 62.5		
แหล่งจ่ายสำหรับชุดทดสอบ	min	max	error
V_S (V)	0.00	24.00	± 0.1
I_S (A)	0.00	24.00	± 0.1
R_S (Ω)	0.90	1.10	± 0.1
L_{wire} (m)	14	16	± 1
แหล่งจ่ายสำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และ เครื่องมือวัด	min	max	error
V_{SS} (V)	14.90	15.10	-
$-V_{SS}$ (V)	-14.90	-15.10	-
I_{SS} (A)	0	1	-

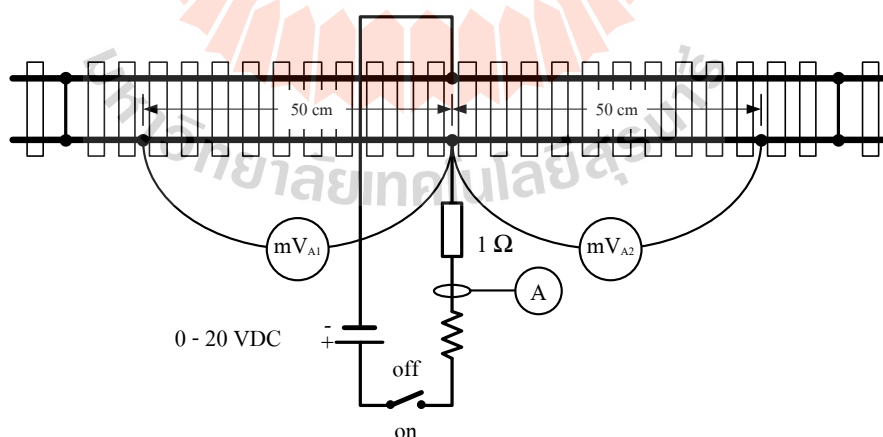
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลจำเพาะของชุดทดสอบการตรวจวัดกระแสรั่วไหลใน โครงสร้างยกระดับ
แบบทางเดี่ยวบางส่วน (ต่อ)

เครื่องมือวัดของแหล่งจ่าย	min	max	error
voltage measurement	-30	30	± 0.05
current measurement	-30	-30	± 0.10
เครื่องมือวัดของแหล่งจ่าย	min	max	error
- วงจรขยายสัญญาณแรงดัน (V)			
sensor 1, 2 and 3	-20	20	± 0.10
- วงจรลดทอนสัญญาณแรงดัน (V)			
sensor 1, 2, and 3	-250	250	± 10

5.2.1 ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางวิ่งของโครงสร้างยกระดับ

แบบทางเดี่ยวบางส่วน

การวัดความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางวิ่งตามมาตรฐาน EN 50122-2 สามารถประยุกต์ใช้กับชุดแหล่งจ่ายที่ได้ออกแบบไว้ในภาคผนวก ก แสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ทดสอบโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแล้ววัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่รางวิ่งดังแสดงในตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.3 การประยุกต์สำหรับการวัดความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางวิ่ง

ดัดแปลงจาก: EN 50122-2 (2010)

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบการวัดความต้านทานราง

แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	การวัดแรงดันไฟฟ้าระยะ 50 cm		ความต้านทานราง (mΩ/km)
		V_{R1} (mV)	V_{R2} (mV)	
5	2.97	1.861	1.894	2528.6
10	7.58	5.195	5.651	2861.7
15	11.78	8.284	8.995	2933.6
18	14.31	10.234	11.156	2989.5
ค่าเฉลี่ยของความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางวิ่ง				2828.35

จากผลการทดสอบสามารถคำนวณความต้านทานของรางวิ่งที่ระยะ 50 cm ที่พิกัดแรงดัน 10 V แสดงได้ดังสมการที่ (5.1)

$$R_{R50cm} = \frac{(5.159 - 0) + (5.651 - 0)}{7.58} = 1.4309 \text{ m}\Omega \quad (5.1)$$

และสามารถคำนวณความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางวิ่งได้ดังนี้

$$R_R = \frac{1.4309 \text{ m}\Omega}{50 \times 10^{-2}} = 2.8617 \text{ m}\Omega/\text{m} = 2861.7 \text{ m}\Omega/\text{km} \quad (5.2)$$

จากตารางที่ 5.2 จะพบว่าค่าเฉลี่ยของความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางวิ่งมีค่าเป็น 2.83 Ω/km โดยจะนำค่าไปใช้สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางและสร้างแบบจำลองกระแสรั่วไหลในโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวต่อไป

5.2.2 ความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยว

การวัดความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวจะใช้วิธีวัดความต้านทานระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างดังแสดงในตารางที่ 5.3 และความต้านทานระหว่างโครงสร้างคอนกรีตกับดินแสดงในตารางที่ 5.4 สามารถดูผลการทดสอบได้ในภาคผนวก ข. ในตารางที่ 5.3 จะแสดงผลการทดสอบการวัดเป็นสามช่วงเวลาโดยจะพิจารณาค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานบริเวณเสาแล้วนำมาใช้ในการคำนวณความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบการวัดความต้านทานระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างคอนกรีต

ปริมาณ	16/11/2561	15/12/2561	16/01/2562
ค่าความต้านทานบริเวณเสาที่ 1 (MΩ)	13.93	152.9	80.53
ค่าความต้านทานบริเวณเสาที่ 2 (MΩ)	11.80	169.4	111.2
ค่าความต้านทานบริเวณเสาที่ 3 (MΩ)	15.59	132.2	90.23
ค่าความต้านทานเฉลี่ย (MΩ)	13.77	151.5	93.99
ความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างคอนกรีต (μS/km)	25.936	2.357	3.800

จากผลการทดสอบสามารถคำนวณความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างคอนกรีตได้ดังสมการที่ (5.3)

$$G_{RS,2.8m} = \frac{1}{R_{RS} \times L} = \frac{1}{(13.77 \times 10^6 \Omega) \times (2.8 \times 10^{-3} \text{ km})} = 25.936 \mu\text{S/km} \quad (5.3)$$

จากตารางที่ 5.3 จะพบว่าค่าเฉลี่ยของความต้านทานต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างคอนกรีตมีค่าเป็น 25.936 μS/km 2.357 μS/km และ 3.800 μS/km สำหรับการวัดในวันที่ 16/11/2561 15/12/2561 และ 16/01/2562 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบการวัดความต้านทานระหว่างโครงสร้างคอนกรีตกับดิน

ปริมาณ	16/11/2561	15/12/2561	16/01/2562
ค่าความต้านทานบริเวณเสาที่ 1 (MΩ)	1.327	61.02	84.83
ค่าความต้านทานบริเวณเสาที่ 2 (MΩ)	1.291	65.87	100.6
ค่าความต้านทานบริเวณเสาที่ 3 (MΩ)	1.310	67.87	88.77
ค่าความต้านทานเฉลี่ย (MΩ)	1.309	64.92	91.40
ความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างคอนกรีต (μS/km)	272.767	5.501	3.907

จากผลการทดสอบสามารถคำนวณความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างโครงสร้างคอนกรีตกับดินได้ดังสมการที่ (5.1)

$$G_{SE,2.8m} = \frac{1}{(1.3091 \times 10^6 \Omega) \times (2.8 \times 10^{-3} \text{ km})} = 0.27281 \text{ mS/km} \quad (5.4)$$

จากตารางที่ 5.4 จะพบว่าค่าเฉลี่ยของความต้านทานต่อหน่วยต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างคอนกรีตมีค่าเป็น 272.767 $\mu\text{S/km}$ 5.501 $\mu\text{S/km}$ และ 3.907 $\mu\text{S/km}$ สำหรับการวัดในวันที่ 16/11/2561 15/12/2561 และ 16/01/2562 ตามลำดับ ดังนั้นความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างคอนกรีตและระหว่างโครงสร้างคอนกรีตกับดินจะเปลี่ยนตามสถานการณ์ของสภาพแวดล้อมนั้นๆ เช่น ฝนตก อากาศชื้น อากาศแห้ง เป็นต้น โดยนำค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งไปใช้สำหรับการประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางและสร้างแบบจำลองกระแสรั่วไหลในโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวต่อไป

5.2.3 การประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางของโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียว

การประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการการคำนวณอย่างง่ายในบทที่ 3 ในหัวข้อ 3.2.2 การประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางในกรณีจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวซึ่งจะใช้พารามิเตอร์ของค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางวิ่งในตารางที่ 5.2 และค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างคอนกรีตในตารางที่ 5.3 เท่านั้น เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างคอนกรีตมีผลกระทบโดยตรงต่อการประมาณศักย์ไฟฟ้าที่ราง เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเป็น 5 V 10 V 15 V และ 18 V ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางวิ่งเป็น 2.83 Ω/km และความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวเป็น 25.94 $\mu\text{S/km}$ ซึ่งวัดกระแสไฟฟ้าได้ 3.49 A 7.99 A 12.19 A และ 14.96 A ตามลำดับ (ข้อมูลจากตารางที่ ข.1 ในภาคผนวก ข.) ดังนั้นผลการประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางวิ่งของโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวเป็นส่วนเป็น 6.79 mV 15.66 mV 24.09 mV และ 29.61 mV ตามลำดับ

5.3 การตรวจวัดกระแสรั่วไหลในโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียว

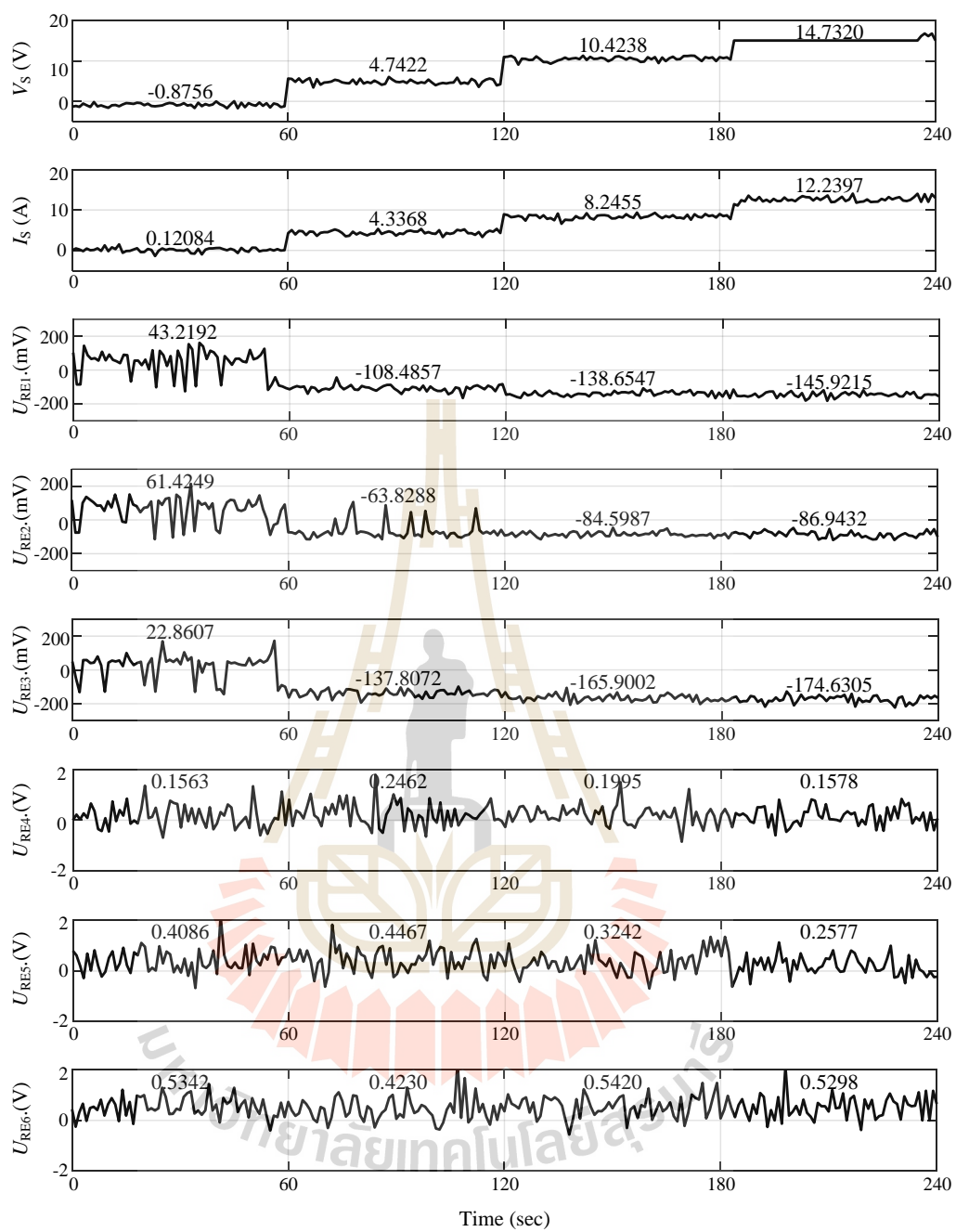
การทดสอบตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่รางเทียบโครงสร้างดินสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียว ส่วนชุดทดสอบนี้สามารถตรวจจับอุณหภูมิ ความชื้น แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย และแรงดันไฟฟ้าที่ราง เมื่อ U_{RE1} U_{RE2} และ U_{RE3} แสดงการวัดแรงดันระหว่างรางวิ่งกับดิน

ในกรณีที่มิ้ววงจรกรองสัญญาณรบกวนในจุดวัดที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ และ U_{RE4} U_{RE5} และ U_{RE6} แสดงการวัดแรงดันระหว่างรางวิ่งกับดินในกรณีที่ไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวนในจุดวัดที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ โดยมีการทดสอบดังต่อไปนี้

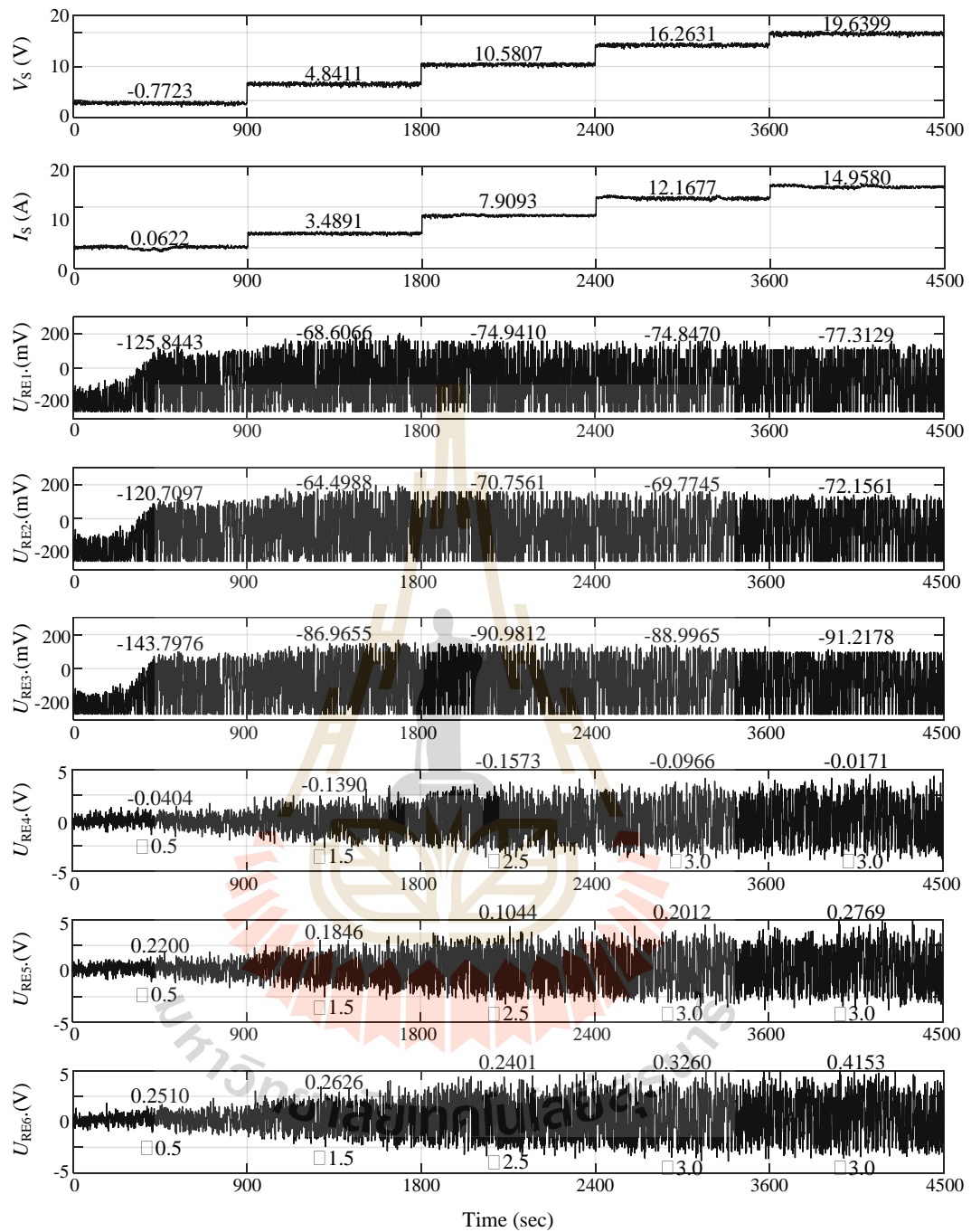
5.3.1 กรณีโหลดเปลี่ยนแปลง

การทดสอบในกรณีโหลดเปลี่ยนแปลงได้มีการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลด ทุก ๆ 1 นาติ โดยกำหนดพิกัดแรงดันไฟฟ้าเป็น 0 V 5 V 10 V 15 V และ 18 V ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงโหลดทุก ๆ 15 นาติโดยกำหนดพิกัดแรงดันไฟฟ้าเป็น 0 V 5 V 10 V 15 V และ 18 V ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 5.5 และการเปลี่ยนแปลงโหลดเมื่อกำหนดพิกัดแรงดันไฟฟ้าเป็น 0 V 20 V 5 V 15 V และ 10 V ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.6 (สามารถดูผลการทดสอบจริงได้ในภาคผนวก ข. ผลการทดสอบในวันที่ 1 พฤศจิกายน 16 พฤศจิกายน และ 14 ธันวาคม 2561)

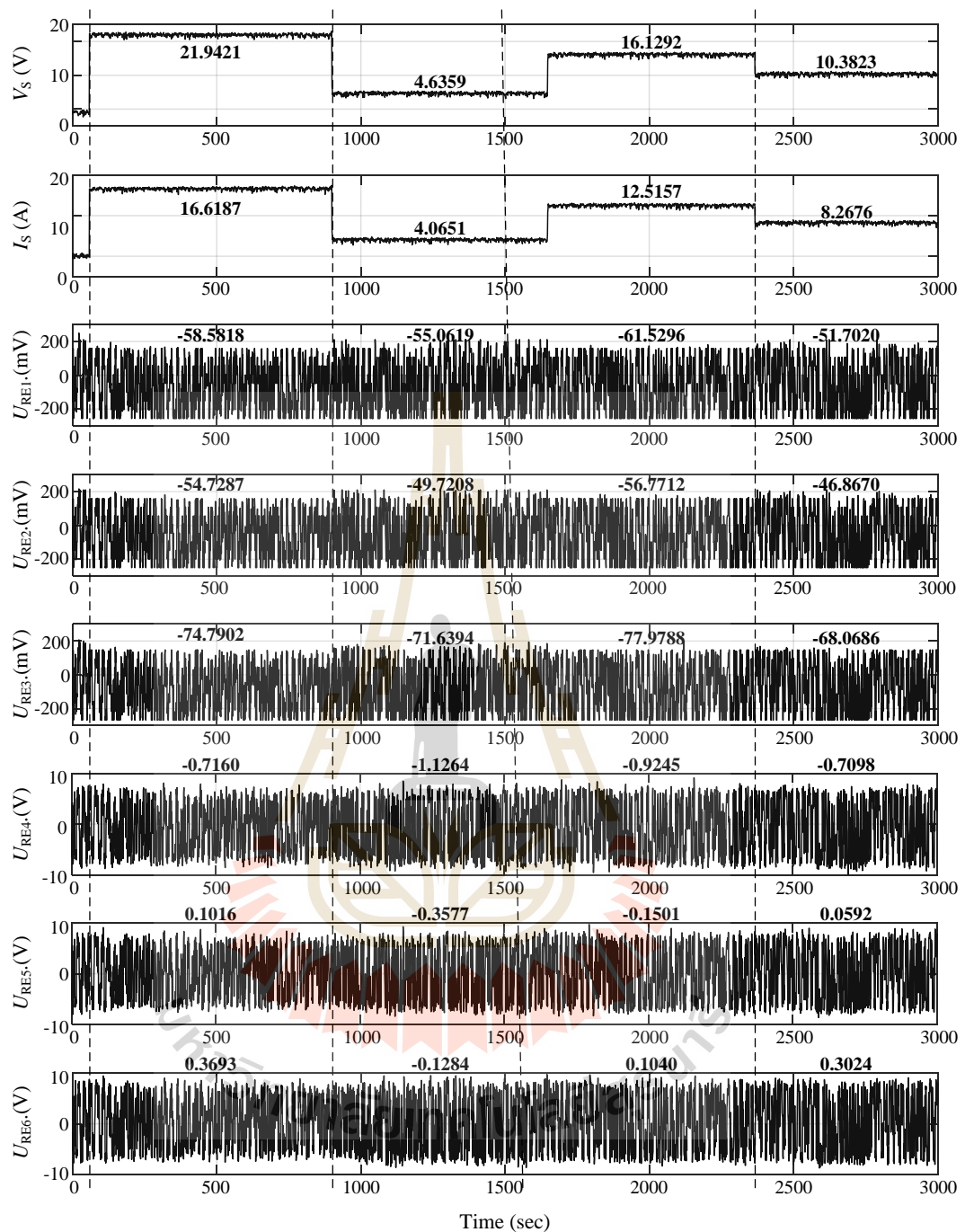




รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบวันที่ 1 พฤศจิกายน 2561



รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบวันที่ 16 พฤศจิกายน 2561



รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบวันที่ 14 ธันวาคม 2561

จากรูปที่ 5.4 ได้แสดงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายและแรงดันไฟฟ้าที่ราง U_{RE1} U_{RE2} U_{RE3} U_{RE4} U_{RE5} และ U_{RE6} ตามลำดับ จากกราฟแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายพบว่าค่าเฉลี่ยของแรงดันและกระแสไฟฟ้ามียค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าที่กำหนดไว้เนื่องจากความ

คลาดเคลื่อนมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่นำมาใช้งานตอนปรับค่าและตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กราฟแรงดันไฟฟ้าระหว่างวางไว้กับดินในกรณีที่มิวจรกรองสัญญาณรบกวนในจุดวัดที่ 1 2 และ 3 (U_{RE1} U_{RE2} และ U_{RE3}) มีลักษณะของรูปกราฟที่ใกล้เคียงกันและค่าเฉลี่ยของแรงดันในช่วงเวลานั้น ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจุดวัดทั้ง 3 เสมือนจุดเดียวกันเนื่องจากความต้านทานของเหล็กที่นำมาใช้เป็นรางมีความต้านทานต่ำรวมถึงระยะที่ใช้ในการตรวจวัดน้อยมาก โดยผลการวัดเป็นไปตามทฤษฎี นั่นคือ แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะเป็นลบ และกราฟแรงดันไฟฟ้าระหว่างวางไว้กับดินกรณีที่ไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวนในจุดวัดที่ 1 2 และ 3 (U_{RE4} U_{RE5} และ U_{RE6}) มีลักษณะของรูปกราฟที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของกราฟในอยู่ในช่วง - 0.5 V ถึง 2 V

จากรูปที่ 5.5 เมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 0 V 5 V 10 V 15 V และ 18 V ปริมาณของแรงดันไฟฟ้าระหว่างวางไว้กับดิน U_{RE4} U_{RE5} และ U_{RE6} มีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง ± 0.5 V ± 1.5 V ± 2.5 V ± 3.0 V และ ± 3.0 V ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงขึ้นและคงที่ในที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้าที่ราง U_{RE1} U_{RE2} และ U_{RE3} ก่อนจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีปริมาณสูงกว่าหลังจ่ายแรงดันไฟฟ้าแสดงว่าบริเวณทำการทดสอบมีกระแสรั่วไหลจากบริเวณใกล้เคียงเข้าสู่ชุดทดสอบ โครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยว ย่อส่วน ดังนั้นเมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ชุดทดสอบจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลด้านกระแสไฟฟ้าภายนอกจึงทำให้ค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้าที่รางในจุดวัดที่ 1 ก่อนจ่ายไฟมีค่าลดลงจาก -125.84 mV เป็น -68.61 mV -74.94 mV -74.85 mV และ -77.31 mV สำหรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด 5 V 10 V 15 V และ 18 V ตามลำดับ และยังพบว่าค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้าที่ราง U_{RE1} U_{RE2} และ U_{RE3} มีค่าคงที่รวมถึงศักย์ไฟฟ้าที่ราง U_{RE4} U_{RE5} และ U_{RE6} ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีกระแสรั่วไหลสะสมอยู่ในดินและไหลเข้าสู่ชุดทดสอบ

จากการทดลองเปลี่ยนแปลงโหลดพบว่า การทดสอบในวันที่ 1 พฤศจิกายน 2561 เป็นการทดสอบการจ่ายโหลดในระยะเวลาสั้น ๆ ในสภาพดินที่เปียกชื้นและไม่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอก (ช่วงปิดภาคการศึกษา) ทำให้เห็นความเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่รางได้อย่างชัดเจนเมื่อเปลี่ยนแปลง การทดสอบในวันที่ 16 พฤศจิกายน 2561 เป็นการทดสอบการจ่ายโหลดเป็นระยะเวลานานและมีสภาพแวดล้อมเช่นเดียวกับวันที่ 1 พฤศจิกายน 2561 พบว่าจะมีการสะสมของกระแสรั่วไหลดูได้จากกราฟของ U_{RE4} U_{RE5} และ U_{RE6} ในรูปที่ 5.5 และการทดสอบในวันที่ 14 ธันวาคม 2561 พบว่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง U_{RE4} U_{RE5} และ U_{RE6} ค่าคงที่และความต้านทานในดินสูงทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลลงสู่พื้นโลกได้รวมถึงสัญญาณรบกวนที่ได้รับจากภายนอก (ช่วงปิดภาคการศึกษา)

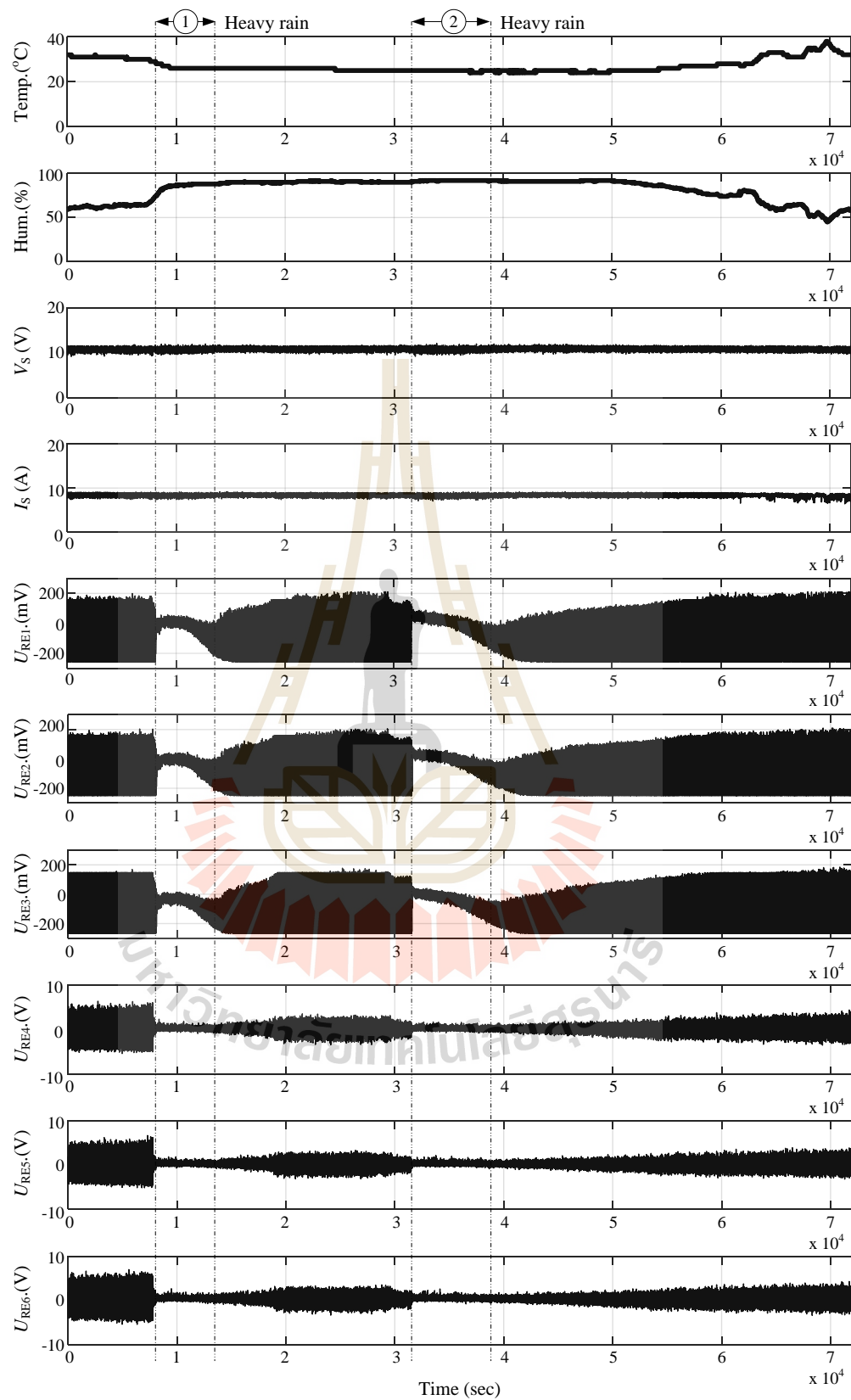
5.3.2 กรณีโหลดคงที่

การทดสอบตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่วางเทียบโครงสร้างดินในกรณี ที่สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาที่แตกต่างกันในเดือนพฤศจิกายน (ฝนตก) เดือนธันวาคม (อากาศเย็น) และเดือนมกราคม (อากาศร้อน) โดยกำหนดให้จ่ายไฟให้แก่ระบบคงที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 10 V ชุดทดสอบได้ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่วางในสภาวะฝนตก อากาศเย็น และอากาศร้อนดังรูปที่ 5.7 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ (สามารถดูผลการทดสอบจริงได้ในภาคผนวก ข.)

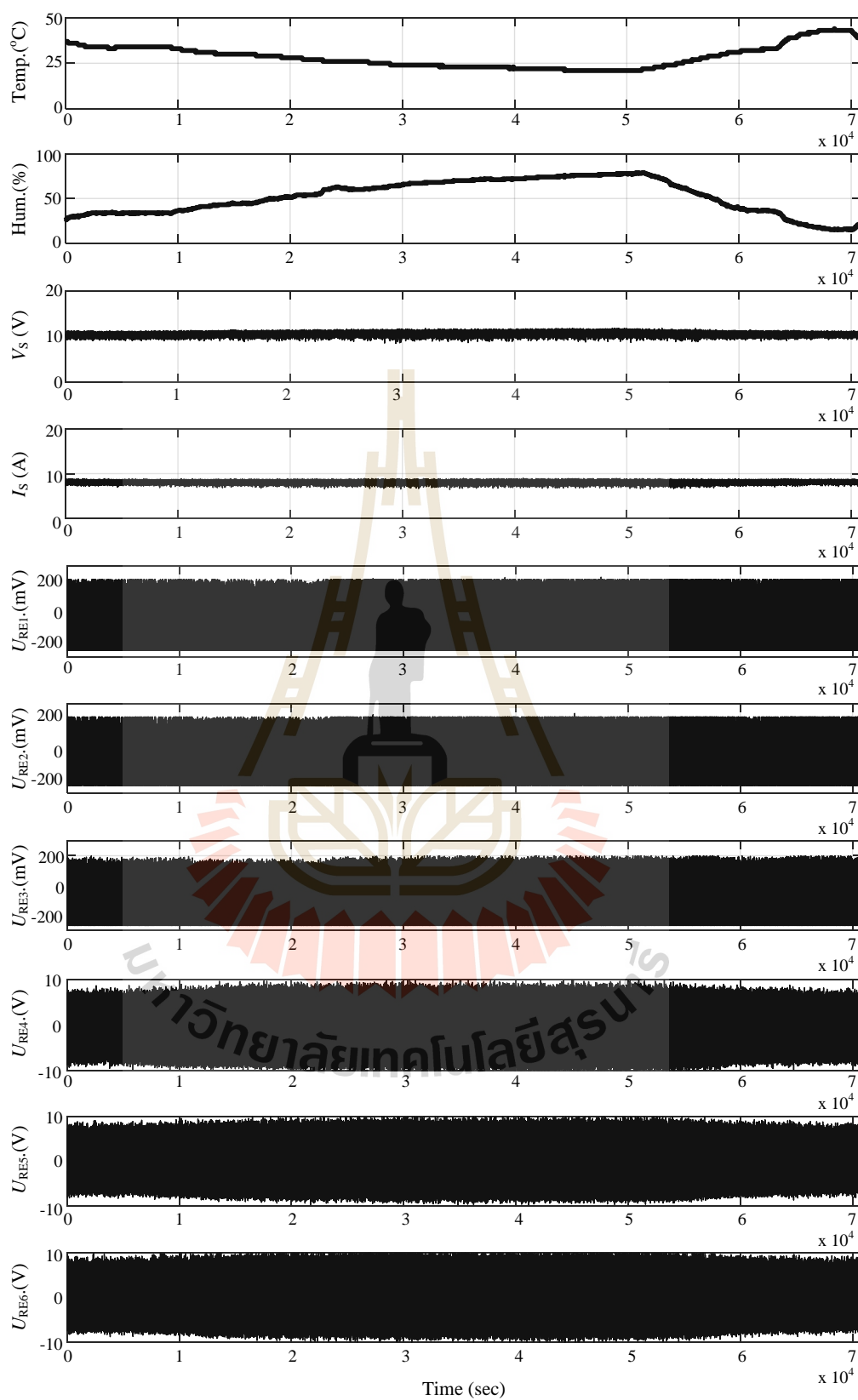
รูปที่ 5.7 เป็นผลการทดสอบในวันที่ 14-16 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2561 ตั้งแต่เวลา 14:00:00 - 13:59:59 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้แสดงอุณหภูมิ ความชื้น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าระหว่างวางวิ่งกับโครงสร้าง $U_{RE1} - U_{RE6}$ พบว่าเมื่อฝนตกหนักจะทำให้เกิดขนาดของแรงดันระหว่างวางวิ่งกับดินลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนในตำแหน่งที่ 1 และ 2 เนื่องจากน้ำฝนที่ทำให้ความเป็นฉนวนระหว่างวางวิ่งกับโครงสร้างลดลง (เสมือนสัมผัสกัน) เป็นผลให้ความต้านทานระหว่างวางวิ่งกับโครงสร้างทางยกระดับลดลง ส่วนรูปที่ 5.8 และ 5.9 เป็นผลการทดสอบในวันที่ 24 - 25 เดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 และ 15 - 16 เดือนมกราคม พ.ศ. 2562 ตามลำดับ

รูปที่ 5.7-5.9 สามารถเปรียบเทียบโดยการหาค่าเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงของแรงดันระหว่างวางวิ่งกับโครงสร้างได้ดังรูปที่ 5.10 จะพบว่าค่าเฉลี่ยของ U_{RE1} U_{RE2} และ U_{RE3} ของการทดสอบเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2561 ในขณะที่ฝนตกจะทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างวางวิ่งกับดินลดลงอย่างชัดเจนในช่วงเวลาที่ 1 และ 2 เมื่อเทียบกับเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 และเดือนมกราคม พ.ศ. 2562 สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 และเดือนมกราคม พ.ศ. 2562 แรงดันไฟฟ้าระหว่างวางวิ่งกับดินใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถดูได้จากแรงดันระหว่างวางวิ่งกับโครงสร้างโดยเฉลี่ยสำหรับจุดวัดที่ 1 ที่เวลา 20:00 น. เป็น -101.7944 mV -42.3475 mV และ -52.1046 mV ตามลำดับ

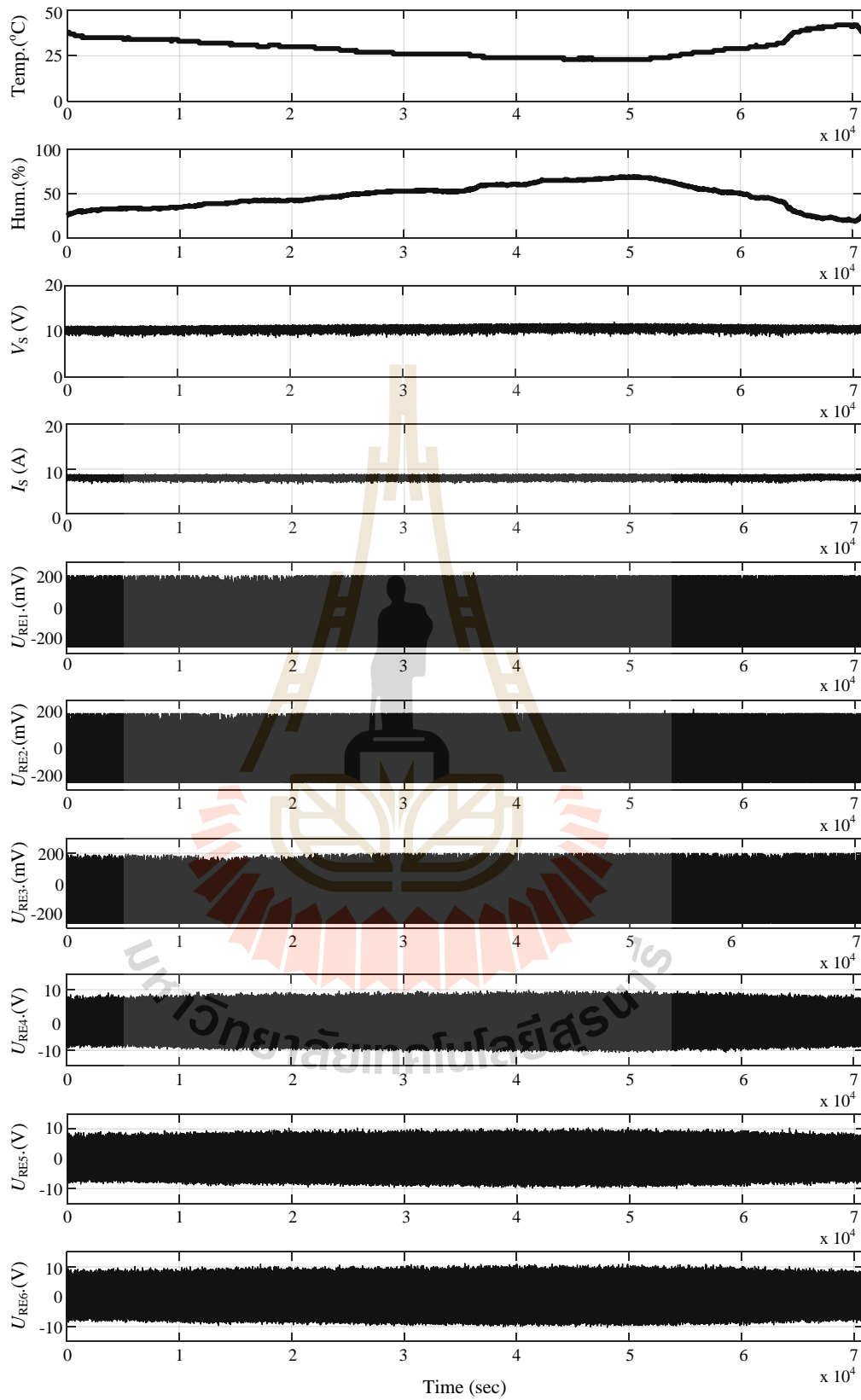
จากการทดสอบการวัดจริงทำให้เห็นได้ว่าสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างวางวิ่งกับดินโดยเฉพาะเวลาที่ฝนตก ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณาในช่วงนี้เพื่อป้องกันการออกแบบระบบป้องกันและอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ใช้บริการ ช่างซ่อมบำรุงและอุปกรณ์ต่างๆ ของรถไฟฟ้า ในหัวข้อถัดไปจะนำเสนอแบบจำลองการต่อลงดินสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วนเพื่อใช้ในการประเมินกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังได้สร้างชุดต้นแบบการตรวจจับกระแสรั่วไหลแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค. ซึ่งเป็นการวัดแรงดันไฟฟ้าที่วางผ่านระบบโครงข่าย LAN



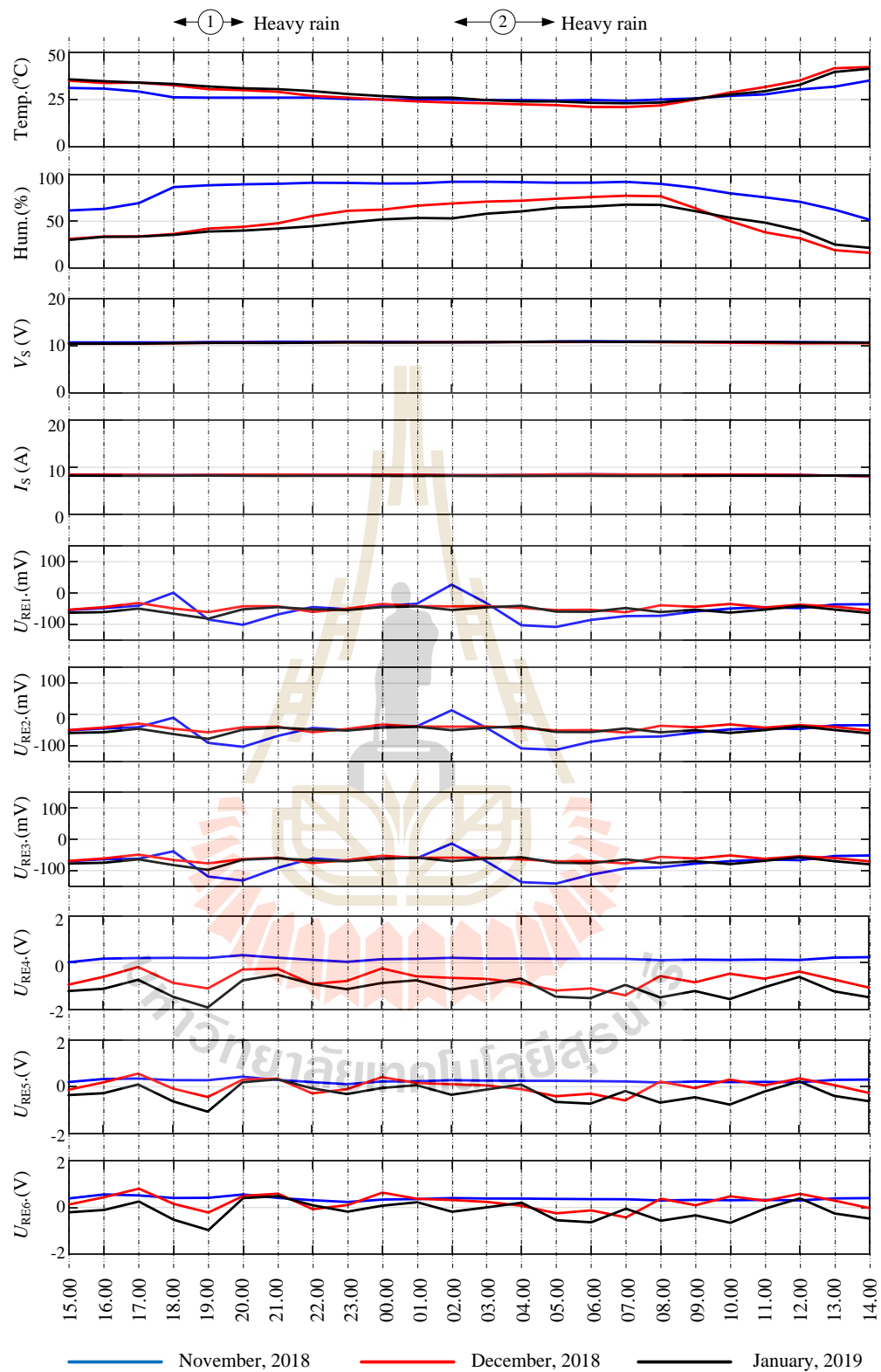
รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบในเดือนพฤศจิกายน (ฝนตก)



รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบในเดือนธันวาคม (อากาศหนาว)



รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบในเดือนมกราคม (อากาศร้อน)



รูปที่ 5.10 ค่าเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงของผลการทดสอบในเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม และมกราคม (อากาศร้อน)

5.4 แบบจำลองการต่อลงดินสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน

การต่อลงดินจากราววิ่งไปยังดินของระบบรถไฟกระแสตรง โดยกระแสย้อนกลับจะไหลไปยังราววิ่งเพื่อกลับไปยังสถานีกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนและที่ราววิ่งกับหมอนรองรางจะมีฉนวนกันเพื่อแยกวงจรออกจากกันแต่จะเกิดกระแสรั่วไหลผ่านคอนกรีต (อิเล็กโทรไลต์) ไปยังตัวนำภายในทางยกระดับและหลผ่านไปยังตัวนำภายในเสาโครงสร้าง แล้วไหลผ่านไปยังพื้นดิน ดังนั้นแบบจำลองการต่อลงดินทางไฟฟ้าสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วนที่ประกอบด้วย เสา ทางยกระดับ และราง แสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งอยู่รูปของตัวต้านทานที่ประกอบไปด้วยวัสดุต่าง ๆ เช่น เหล็กกลม (DB6 และ DB9) สายไฟเชื่อมต่อ คอนกรีต และดิน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.5)

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (5.5)$$

โดยที่ ρ คือ ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ

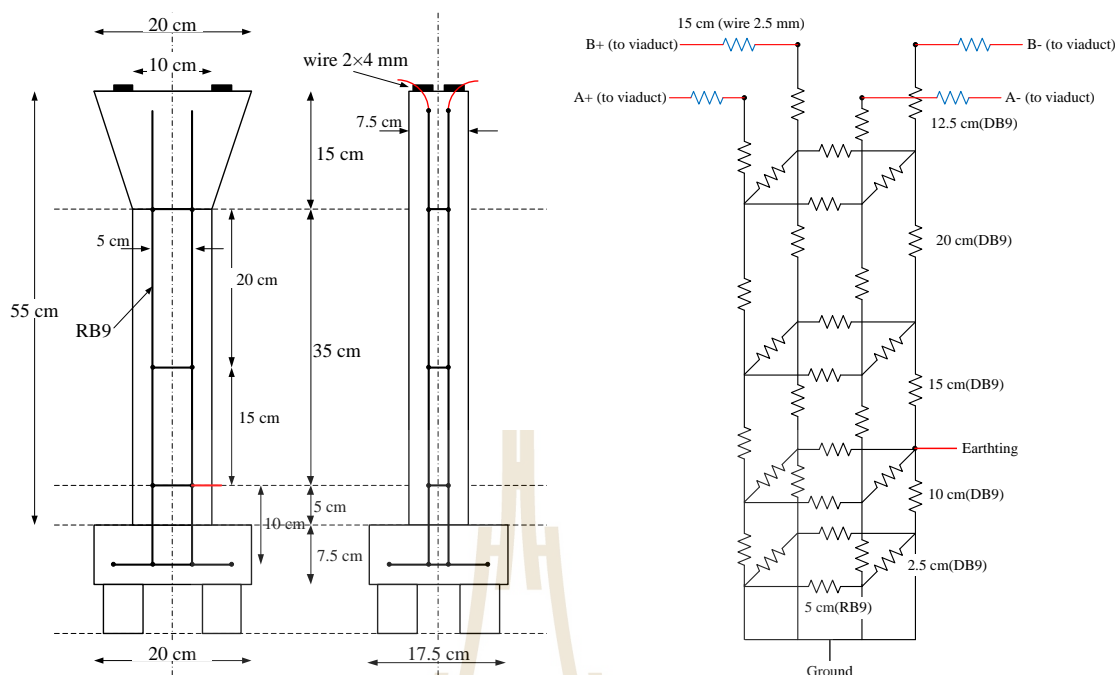
l คือ ความยาวของวัสดุ

A คือ พื้นที่ของวัสดุ

การพิจารณาแบบจำลองตัวต้านทานในสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วนจะพิจารณาแยกเป็นส่วนๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.4.1 แบบจำลองเสา

เสาโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วนเป็นดังรูปที่ 5.11 ก) และแบบจำลองตัวต้านทานของเสาโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วนแสดงดังรูปที่ 5.11 ข) โดยแบบจำลองตัวต้านทานของเสาส่วนใหญ่ใช้เหล็กกลม (RB9) ทั้งหมดและเชื่อมต่อไปยังทางยกระดับโดยใช้สายไฟขนาด 4 mm^2



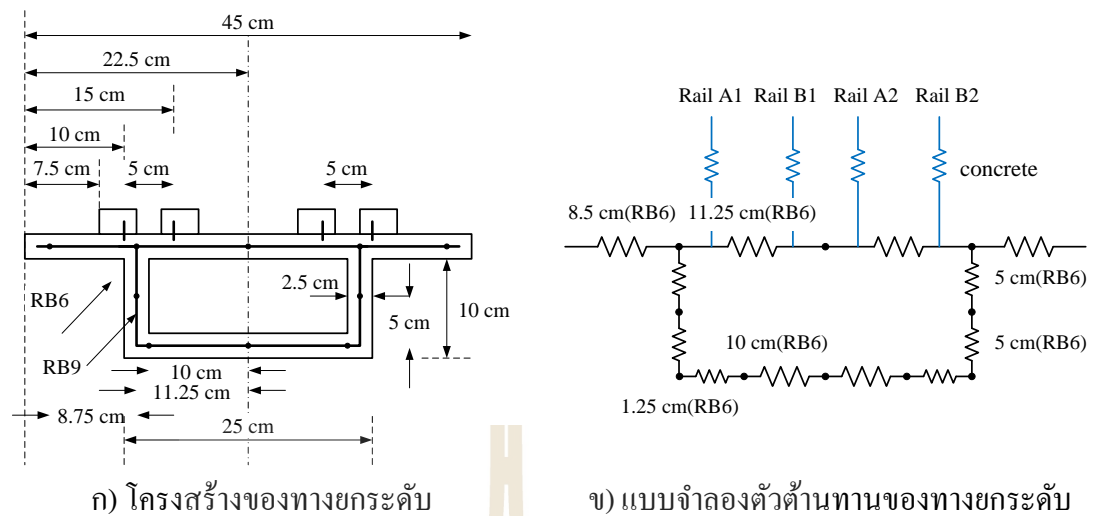
ก) โครงสร้างเสา

ข) แบบจำลองตัวต้านทานของเสา

รูปที่ 5.11 โครงสร้างและแบบจำลองตัวต้านทานสำหรับโครงสร้างยกระดับ
แบบทางเดี่ยวส่วน

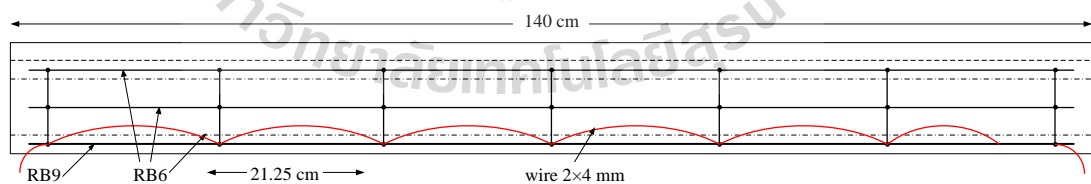
5.4.2 แบบจำลองทางยกระดับ

ทางยกระดับของ โครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวส่วนดังแสดงรูปที่ 5.12 ก) โดยส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กกลม (ยาวประมาณ 140 cm) โดยใช้สายไฟเชื่อมต่อขนาด 4 mm² ระหว่างทางยกระดับกับเสา ดังนั้นแบบจำลองตัวต้านทานของทางยกระดับสำหรับ โครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวส่วนในภาคตัดขวางแสดงดังรูปที่ 5.12 ข)

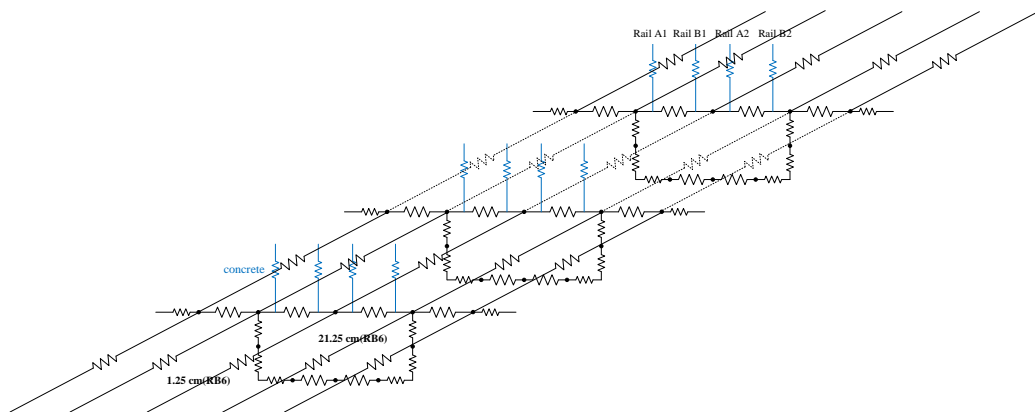


รูปที่ 5.12 แบบจำลองตัวต้านทานสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วน
ในภาคตัดขวาง

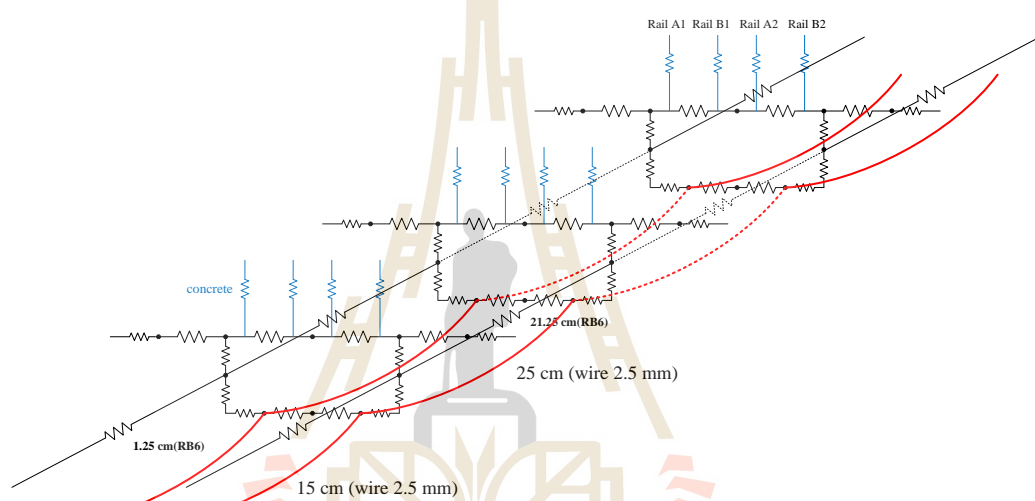
หลังจากสร้างแบบจำลองตัวต้านทานสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วนในภาคตัดขวางแล้วจะสร้างแบบจำลองเพื่อเชื่อมต่อโครงสร้างโลหะตามแนวความยาวดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยจะมีการเชื่อมต่อแบบจำลองตัวต้านทานในภาคตัดขวางทุก ๆ ระยะ 21.5 cm ซึ่งได้แสดงรายละเอียดในการเชื่อมต่อของเหล็กโครงสร้างเป็นสามส่วนดังแสดงในรูปที่ 5.14 แสดงแบบจำลองตัวต้านทานของทางยกระดับในส่วนล่าง ในส่วนกลางและสายเชื่อมต่อ และในส่วนบน ดังรูป 5.14 ก) ข) และ ค) ตามลำดับ



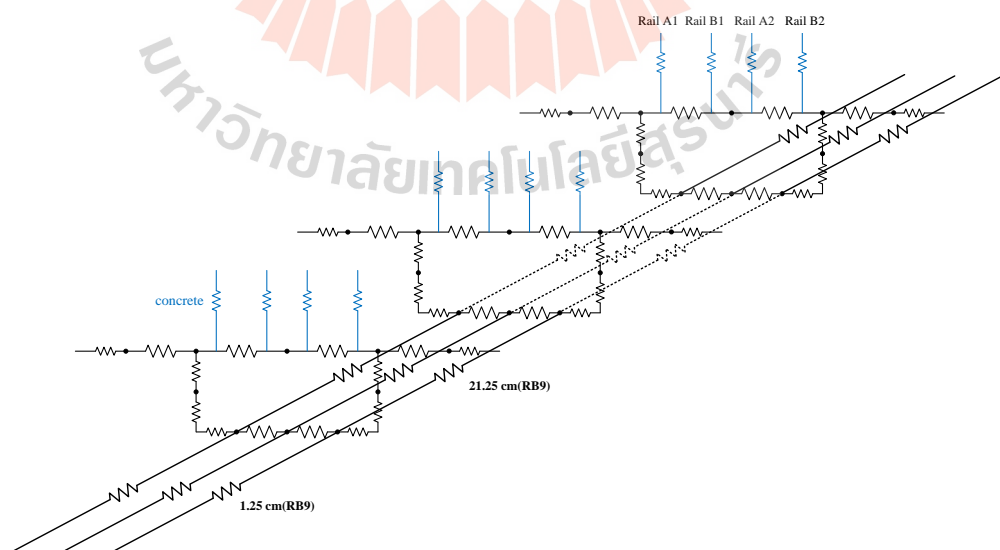
รูปที่ 5.13 โครงสร้างทางยกระดับเดี่ยวตามแนวความยาว



ก) แบบจำลองตัวต้านทานของทางยกระดับในส่วนล่าง



ข) แบบจำลองตัวต้านทานของทางยกระดับในส่วนกลางและสายเชื่อมต่อ

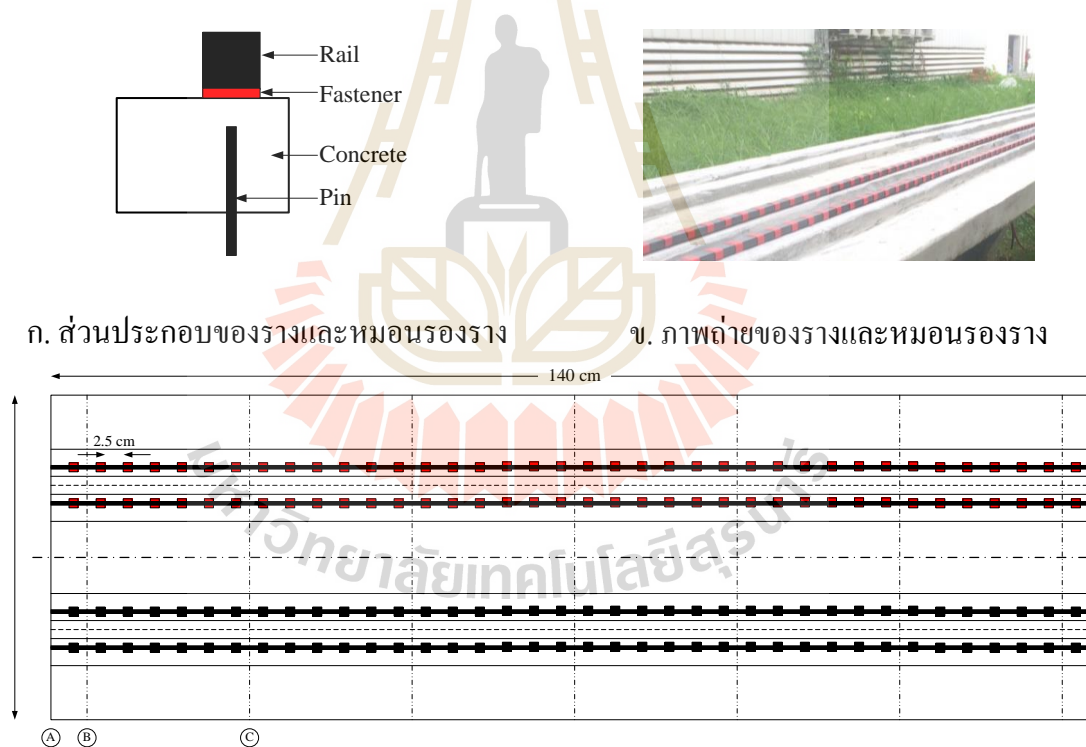


ค) แบบจำลองตัวต้านทานของทางยกระดับในส่วนบน

รูปที่ 5.14 แบบจำลองตัวต้านทานสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน

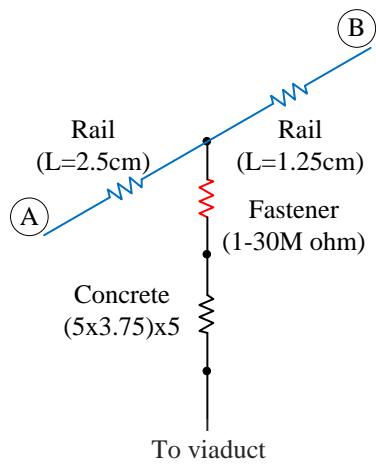
5.4.3 แบบจำลองทางวิ่ง

แบบจำลองทางวิ่งจะประกอบไปด้วยรางและฐานรองรางดังแสดงในรูปที่ 5.15 โดยที่รูปที่ 5.15 ก) แสดงส่วนประกอบของรางและหมอนรองราง รูปที่ 5.15 ค) แสดงตำแหน่งการยึดราง และในรูปที่ 5.15 ข) แสดงภาพถ่ายของรางและหมอนรองราง ในโครงสร้างรางและหมอนรองรางจะประกอบไปด้วยรางวิ่ง (1.5×1.5 cm) หนุนรองรางและคอนกรีต หมอนรองรางจะมีการยึดระหว่างหมอนคอนกรีตเป็นระยะ 2.5 cm และแบ่งแบบจำลองตัวด้านทานเป็น 8 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 5.15 ค) ดังนั้นสามารถแบบจำลองตัวด้านทานของรางและฐานรองรางได้ดังรูปที่ 5.16 โดยรูปที่ 5.16 ก) แสดงแบบจำลองตัวด้านทานของรางและฐานรองรางในส่วนที่ 1 (แบบจำลอง A-B) ในรูปที่ 5.16 ค) แสดงแบบจำลองตัวด้านทานของรางและฐานรองรางในส่วนที่ 2-7 (แบบจำลอง B-C) และในรูปที่ 5.16 ข) แสดงแบบจำลองตัวด้านทานของรางและฐานรองรางในส่วนที่ 8 (แบบจำลอง D-E)

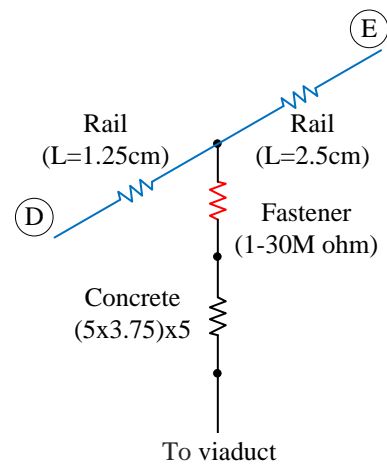


ค. ตำแหน่งการยึดรางรถไฟ

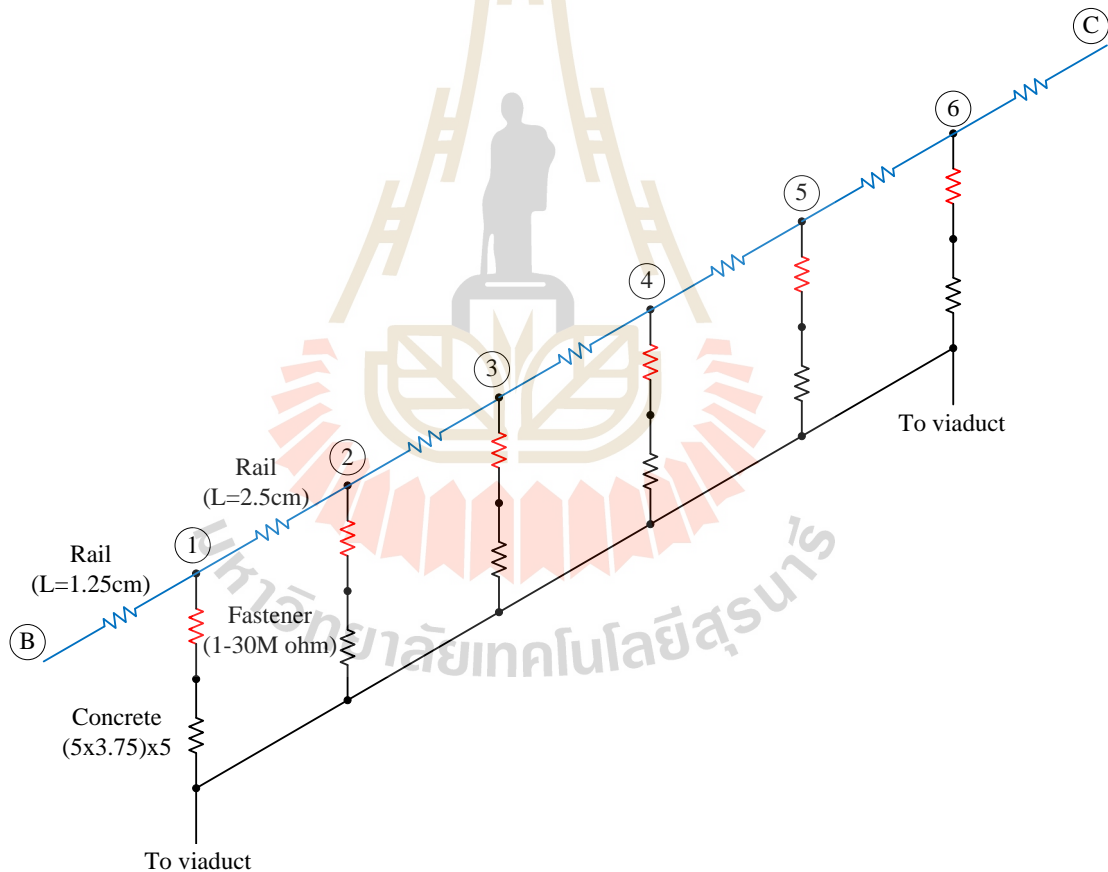
รูปที่ 5.15 ส่วนประกอบของทางวิ่งสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน



ก) แบบจำลอง A-B



ข) แบบจำลอง D-E

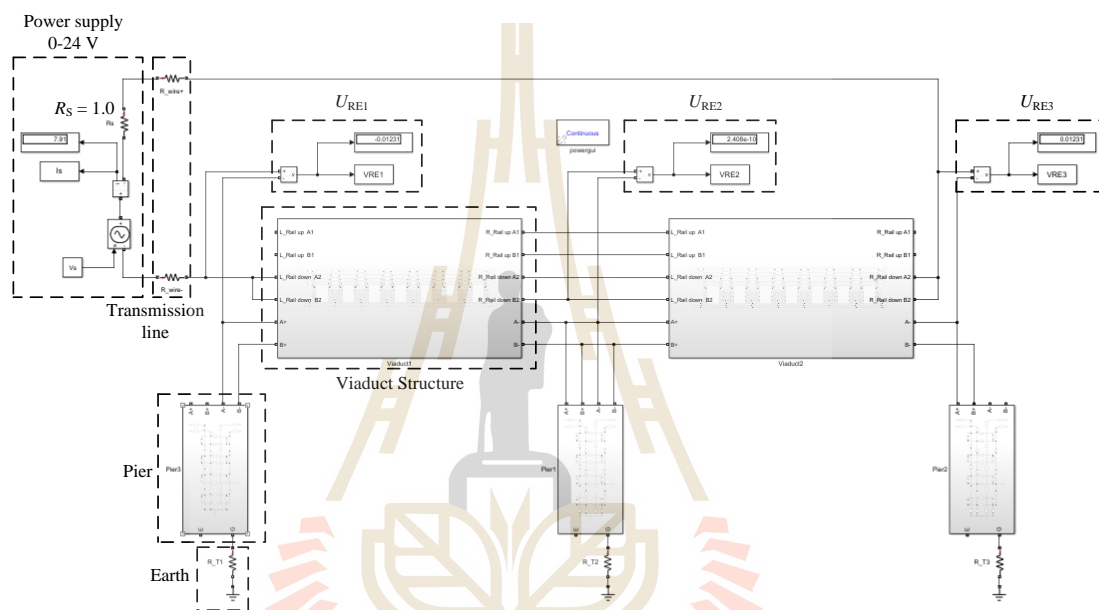


ค) แบบจำลอง B-C

รูปที่ 5.16 แบบจำลองตัวต้านทานของรางและฐานรองรางสำหรับโครงสร้างยกระดับ
แบบทางเดี่ยวย่อส่วน

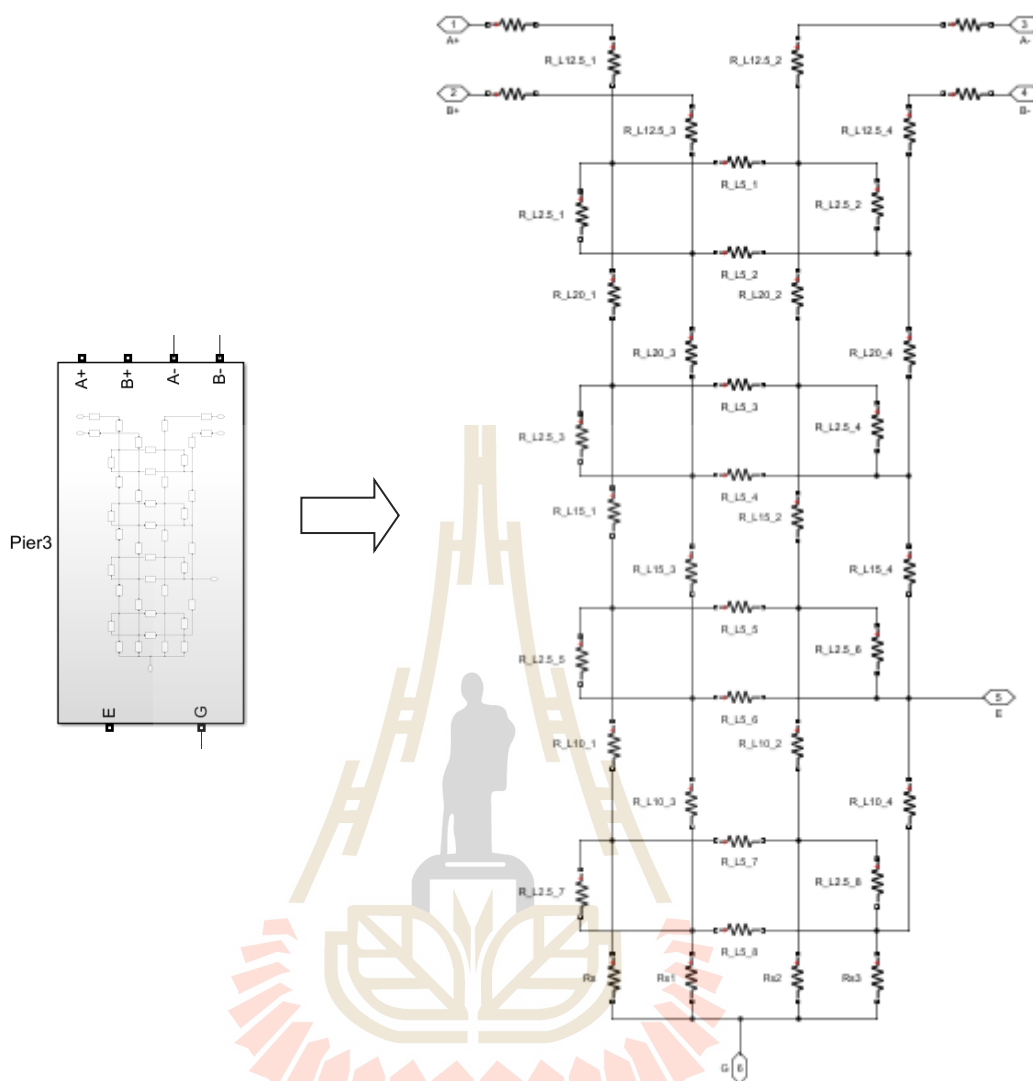
5.5 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน

หลังจากนั้นนำแบบจำลองตัวต้านทานทางไฟฟ้าในส่วนของเสา ทางยกระดับ และทางวิ่งที่กล่าวข้างต้นนำมาสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink ดังแสดงในรูปที่ 5.17 แบบจำลองจะใช้เวลา 2.8 เมตร (3 เสา 2 ช่วงของทางยกระดับ) ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่าย สายส่ง เสา ทางยกระดับ และการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ราง U_{RE1} U_{RE2} และ U_{RE3} สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

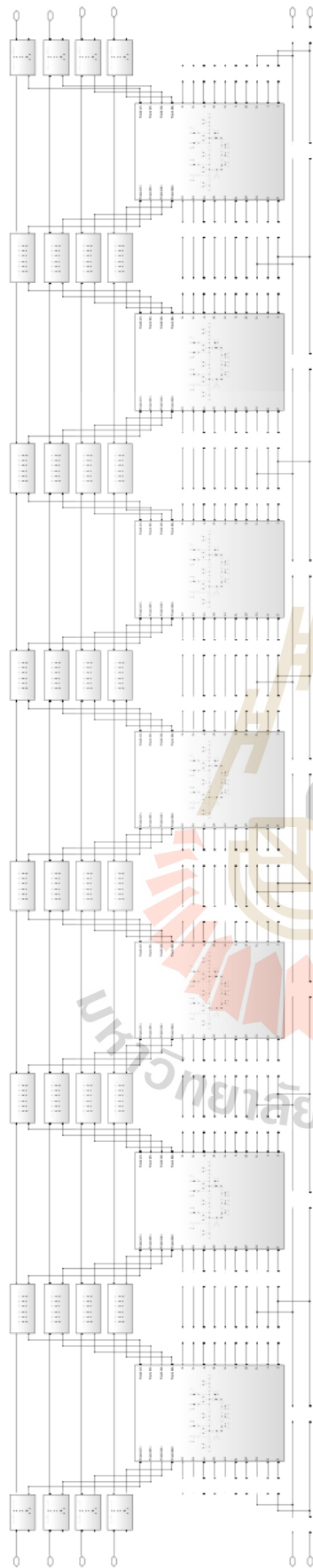


รูปที่ 5.17 แบบจำลองการต่อลงดินสำหรับสำหรับ โครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน

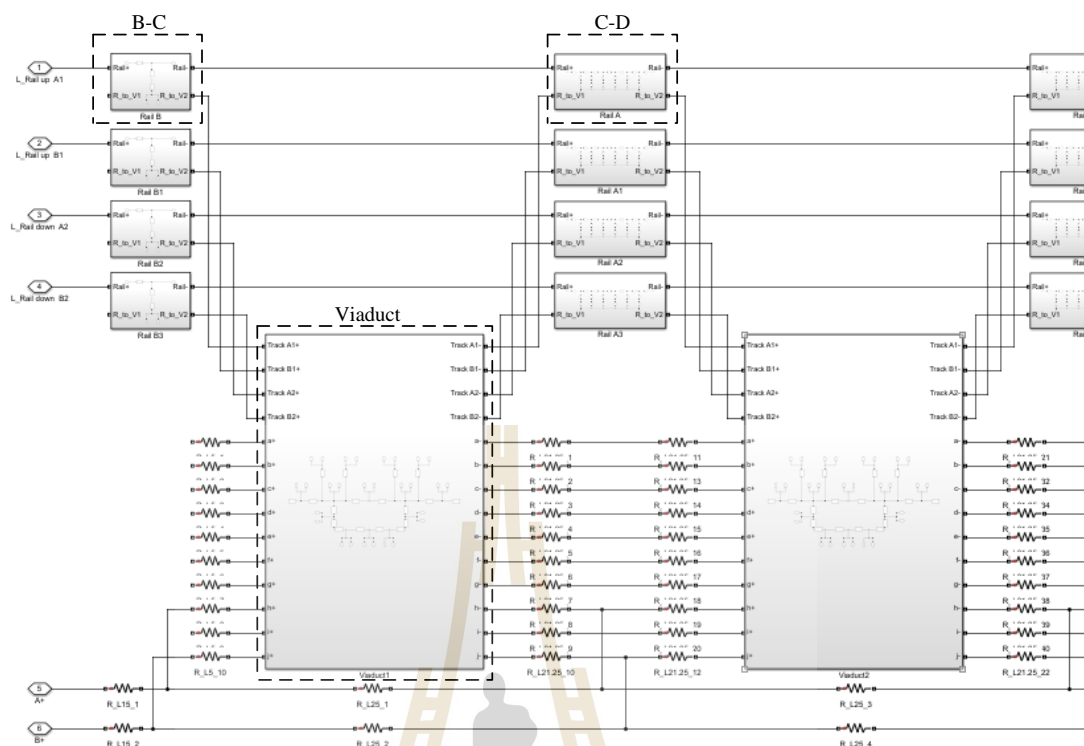
โดยแบบจำลองเสาในรูปที่ 5.17 สร้างมาจากแบบจำลองตัวต้านทานในรูปที่ 5.11 ข) และสามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink จากการจำลองโดยป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ 10 V พบว่าอ่านค่ากระแสไฟฟ้าได้ 8.1444 A และแรงดันระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างเป็น -1.23×10^{-2} 2.4076×10^{-10} และ 1.23×10^{-2} V สำหรับจุดตรวจวัดที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ภายในแบบจำลองของเสาแสดงได้รูปที่ 5.18 ส่วนแบบจำลองทางยกระดับและทางวิ่งในรูปที่ 5.17 โดยภายในแบบจำลองตัวต้านทานของเสาแสดงได้รูปที่ 5.19 ซึ่งสามารถขยายได้ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.18 แบบจำลองเสาสำหรับโครงสร้างระดับแบบทางเดี่ยวข้อส่วน
โดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink

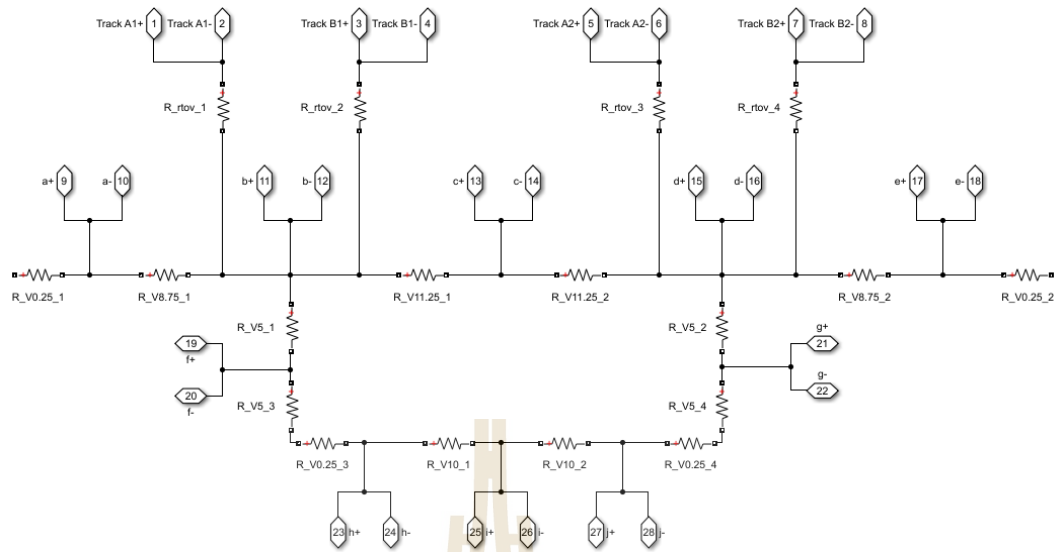


รูปที่ 5.19 แบบจำลองทางกระด้นและทางวิ่งสำหรับโครงสร้างระดับแบบทางเดียวส่วนโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink

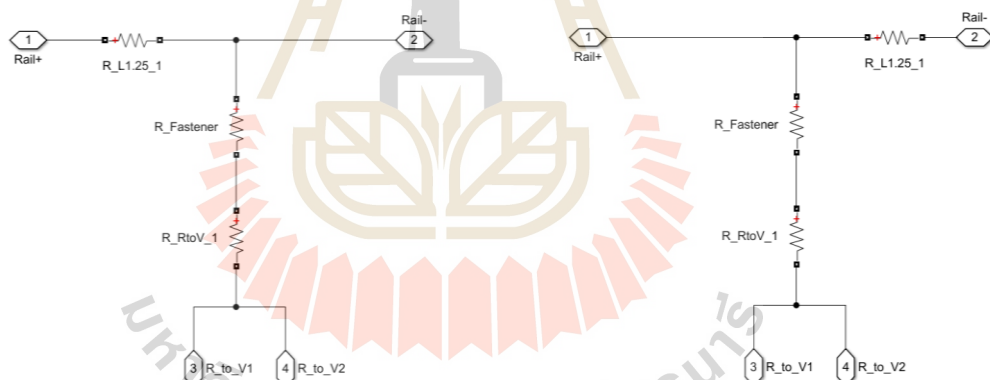


รูปที่ 5.20 รูปขยายของแบบจำลองทางยกระดับและทางวิ่งสำหรับโครงสร้างยกระดับ
แบบทางเดี่ยวย่อส่วนโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink

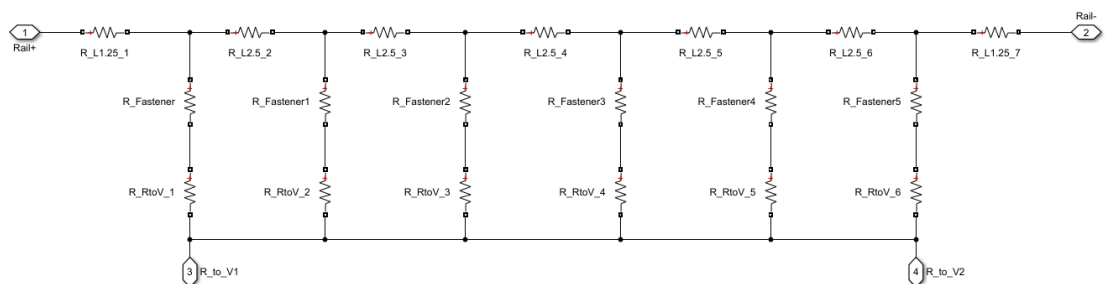
ในรูปที่ 5.20 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางยกระดับและทางวิ่งสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวจะประกอบไปด้วยแบบจำลองของทางยกระดับและแบบจำลองทางวิ่ง โดยที่มีแบบจำลองของทางยกระดับจำนวน 7 บล็อก ดังข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 5.13 และ 5.19 ดังนั้นในแบบจำลองของทางยกระดับจะแสดงได้ดังรูปที่ 5.21 ซึ่งได้จากแบบจำลองตัวด้านทานของทางยกระดับในรูปที่ 5.12 ข) และส่วนภายในของแบบจำลองทางวิ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.21 แบบจำลองทางขั้วสำหรับโครงสร้างขั้วแบบทางเดี่ยวย่อส่วน
โดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink



ก) แบบจำลอง B-C ข) แบบจำลอง B-C



ค) แบบจำลอง B-C

รูปที่ 5.22 แบบจำลองทางวิ่งสำหรับโครงสร้างขั้วแบบทางเดี่ยวย่อส่วน
โดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink

การจำลองผลจะป้อนพารามิเตอร์ค่าความต้านทานดินอ้างอิง $R_{E_ref} = 5.45 \, \Omega$ (จากการวัดในภาคผนวก ข.) สายไฟเชื่อมต่อ $R_{wire} = 7.98 \times 10^{-3} \, \Omega/km$ และสภาพความนำไฟฟ้าเหล็กกลม $\rho_{RB} = 1.75 \times 10^{-7} \, \Omega.m$ และคอนกรีต $\rho_{Concrete} = 100 \, \Omega.m$ (Petrica, 2015) สามารถจำลองผลการวัดแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 จุด คือ $-1.32 \times 10^{-2} \, V$ $2.59 \times 10^{-10} \, V$ และ $1.32 \times 10^{-2} \, V$ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งของรถไฟฟ้ากับการประมาณค่าพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนคิดเป็น 12.26 % 15.40 % 15.48 % และ 16.97 % สำหรับการทดสอบที่พิกัดแรงดัน 5 10 15 และ 18 V ตามลำดับ (โดยใช้ผลการทดสอบในวันที่ 1 พฤศจิกายน 2561) ดังแสดงในตารางที่ 5.5 ดังนั้นแบบจำลองการต่อลงดินสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวมีส่วนจำเป็นต้องทราบค่าที่แท้จริงของความต้านทานของราง สายไฟเชื่อมต่อ และสภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เช่น เหล็กกลม คอนกรีต และดิน

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่ากับการจำลองผลแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งก่อนปรับปรุง

แรงดันไฟฟ้า (V)	วิธีการ	การตรวจวัด		
		V_s (V)	I_s (A)	$U_{RE,max}$ (mV)
5	การคำนวณ	4.841	3.489	6.908
	การจำลองผล		3.496	6.061
	% ความคลาดเคลื่อน		2.016	12.262
10	การคำนวณ	10.581	7.909	15.659
	การจำลองผล		8.116	13.247
	% ความคลาดเคลื่อน		2.615	15.400
15	การคำนวณ	16.263	12.168	24.091
	การจำลองผล		12.689	20.361
	% ความคลาดเคลื่อน		4.280	15.482
18	การคำนวณ	19.640	14.958	29.614
	การจำลองผล		15.406	24.589
	% ความคลาดเคลื่อน		3.000	16.970

5.6 การปรับปรุงแบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียว

ย่อส่วน

การหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของแบบจำลองการต่อลงดินเพื่อใช้ในการประเมินกระแสรั่วไหลสำหรับระบบการต่อลงดินของโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวย่อส่วนได้แก่ความต้านทานของดินอ้างอิงและสายไฟเชื่อมต่อ และค่าสภาพความนำไฟฟ้าของเหล็กกลมและคอนกรีต การแก้ปัญหาเพื่อหาผลเฉลยของค่าพารามิเตอร์จะใช้ระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรมดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

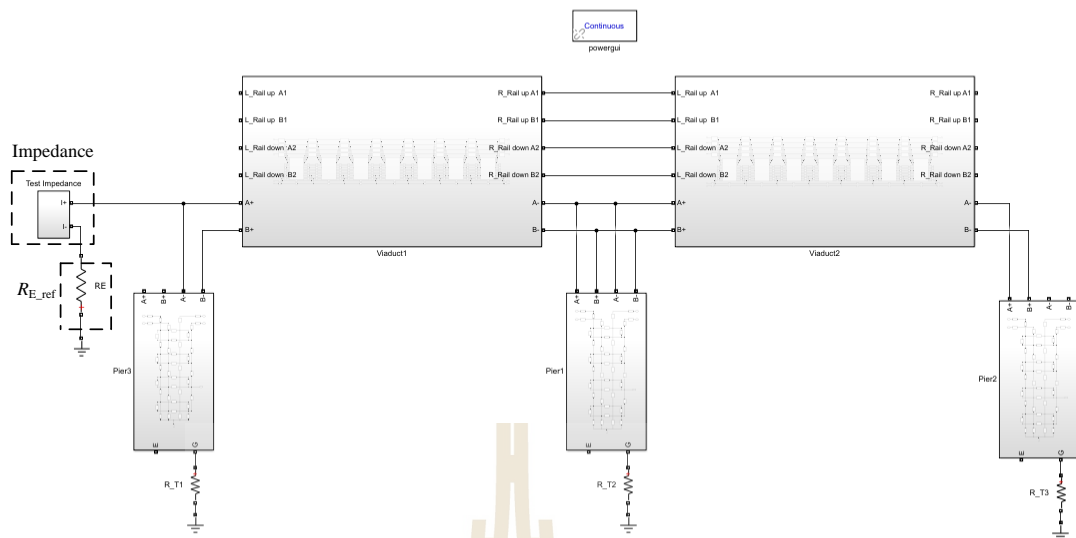
5.6.1 ระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรม

ระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) หรือที่เรียกโดยย่อว่า GA ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 60 โดยจำลองเอาแนวคิดของการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบชีววิทยามาใช้ในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ GA เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์ GA เป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่ามีวิวัฒนาการอยู่ในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบ และได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary computing) ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพ และมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

5.6.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ดำเนินการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้ MATLAB's GADS TOOLBOX เพื่อหาพารามิเตอร์ค่าความต้านทานของดินอ้างอิงและสายไฟเชื่อมต่อ และเหล็กกลมและคอนกรีต โดยการวัดค่าความต้านทานที่จุดต่างๆ เทียบกับดินสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวย่อส่วนจำนวน 3 จุดทดสอบดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.3

การจำลองการวัดในแบบจำลองตัวต้านทานที่สร้างขึ้นในโปรแกรม MATLAB & Simulink สำหรับเพื่อวัดค่าความต้านทานตามจุดต่างๆ เทียบกับดินให้สอดคล้องกับการวัดค่าความต้านทานเทียบกับดินสามารถจำลองผลได้ดังรูปที่ 5.23 ซึ่งเป็นการแสดงตัวอย่างการจำลองผลการวัดค่าความต้านทานเทียบกับดินโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink ที่ตำแหน่งจุดวัดที่ 1 โดยวัดระหว่างโครงสร้างโลหะเทียบกับดินอ้างอิง



รูปที่ 5.23 การจำลองผลการวัดค่าความต้านทานเทียบกับดินสำหรับโครงสร้างยกระดับ
แบบทางเดี่ยวส่วนที่ตำแหน่งจุดวัดที่ 1

ดังนั้นสามารถกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยต่อน้อยที่สุดเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ MATLAB's GADS TOOLBOX ดังสมการที่ (5.6) ซึ่งเป็นการหาค่าความแตกต่างระหว่างการวัดจริงและการจำลองผล

$$\text{minimize } f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Z_{\text{meas}}(i) - Z_{\text{sim}}(i)}{Z_{\text{meas}}(i)} \right| \quad (5.6)$$

โดยที่ i คือ ตำแหน่งของจุดวัดของค่าความต้านทาน
 n คือ จำนวนของจุดวัดของค่าความต้านทาน
 $Z_{\text{sim}}(i)$ คือ ค่าความต้านทานจากทางยกระดับไปยังดินที่ได้จากการจำลองผลจุดที่ i
 $Z_{\text{meas}}(i)$ คือ ค่าความต้านทานจากทางยกระดับไปยังดินที่ได้จากการวัดจุดที่ i

5.6.3 การจำลองผล

การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการที่ (5.6) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของค่าความต้านทานของดินอ้างอิงและสายไฟตัวนำ และค่าสภาพความนำไฟฟ้าของเหล็กกล่มและคอนกรีต ซึ่งสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS ได้ดังตารางที่ 5.6 การกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์จะใช้วิธีการกำหนดความต้านทาน

ของดินอ้างอิงอยู่ที่ 0.01Ω ถึง 15Ω (ดูได้จากการวัดความต้านดินในภาคผนวก ข.) ค่าความต้านทานของสายเชื่อมต่อ ค่าสภาพความนำไฟฟ้าของเหล็กกลม จะคิดที่ $\pm 10\%$ ของค่าพิกัด และค่าสภาพความนำไฟฟ้าของคอนกรีตจะอยู่ในช่วง $30 - 150 \Omega.m$ (Petrica, 2015)

ตารางที่ 5.6 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX

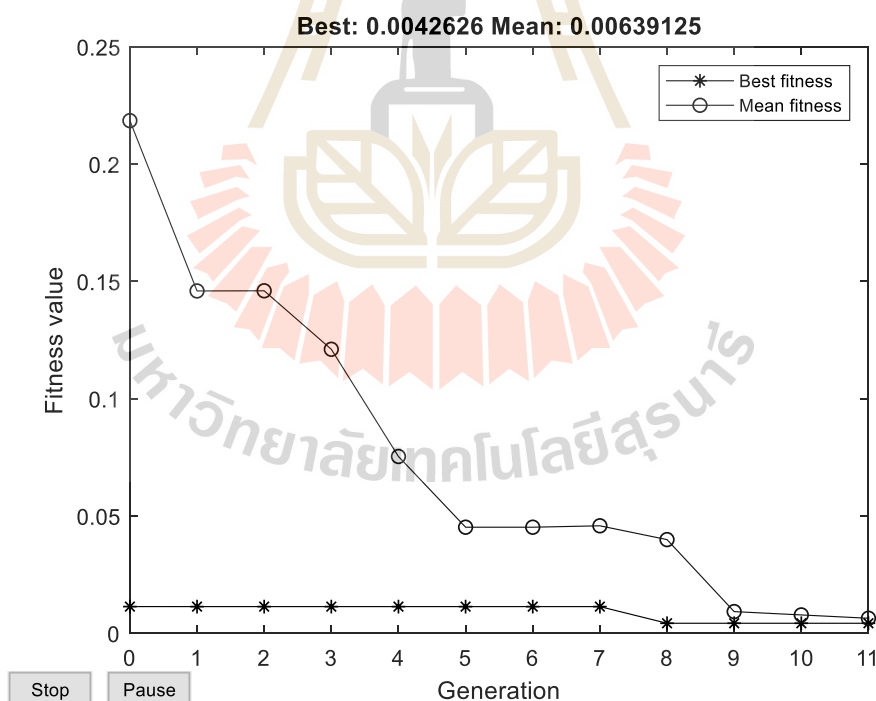
พารามิเตอร์	ปริมาณของพารามิเตอร์
Total Generation	200
Stall Generation Limit	20
TolFun	1×10^{-2}
Population Size	20
Population Range $R_{E_ref} (\Omega)$	$[0.01 \times 5.45 \quad 1.1 \times 7.50]$
Population Range $R_{wire} (\Omega/km)$	$[0.9 \times 7.98 \times 10^{-3} \quad 1.1 \times 7.98 \times 10^{-3}]$
Population Range $\rho_{RB} (\Omega.m)$	$[0.9 \times 1.75 \times 10^{-7} \quad 1.1 \times 1.75 \times 10^{-7}]$
Population Range $\rho_{Concrete} (\Omega.m)$	$[30 \quad 150]$

การจำลองผลหาพารามิเตอร์โดยใช้วิธี GA จำนวน 10 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 5.7 ซึ่งให้ผลเฉลี่ยดีที่สุดให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับ 4.26×10^{-3} หรือคิดเป็นความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย 0.43 % โดยมีค่าพารามิเตอร์ของความต้านทานดินอ้างอิง $R_{E_ref} = 4.92 \Omega$ สายไฟเชื่อมต่อ $R_{wire} = 7.21 \times 10^{-3} \Omega/km$ และสภาพความนำไฟฟ้าเหล็กกลม $\rho_{RB} = 1.75 \times 10^{-7} \Omega.m$ และคอนกรีต $\rho_{Concrete} = 100 \Omega.m$ และแสดงการดูเข้าหาคำตอบดังรูปที่ 5.24

จากการป้อนพารามิเตอร์ความต้านทานดินอ้างอิง $R_{E_ref} = 4.92 \Omega$ สายไฟเชื่อมต่อ $R_{wire} = 7.21 \times 10^{-3} \Omega/km$ และสภาพความนำไฟฟ้าเหล็กกลม $\rho_{RB} = 1.75 \times 10^{-7} \Omega.m$ และคอนกรีต $\rho_{Concrete} = 100 \Omega.m$ สามารถจำลองผลการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดินทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ $-1.48 \times 10^{-2} V$ $1.72 \times 10^{-10} V$ และ $1.48 \times 10^{-2} V$ ตามลำดับ สำหรับพิกัดแรงดัน 10 V เมื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้าง (ที่ตำแหน่งรถ) กับการประมาณค่าพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนคิดเป็น 2.04% 5.54% 5.63 % และ 7.29 % สำหรับพิกัดแรงดันไฟฟ้า 5 V 10 V 15 V และ 18 V ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.7 การหาค่าพารามิเตอร์สำหรับโครงสร้างกระดับแบบทางเดี่ยวข้อด้วยวิธี GA

No.	$R_{E_ref} (\Omega)$	$R_{wire} (\Omega/km)$	$\rho_{RB} (\Omega.m)$	$\rho_{Concrete} (\Omega.m)$	Fval
1	6.00	7.98×10^{-3}	1.75×10^{-7}	116.40	1.41×10^{-2}
2	5.00	7.31×10^{-3}	1.63×10^{-7}	57.88	1.41×10^{-2}
3	4.98	7.98×10^{-3}	1.75×10^{-7}	100.00	1.20×10^{-2}
4	5.00	7.31×10^{-3}	1.63×10^{-7}	57.88	1.41×10^{-2}
5	4.93	7.53×10^{-3}	1.69×10^{-7}	58.47	4.81×10^{-3}
6	4.93	7.98×10^{-3}	1.77×10^{-7}	37.56	5.06×10^{-3}
7	4.92	7.21×10^{-3}	1.75×10^{-7}	100.00	4.26×10^{-3}
8	4.96	7.67×10^{-3}	1.69×10^{-7}	99.38	9.23×10^{-3}
9	4.97	7.30×10^{-3}	1.60×10^{-7}	34.42	1.01×10^{-2}
10	4.92	7.27×10^{-3}	1.71×10^{-7}	50.02	4.67×10^{-3}



รูปที่ 5.24 การหาค่าคำตอบสำหรับโครงสร้างกระดับแบบทางเดี่ยวข้อด้วยวิธี GA

ตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบการคำนวณกับการจำลองผลแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งหลังปรับปรุง

แรงดันไฟฟ้า (V)	วิธีการ	การตรวจวัด		
		V_s (V)	I_s (A)	$U_{RE,max}$ (mV)
5	การคำนวณ	4.841	3.489	6.908
	การจำลองผล		3.569	6.767
	% ความคลาดเคลื่อน			4.14
10	การคำนวณ	10.581	7.909	15.659
	การจำลองผล		8.275	14.791
	% ความคลาดเคลื่อน			4.63
15	การคำนวณ	16.263	12.168	24.091
	การจำลองผล		12.933	22.734
	% ความคลาดเคลื่อน			6.29
18	การคำนวณ	19.640	14.958	29.614
	การจำลองผล		15.702	27.454
	% ความคลาดเคลื่อน			4.98

จากการปรับปรุงแบบจำลองการต่อลงดินของโครงสร้างระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วนแล้ว พบว่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดินสูงสุดเป็น 7.29 % หรือมีค่าประมาณ 2 mV ซึ่งถือว่ายอมรับได้เพราะมีค่าน้อยมากและอาจเกิดขึ้นได้จากการวัดโดยเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่แล้ว รวมถึงสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น อุณหภูมิและความชื้น ดังนั้นแนวคิดของแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้กับระบบรถไฟฟ้างานจริงได้

5.7 สรุป

การเปลี่ยนแปลงโหลดโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าในระยะเวลาสั้น ๆ ในสภาพดินที่เปียกชื้น และไม่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอกทำให้เห็นการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่รางได้อย่างชัดเจน การจ่ายโหลดเป็นระยะเวลานานจะทำให้เกิดการสะสมของกระแสรั่วไหลได้ และการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่มีความต้านทานในดินสูงเป็นผลให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลลงสู่พื้นโลกได้ซึ่งทำให้เกิดการสะสมของกระแสรั่วไหลในดิน นอกจากนี้สภาพแวดล้อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดิน โดยเฉพาะเวลาที่ฝนตก ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณา

ในช่วงนี้เพื่อออกแบบระบบป้องกันและอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ใช้บริการ ช่างซ่อมบำรุงและอุปกรณ์ต่าง ๆ ของรถไฟฟ้า

การสร้างและปรับปรุงแบบจำลองการต่อลงดินของโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยว ย่อส่วนสามารถนำมาใช้สำหรับการศึกษาและประเมินกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงได้เนื่องจากผลความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดินต่ำกว่า 10% หรือมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 2 mV ซึ่งถือว่ายอมรับได้เพราะมีปริมาณที่น้อยมากและอาจเกิดขึ้นได้จากการวัดโดยเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่แล้ว รวมถึงสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น อุณหภูมิและความชื้น



บทที่ 6

แบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วงเหนือ)

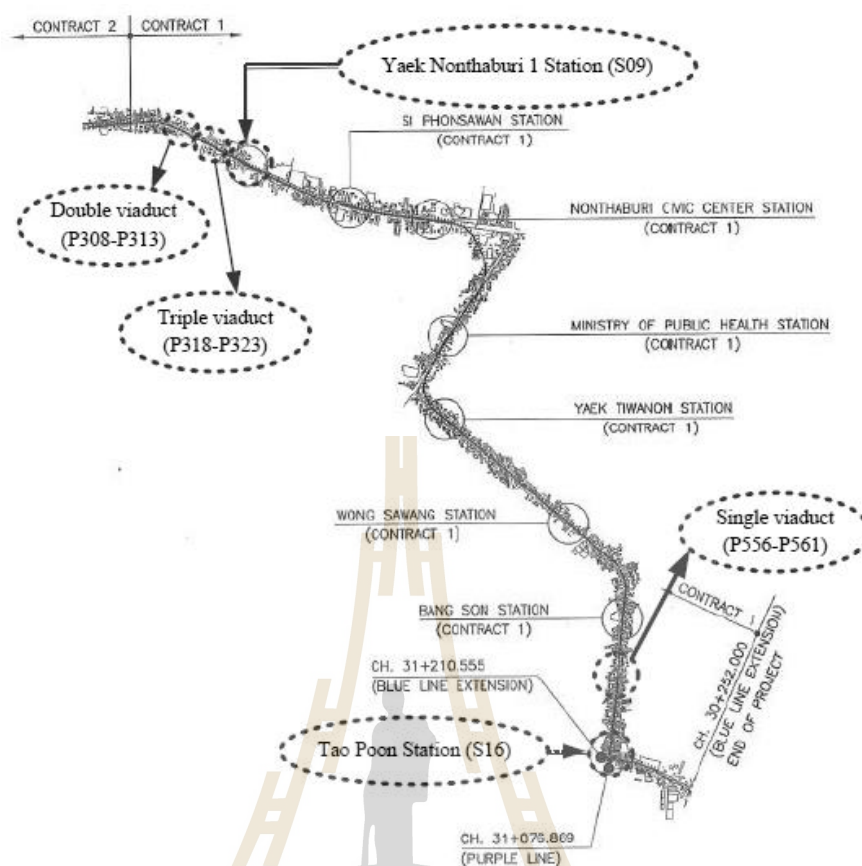
6.1 บทนำ

จากหลักการสร้างแบบจำลองการต่อลงดินของโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วนได้นำมาประยุกต์ใช้กับระบบโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วงเหนือ) เพื่อการประเมินกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นตามมาตรฐาน EN 50122 โดยมีขั้นตอนได้แก่ แบบจำลองการต่อลงดินสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการต่อลงดินการประเมินกระแสรั่วไหลในระบบโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วงเหนือ) และผลกระทบของฉนวนรอง (fastener) ต่อกระแสรั่วไหล โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

6.2 แบบจำลองการต่อลงดินสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

ในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน สายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วงเหนือ) หรือเรียกว่ารถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) จากสถานีคลองบางโพงไปยังสถานีเตาปูนเป็นระยะทางทั้งสิ้นประมาณ 23 km จำนวน 16 สถานีผู้โดยสาร ซึ่งประกอบไปด้วยระบบต่อลงดินที่สถานีแยกนนทบุรี (S09) สถานีเตาปูน (S16) ทางยกระดับชนิดเดี่ยว (single viaduct) ทางยกระดับชนิดคู่ (double viaduct) และ ทางยกระดับชนิด 3 ชุด (triple viaduct) ดังแสดงในรูปที่ 6.1 สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาการต่อลงดินเฉพาะ โครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยว แผนภาพภาคตัดขวางของโครงสร้างเสา และทางยกระดับแสดงไว้ในรูปที่ 6.2 แสดงการต่อลงดินทางไฟฟ้าในโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยว

การสร้างแบบจำลองการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีม่วง (เหนือ) ได้ใช้หลักการสร้างแบบจำลองการต่อลงดินของโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วนในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.5 แบบจำลองการต่อลงดินสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ประกอบด้วยเสา ทางยกระดับ และรางแสดงดังรูปที่ 6.2 ซึ่งได้แสดงขนาดและข้อมูลของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างยกระดับซึ่งประกอบไปด้วยเหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) เหล็กข้ออ้อย (DB25 และ DB12) คอนกรีต และวัสดุอื่น ๆ



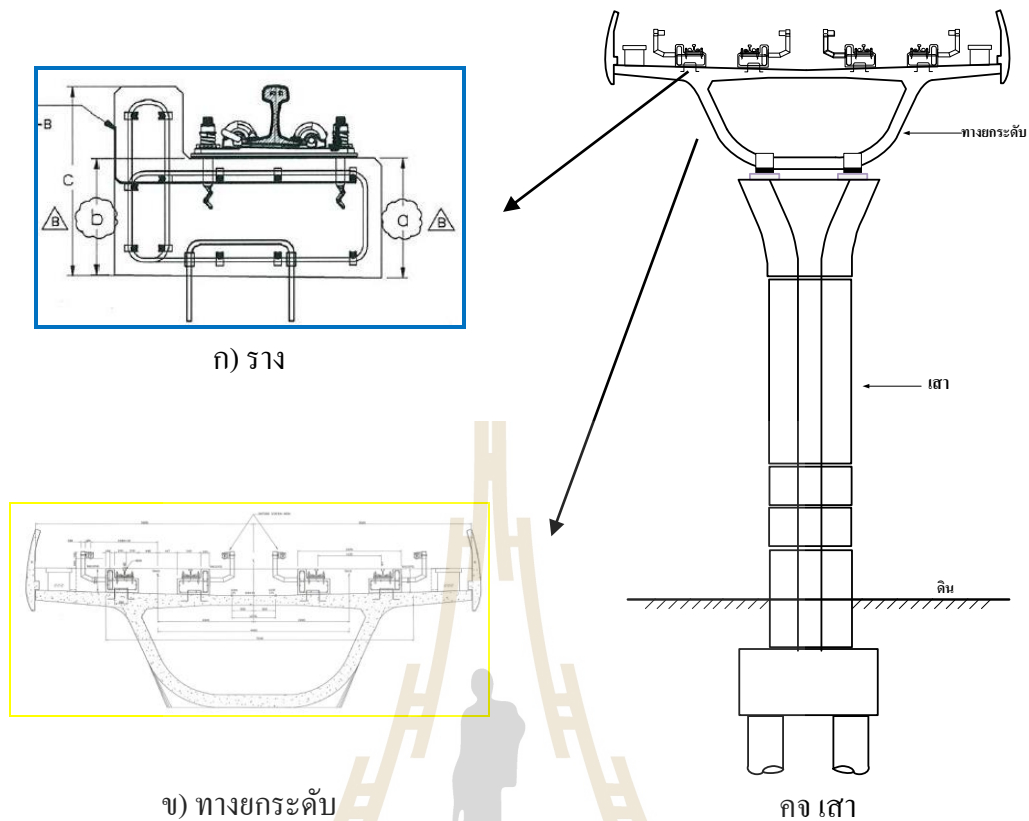
รูปที่ 6.1 โครงสร้างทางยกระดับในโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

ที่มา: ธนัชชัย กุลวรรณพงษ์, 2557

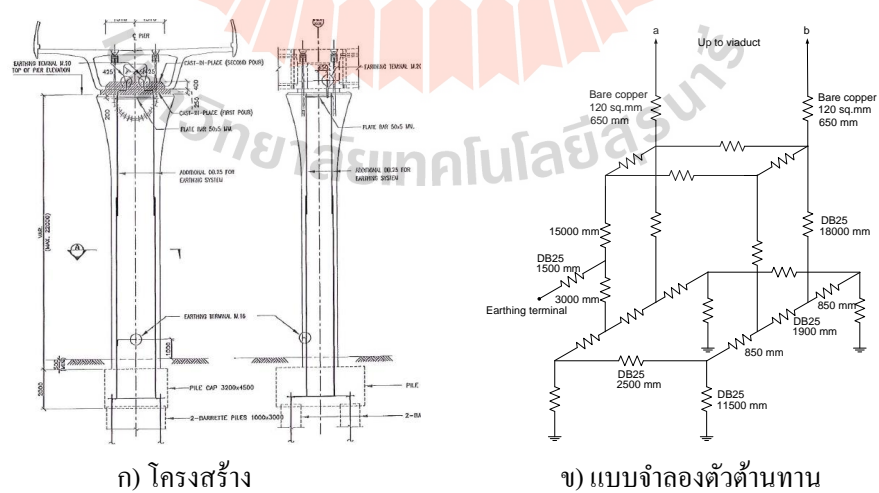
การพิจารณาแบบจำลองการต่อลงดินโดยใช้โครงข่ายตัวด้านทานซึ่งประกอบไปด้วย โครงสร้างเสา ทางยกระดับ และรางวิ่งจะเป็นตามกฎของโอห์มดังแสดงในสมการที่ (5.6) โดย สมมุติว่าข้อมูลและรายละเอียดต่างๆ ของโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวจะถือว่าใช้รูปแบบ เดียวกันทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.2.1 แบบจำลองเสาสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

เสาโครงสร้างของทางยกระดับเดียวเป็นดังรูปที่ 6.3 ก) และแบบจำลองตัว ด้านทานของเสาโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวแสดงดังรูปที่ 6.3 ข) โดยที่แบบจำลองตัวด้านทาน ส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กข้ออ้อย (DB25) และสายทองแดงเชื่อมต่อไปยังทางยกระดับ



รูปที่ 6.2 โครงสร้างโดยรวมของทางยกระดับแบบทางเดียวสำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

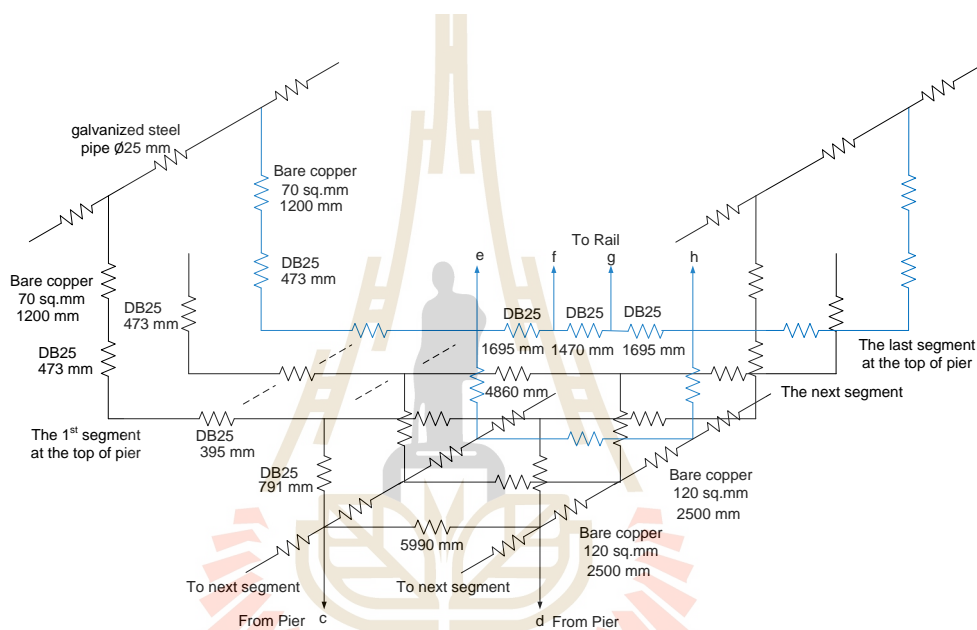


รูปที่ 6.3 โครงสร้างและแบบจำลองตัวต้านทานสำหรับเสาโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียว สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

6.2.2 แบบจำลองยกระดับแบบทางเดี่ยวสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร

สายสีม่วง (เหนือ)

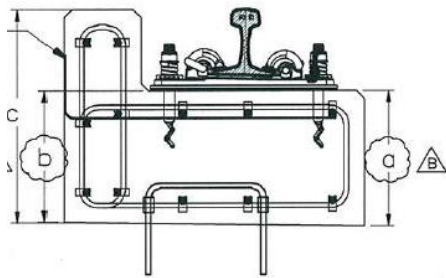
โครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวดังแสดงรูปที่ 6.2 ข) โดยส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กข้ออ้อย และมีการเชื่อมต่อทางยกระดับแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน (ประมาณ 16 ชิ้น ๆ ละ 2.5 m เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างเสาเป็น 40 m) โดยใช้สายทองแดง และราวป้องกันฟ้าผ่า ดังนั้นแบบจำลองตัวต้านทานของทางยกระดับสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)แสดงดังรูปที่ 6.4 ข)



รูปที่ 6.4 แบบจำลองตัวต้านทานสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยว
สำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

6.2.3 แบบจำลองทางวิ่งสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

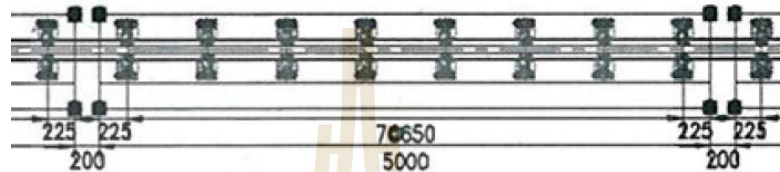
แบบจำลองทางวิ่งจะประกอบไปด้วยรางและฐานรองรางดังแสดงในรูปที่ 6.5 โดยที่รูปที่ 6.5 ก) แสดงส่วนประกอบของรางและหมอนรองรางและรูปที่ 6.5 ค) แสดงตำแหน่งการยึดรางรถไฟ และในรูปที่ 6.5 ข) แสดงภาพถ่ายของรางและหมอนรองราง ในโครงสร้างรางและหมอนรองรางจะประกอบไปด้วยรางวิ่ง (UIC60) ฉนวนรองราง คอนกรีต ชั้นของเหล็กโครงสร้าง (DB12) คอนกรีตและตัวนำที่เชื่อมต่อไปยังทางยกระดับ หมอนรองรางแต่ละชั้น (ยาว 5 เมตร) จะไม่การเชื่อมต่อกันทางโครงสร้าง แต่ละชั้นจะมีการยึดระหว่างหมอนรองรางกับวิ่ง 8 จุด ดังนั้นแบบจำลองตัวต้านทานของรางและฐานรองรางที่ต่อในแนวภาคตัดขวางแสดงดังรูปที่ 6.6



ก) ส่วนประกอบของรางและหมอนรองราง



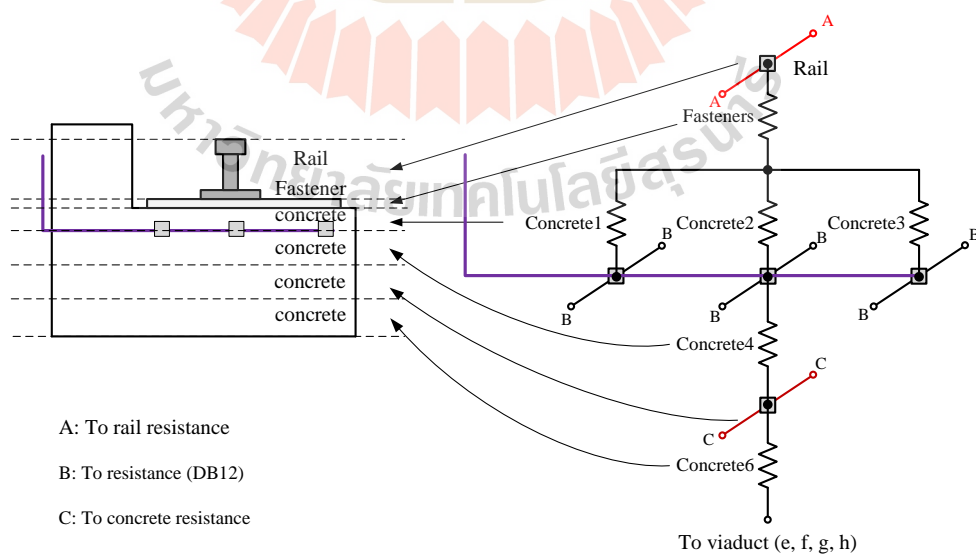
ข) ภาพถ่ายของรางและหมอนรองราง



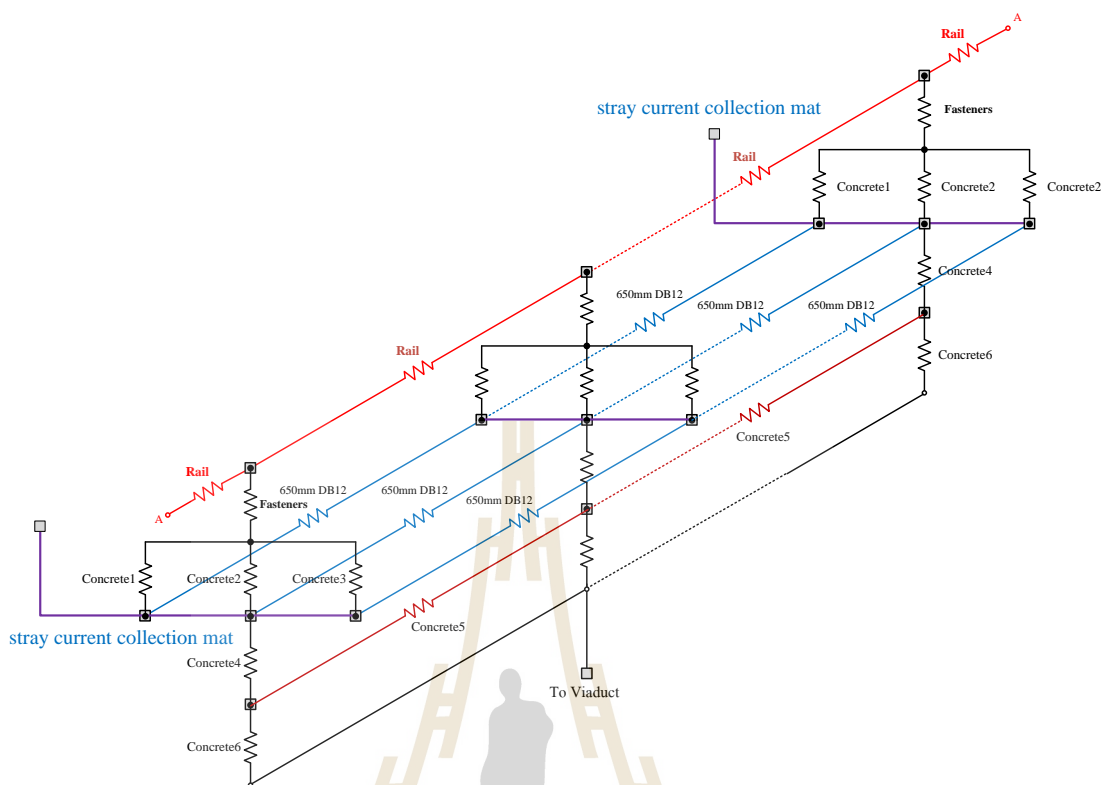
ค) ตำแหน่งการยึดรางรถไฟ

รูปที่ 6.5 ส่วนประกอบของทางวิ่งสำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

ในรูปที่ 6.6 แสดงการต่อในแต่ละชั้นตั้งแต่ราง ผนวนรองราง คอนกรีต ตาข่ายกับดัก กระแสรั่วไหลและชั้นคอนกรีต และในรูปที่ 6.7 แสดงแบบจำลองตัวต้านทานของรางและหมอนรองรางที่ต่อตามแนวความยาวที่มีการยึดระหว่างหมอนรองรางกับรางวิ่งด้วยหมุดยึดราง 8 จุด



รูปที่ 6.6 แบบจำลองตัวต้านทานของทางวิ่งที่ต่อในแนวภาคตัดขวาง
สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

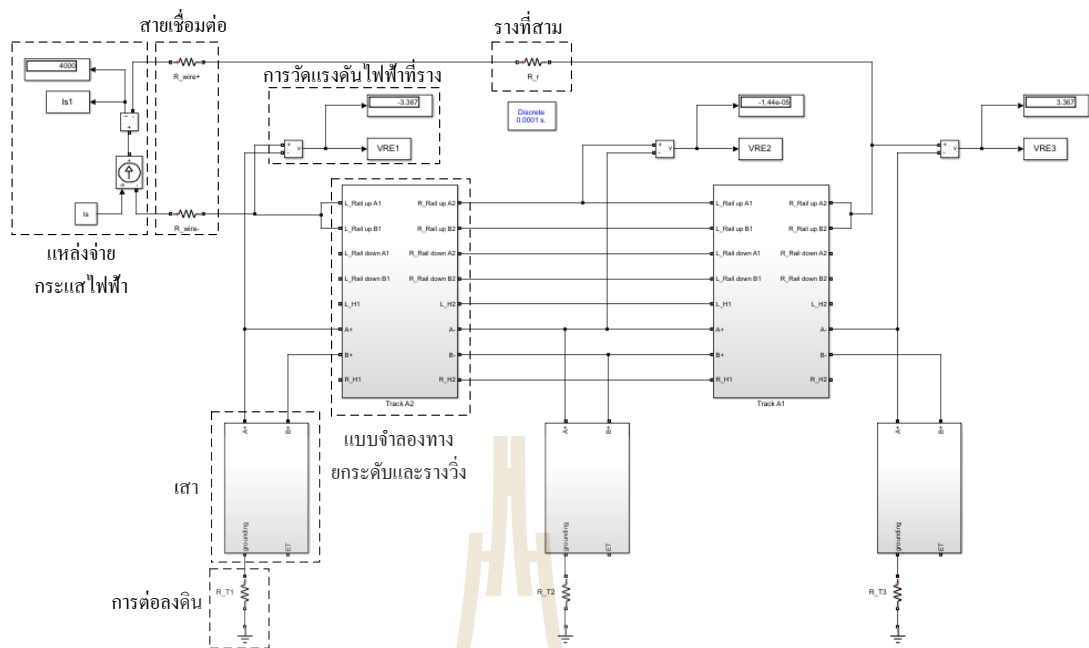


รูปที่ 6.7 แบบจำลองตัวต้านทานของของทางวิ่งที่ต่อตามแนวความยาว
สำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

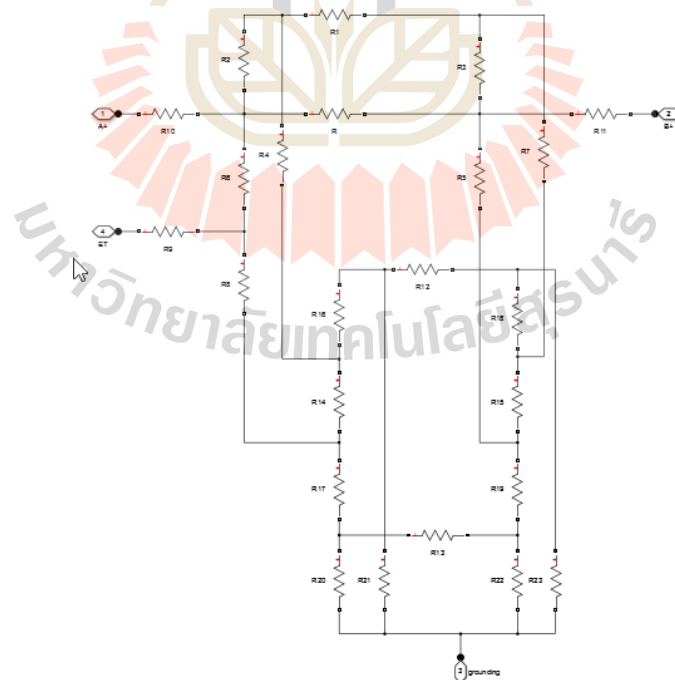
6.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับ หลังจากนั้นก็แบบจำลองตัวต้านทานทางไฟฟ้าในส่วนของเสา ทางยกระดับ และทางวิ่งที่กล่าวข้างต้นนำมาสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink ดังแสดงในรูปที่ 6.8 โดยในแบบจำลองจะใช้เวลา 80 เมตร (3 เสา 2 ช่วงของทางยกระดับ) สำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยว

แบบจำลองเสาในรูปที่ 6.8 สร้างมาจากแบบจำลองตัวต้านทานในรูปที่ 6.3 ข) และสามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink ภายในแบบจำลองของเสาแสดงได้รูปที่ 6.9

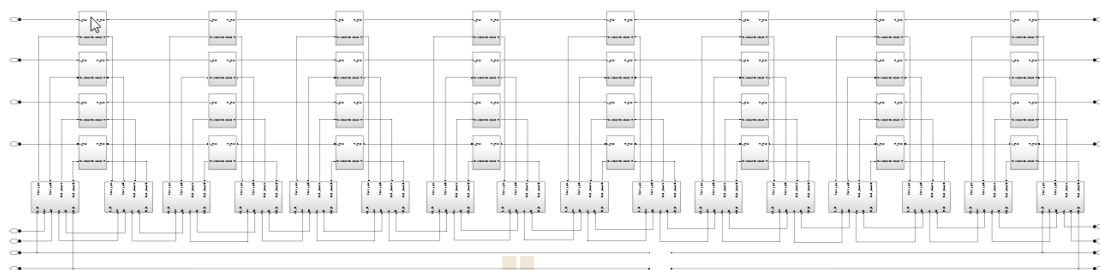


รูปที่ 6.8 แบบจำลองการต่อลงดินสำหรับ โครงสร้างขั้วแบบทางเดี่ยว
สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

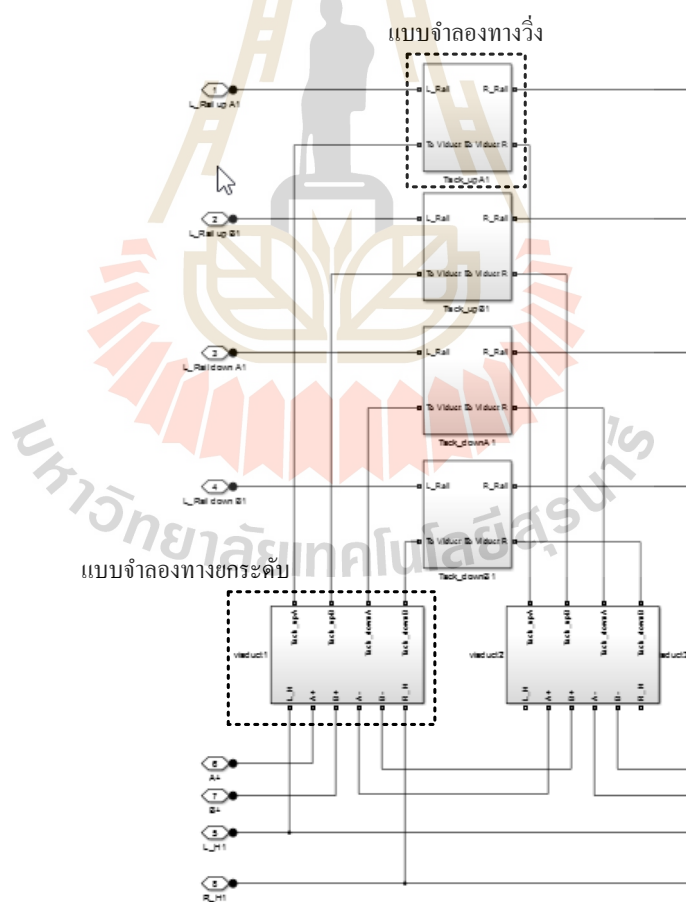


รูปที่ 6.9 แบบจำลองเสาโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink สำหรับโครงการ
รถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

ส่วนแบบจำลองทางกระดပ်และทางวิ่งในรูปที่ 6.5 โดยภายในแบบจำลองของเสาแสดงได้รูปที่ 6.10 ซึ่งสามารถขยายรูปได้ดังรูปที่ 6.11

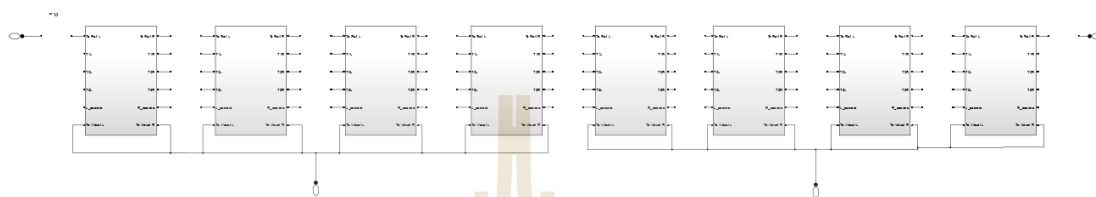


รูปที่ 6.10 แบบจำลองทางกระดပ်และทางวิ่งโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink สำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

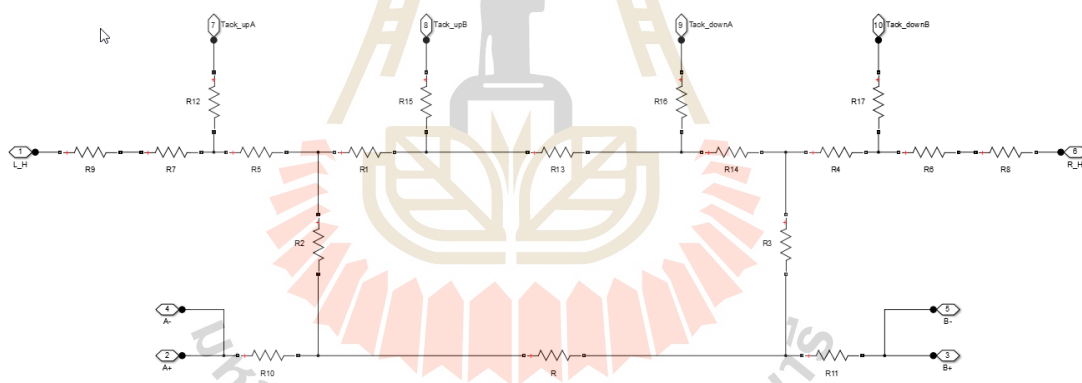


รูปที่ 6.11 รูปขยายแบบจำลองทางกระดပ်และทางวิ่งโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink สำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

ในรูปที่ 6.11 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางยกระดับและทางวิ่งจะประกอบไปด้วยแบบจำลองของทางยกระดับและแบบจำลองทางวิ่ง โดยที่มีแบบจำลองของทางยกระดับจำนวน 16 บล็อก บล็อกละ 2.5 m รวมเป็น 40 m ดังแสดงในรูปที่ 6.10 ดังนั้นในแบบจำลองของทางยกระดับจะแสดงได้ดังรูปที่ 6.11 ซึ่งได้จากแบบจำลองตัวด้านทานดังรูปที่ 6.12 และส่วนภายในของแบบจำลองทางวิ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.13

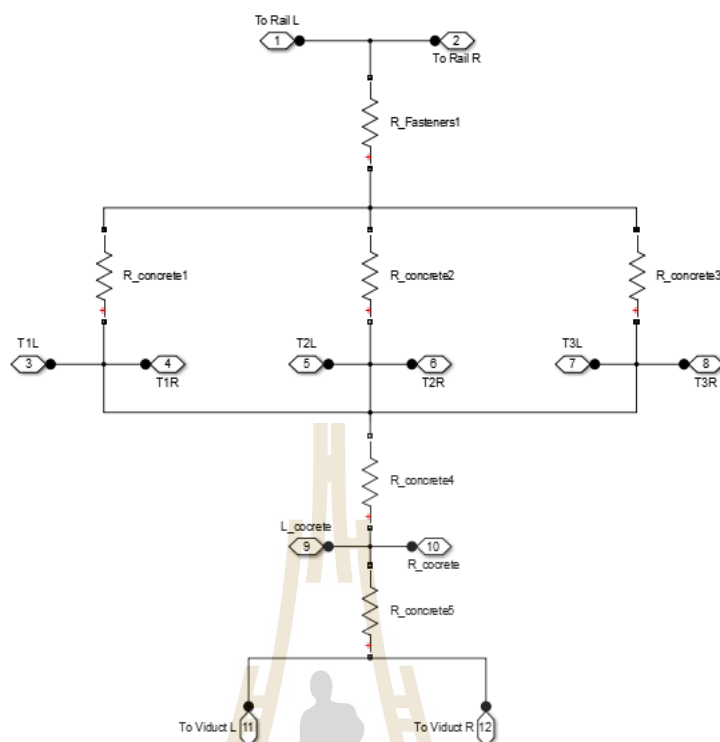


รูปที่ 6.12 แบบจำลองทางยกระดับโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink
สำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)



รูปที่ 6.13 ภายในแบบจำลองทางยกระดับโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink
สำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

ในแบบจำลองในรูปที่ 6.13 มาจากแบบจำลองตัวด้านทานในรูปที่ 6.7 และภายในแบบจำลองทางวิ่งแสดงที่แสดงในรูปที่ 6.13 จะประกอบไปด้วยบล็อกแบบจำลองจำนวน 8 บล็อก โดยภายในบล็อกจะแสดงดังรูปที่ 6.14 ซึ่งตรงกับแบบจำลองในรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.14 หมอนรองรางในแบบจำลองทางยกระดับโดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink
สำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

จากการสร้างแบบจำลองการต่อลงดินสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวในส่วนใน
บทที่ 5 หัวข้อ 5.4 จำเป็นต้องทราบค่าสภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เช่น รางรถไฟ เหล็ก
ทองแดง เหล็กข้ออ้อย คอนกรีต และวัสดุอื่นๆ ก่อนประเมินกระแสรั่วไหลในระบบโครงการ
รถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดการหาพารามิเตอร์ดังกล่าวในหัวข้อ
ถัดไป

6.4 การปรับปรุงแบบจำลองการต่อลงดินของโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

การหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของแบบจำลองการต่อลงดินเพื่อใช้ในการประเมินกระแส
รั่วไหลในโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ได้แก่ ค่าความต้านทานของดินอ้างอิง
(R_{Eref}) และค่าสภาพความนำไฟฟ้าของเหล็กข้ออ้อย (ρ_{DB}) เหล็ก (ρ_{Fe}) ทองแดง (ρ_{Cu}) และ
คอนกรีต (ρ_{Concrete}) การแก้ปัญหาเพื่อหาผลเฉลยของค่าพารามิเตอร์จะใช้ระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรม
ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.4.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

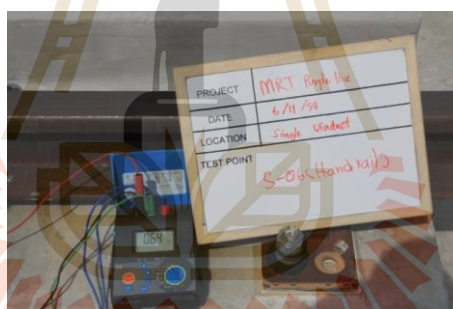
งานวิจัยนี้ดำเนินการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ MATLAB's GADS TOOLBOX เพื่อหาพารามิเตอร์ค่าความต้านทานของดินและดินอ้างอิง และค่าสภาพความนำไฟฟ้าของเหล็กข้ออ้อย เหล็ก ทองแดงและคอนกรีต โดยการวัดค่าความต้านทานที่จุดต่าง ๆ เทียบกับดินในระบบรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) จำนวน 3 จุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.15



ก. จุดวัดที่ 1 Earthing bar ด้านนอก



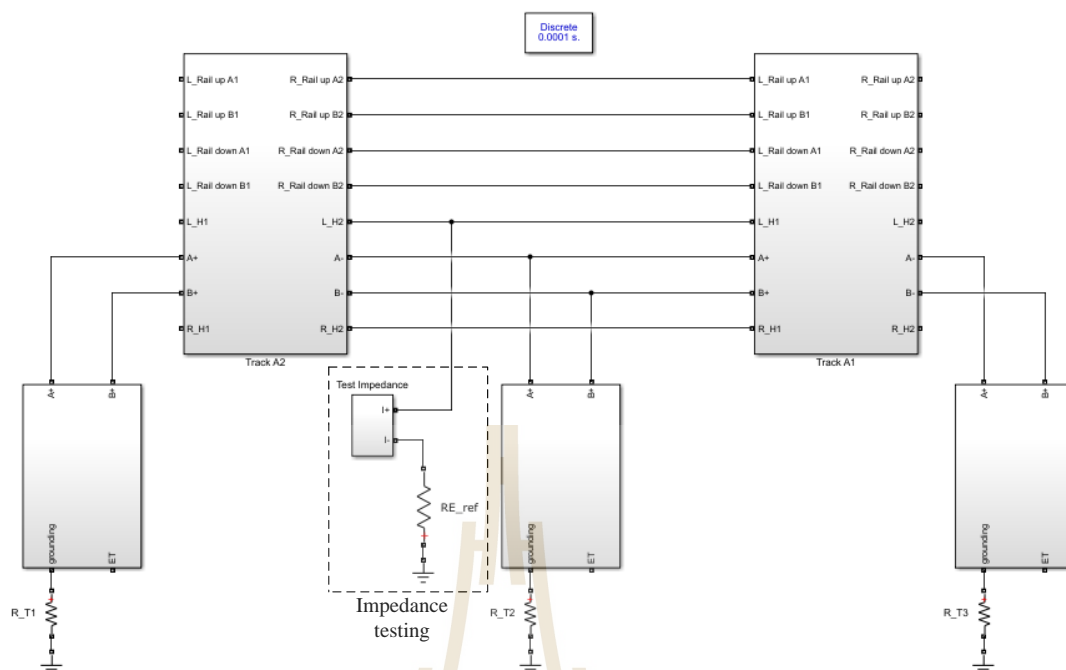
ข. วัดที่จุดที่ 2 Earthing bar ด้านใน



ค. จุดวัดที่ 3 Handrail

รูปที่ 6.15 การวัดค่าความต้านทานเทียบกับดินในรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

การจำลองการวัดในแบบจำลองตัวต้านทานที่สร้างขึ้นในโปรแกรม MATLAB & Simulink สำหรับเพื่อวัดค่าความต้านทานตามจุดต่าง ๆ เทียบกับดินให้สอดคล้องกับการวัดค่าความต้านทานเทียบกับดินในรูปที่ 6.15 สามารถสร้างแบบจำลองการต่อลงดินในรูปที่ 6.8 ได้ดังรูปที่ 6.16 ซึ่งเป็นการแสดงตัวอย่างการจำลองผลการวัดค่าความต้านทานเทียบกับดินที่ตำแหน่งจุดวัดที่ 3 Handrail โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยเพื่อแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ MATLAB's GADS TOOLBOX ดังแสดงในสมการที่ (5.6)



รูปที่ 6.16 การจำลองผลการวัดค่าความต้านทานเทียบกับดินที่ตำแหน่งจุดวัดที่ 3 Handrail
สำหรับแบบจำลองการต่อลงดินในโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

6.4.2 การจำลองผล

ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการที่ (6.6) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของค่าความต้านทานของดินอ้างอิง และค่าสภาพความนำไฟฟ้าของเหล็กข้ออ้อย เหล็ก ทองแดง และคอนกรีต ซึ่งสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ได้ดังตารางที่ 6.1 การกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์จะใช้วิธีการกำหนดความต้านทาน ของดิน อ้างอิงอยู่ที่ $0.01 \, \Omega$ ถึง $5 \, \Omega$ ค่าสภาพความนำไฟฟ้าของเหล็กข้ออ้อย เหล็ก ทองแดง จะคิดที่ $\pm 20\%$ ของมาตรฐานบริสุทธ์ ส่วนค่าสภาพความนำไฟฟ้าของคอนกรีตจะอยู่ในช่วง $30 - 150 \, \Omega.m$ (Alexander and Sadiku, 2009; Petrica, 2015)

การจำลองผลหาพารามิเตอร์โดยใช้วิธี GA จำนวน 10 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 6.2 ซึ่งให้ผลเฉลี่ยที่ดีที่สุดให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับ 2.91×10^{-2} หรือคิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย $2.91 \, \%$ โดยมีค่าพารามิเตอร์ของ $R_{ref} = 6.38 \times 10^{-1} \, \Omega$ และสภาพความนำไฟฟ้าเหล็กข้ออ้อย $\rho_{DB} = 1.60 \times 10^{-7} \, \Omega.m$ เหล็ก $\rho_{Fe} = 1.35 \times 10^{-7} \, \Omega.m$ ทองแดง $\rho_{Fe} = 1.34 \times 10^{-8} \, \Omega.m$ และคอนกรีต $\rho_{Concrete} = 148.33 \, \Omega.m$ ซึ่งแสดงการสู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 6.17

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX สำหรับโครงการ
รถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

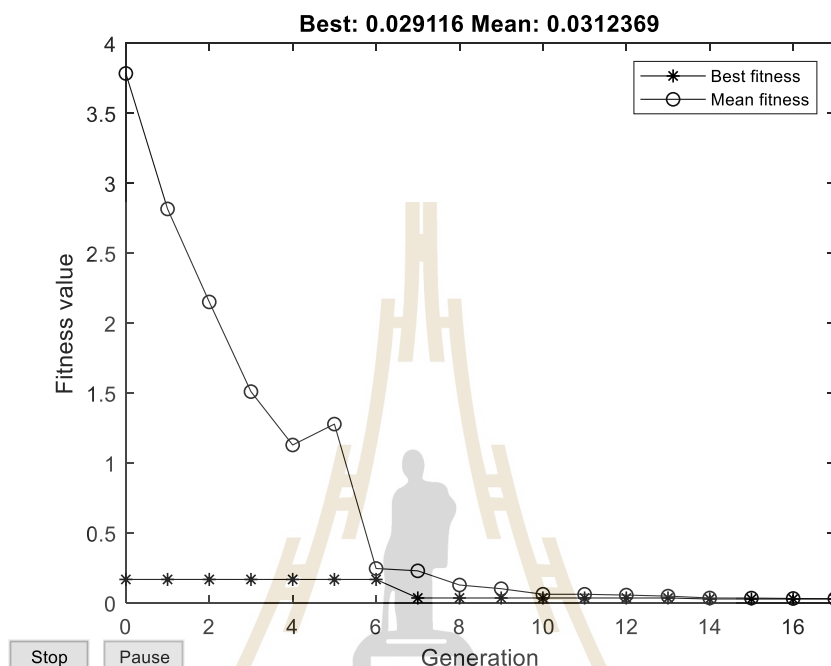
พารามิเตอร์	ปริมาณของพารามิเตอร์
Total Generation	200
Stall Generation Limit	20
TolFun	$1e^{-3}$
Population Size	20
Population Range R_{Eref} (Ω)	[0.01 5]
Population Range ρ_{DB} ($\Omega.m$)	$[1.75 \times 10^{-7} \ 1.75 \times 10^{-7}]$
Population Range ρ_{Fe} ($\Omega.m$)	$[0.8 \times 1 \times 10^{-7} \ 0.8 \times 1 \times 10^{-7}]$
Population Range ρ_{Cu} ($\Omega.m$)	$[0.8 \times 1.68 \times 10^{-8} \ 1.2 \times 1.68 \times 10^{-8}]$
Population Range ρ_{Concrete} ($\Omega.m$)	[30 150]

ตารางที่ 6.2 การหาค่าพารามิเตอร์สำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ด้วยวิธี GA

No.	R_{Eref}	ρ_{DB}	ρ_{Fe}	ρ_{Cu}	ρ_{Concrete}	Fval
1	6.61×10^{-1}	1.78×10^{-7}	9.58×10^{-8}	1.95×10^{-8}	39.69	3.93×10^{-2}
2	4.47×10^{-1}	2.10×10^{-7}	1.00×10^{-7}	1.81×10^{-8}	100.00	2.79×10^{-1}
3	6.38×10^{-1}	1.60×10^{-7}	1.35×10^{-7}	1.34×10^{-8}	148.33	2.91×10^{-2}
4	5.86×10^{-1}	1.53×10^{-7}	9.63×10^{-8}	1.76×10^{-8}	75.81	7.29×10^{-2}
5	5.68×10^{-1}	1.87×10^{-7}	9.50×10^{-8}	1.79×10^{-8}	50.74	9.80×10^{-2}
6	5.94×10^{-1}	2.10×10^{-7}	1.04×10^{-7}	1.84×10^{-8}	135.29	5.93×10^{-2}
7	7.63×10^{-1}	1.67×10^{-7}	9.33×10^{-8}	1.51×10^{-8}	131.48	1.92×10^{-1}
8	6.95×10^{-1}	1.72×10^{-7}	1.15×10^{-7}	1.44×10^{-8}	82.36	9.07×10^{-2}
9	6.17×10^{-1}	2.10×10^{-7}	9.65×10^{-8}	1.05×10^{-8}	128.70	3.81×10^{-2}
10	6.32×10^{-1}	1.67×10^{-7}	8.67×10^{-8}	1.98×10^{-8}	38.07	3.19×10^{-2}

จากพารามิเตอร์ที่ได้จากการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ในตารางที่ 6.2 สามารถจำลองผลเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่รางโดยใช้แบบจำลองการต่อลงดินในระบบรถไฟฟ้าโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ดังแสดงในรูปที่ 6.8 เมื่อกำหนดให้กระแสไฟฟ้ามีค่าเป็น 4000

A พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่รางมีค่าเป็น -3.3669 V $-1.449 \times 10^{-5}\text{ V}$ และ 3.3669 V ดังนั้นสามารถนำแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดไปใช้ในการประเมินกระแสรั่วในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 6.17 การหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้วิธี GA ของโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

6.5 การประเมินกระแสรั่วไหลสำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

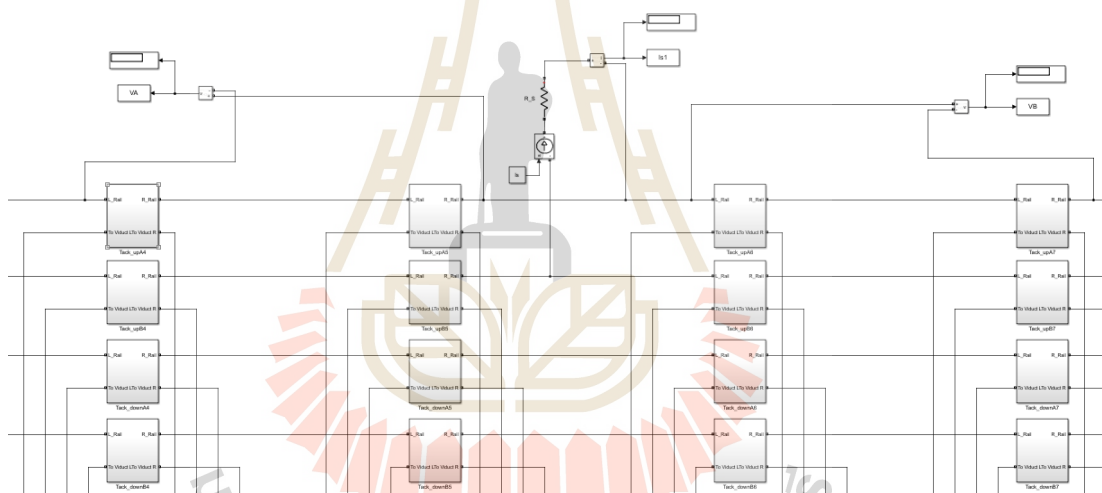
ในการประเมินกระแสรั่วไหลตามมาตรฐาน EN 50122-2 แนะนำว่าจะไม่เกิดความเสียหายในทางรถไฟในช่วง 25 ปี ถ้ากระแสรั่วไหลต่อหน่วยความยาวไม่เกินค่า 2.5 mA/m ต่อทางรถไฟ เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ดังนั้นจากข้อกำหนดตามมาตรฐานค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดินควรมีค่าไม่เกิน 5 V สำหรับโครงสร้างระบบแบบเปิด ค่าความนำต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับดินควรมีค่าไม่เกิน 500 mS/km สำหรับโครงสร้างระบบแบบเปิดและศักย์ไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างกับดินควรมีค่าไม่เกิน 200 mV สำหรับเหล็กในคอนกรีตเสริมแรง ดังนั้นจึงได้แสดงการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับการประเมินกระแสรั่วไหล วิธีการประเมินกระแสรั่วไหลและผลกระทบของฉนวนรองที่เสื่อมสภาพต่อกระแสรั่วไหล ดังต่อไปนี้

6.5.1 พารามิเตอร์สำหรับการประเมินกระแสรั่วไหล

การประเมินกระแสรั่วไหลจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์ของค่าความต้านทานของรางวิ่งและค่าความนำต่อนิ่งหน่วยความยาว ในที่นี้จะใช้การจำลองผลการวัดแทนการวัดจริงโดยใช้แบบจำลองการต่อลงดินในโปรแกรม MATLAB&Simulink สำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวพร้อมกับพารามิเตอร์ของค่าความต้านทานของดินและดินอ้างอิง และค่าสภาพความนำไฟฟ้าของเหล็กข้ออ้อย เหล็ก ทองแดง และคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การจำลองผลการวัดค่าความต้านทานของรางวิ่ง

จากการวัดการวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งตามมาตรฐาน EN 50122-2 สามารถจำลองผลการวัดค่าความต้านทานตามแนวความยาวของรางที่มีความยาว 10 เมตร ของรางโดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 การจำลองผลการวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งสำหรับรางที่มีความยาว 10 เมตร สำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

จากผลการจำลองกำหนดให้ U_{Aoff} และ U_{Boff} มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นการจำลองผลการวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งจะได้ว่า $U_{Aon} = 0.0051$ V $U_{Bon} = 0.0051$ V และ $I = 24$ A ดังนั้น

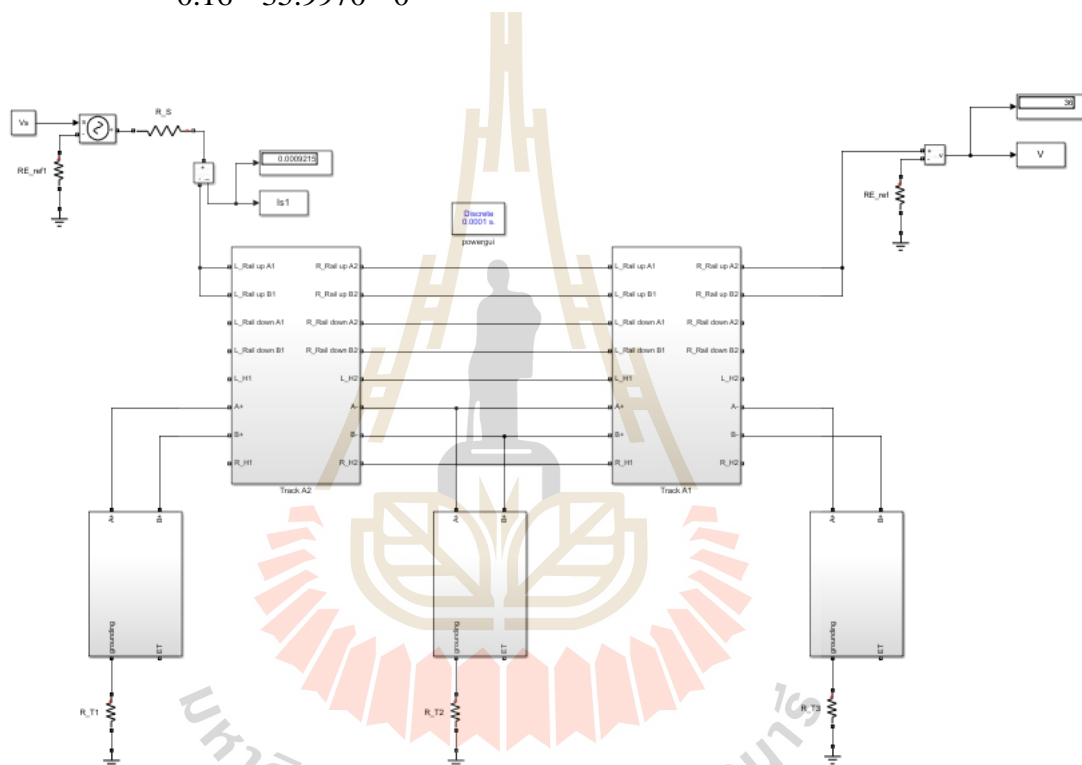
$$R_{R10m} = \frac{(0.0051 - 0) + (0.0051 - 0)}{24} = 4.2085 \times 10^{-4} \Omega$$

หรือ $R_R = R_{R10m}/10 = 4.2085 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}/\text{track}$ หรือ $R_R = 0.042085 \Omega/\text{km}/\text{rail}$

2. การจำลองผลการวัดค่าความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาว

จากการวัดการวัดค่าความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาวสามารถจำลองผลการวัดค่าความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาวโดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 6.19 จากการจำลองผลกำหนดให้มีระยะในการวัดเท่ากับ 160 m ($L = 0.16$ km) U_{REoff} เป็นศูนย์ จะได้ว่า $U_{REon} = 35.997$ V และ $I = 0.0018$ A ดังนั้นความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาวมีค่าเป็น

$$G'_{RE} = \frac{1}{0.16} \times \frac{0.0018}{35.9970 - 0} = 0.00032 \text{ S/km}$$



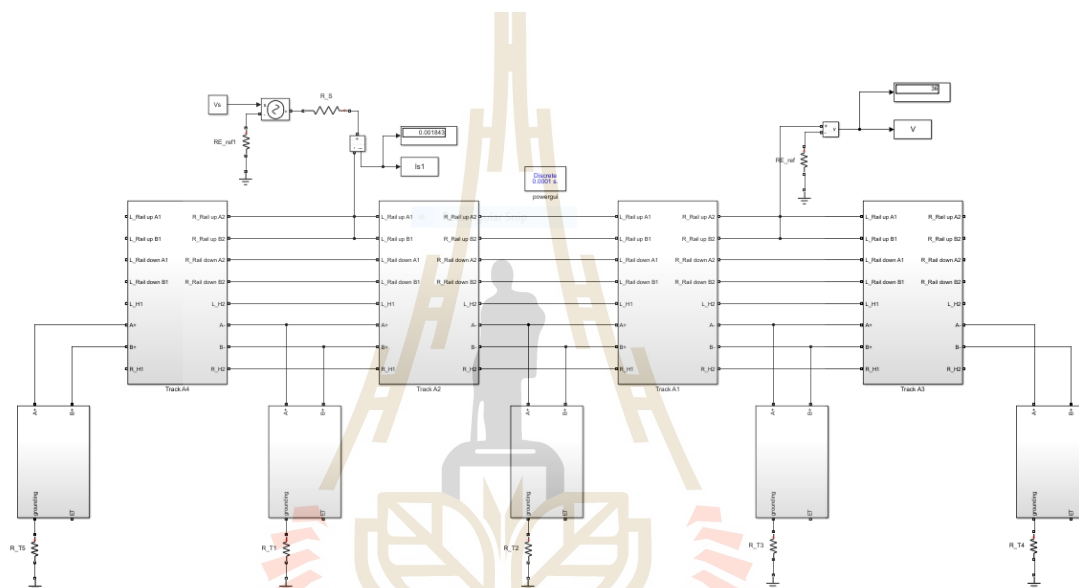
รูปที่ 6.19 การจำลองผลการวัดค่าความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาวสำหรับส่วนของราง
สำหรับโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

3. ผลกระทบของความยาวที่จำกัด

การพิจารณาผลกระทบของความยาวที่จำกัดเป็นการจำลองโดยการเพิ่มความยาวของแบบจำลองการต่อลงดินในโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ที่ละ 2 ช่วงเสา หรือเป็นระยะ 80 m เพื่อหาช่วงเสาของแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการประเมินและวิเคราะห์และประเมินกระแสรั่วไหลในรับรดิไฟฟ้าดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 6.3 โดยใช้วิธีการจำลองหาความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาวดังแสดงในรูปที่ 6.20 ได้แสดงตัวอย่างการจำลอง 5 ช่วงเสา

ตารางที่ 6.3 ผลกระทบของความยาวที่จำกัด

ความยาวของช่วงเสา	Time (sec)	G'_{RE} (mS/km)
3 (80 m)	110.33	0.319995
5 (160 m)	276.68	0.320043
7 (240 m)	1180.48	0.320002
9 (320 m)	1782.70	0.320025
11 (400 m)	4026.31	0.320027



รูปที่ 6.20 การจำลองหาค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว 5 ช่วงเสา

จากผลการจำลองในตารางที่ 6.3 พบว่าความยาวของ 3 5 7 9 และ 11 ช่วงเสานั้น ให้ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวใกล้เคียงกันแต่จำนวนช่วงเสาที่มากขึ้นจะทำให้ระยะเวลาในการจำลองผลนานขึ้นด้วย ดังนั้นระยะ 3 ช่วงเสา สามารถใช้แทนการจำลองหลายช่วงเสาได้

6.5.2 ผลการประเมินกระแสรั่วไหล

การประเมินกระแสรั่วไหลสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) จะคำนวณแรงดันระหว่างรางวิ่งไปยังดินและกระแสที่ไหลผ่านไปยังดินตามมาตรฐาน EN 50122-2 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขับเคลื่อนสูงสุดเป็น

$$I_{trc} = \frac{P_{sub}}{V_{c,min} - V_{RE,max}} = \frac{2.542 \times 10^6}{729.08 - 13.15} = 3550.778 \text{ A}$$

สามารถดูได้จากในตารางที่ 4.2 สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ TSS10 โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาว $R_R = 0.04209 \Omega/\text{km/rail}$ แต่การใช้งานจริงทางรถไฟมี 2 ราง ดังนั้นค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาวมีค่าเป็น $R_{R2\text{rail}} = 0.02104 \Omega/\text{km}$ ค่าความนำต่อหน่วยความยาวมีค่าเป็น $G'_{RE} = 0.32 \text{ mS/km}$ และความยาวของระยะทางที่ใช้ในการพิจารณา $L = 1.59 \text{ km}$ (ซึ่งเป็นระยะที่ยาวที่สุดสำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวของโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) นั่นคือสถานีบางซื่อ-เตาปูน หรือ TSS10) สามารถคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางกระแสรั่วไหลไปยังดินได้ต่อไปนี้

$$L_C = \frac{1}{\sqrt{G'_{RE} \times R'_R}} = \frac{1}{\sqrt{0.00032 \times 0.02104}} = 385.3915$$

$$R_C = \sqrt{\frac{R'_R}{G'_{RE}}} = \sqrt{\frac{0.02104}{0.00032}} = 8.1086$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} U_{RE} &= 0.5 \times I \times R_C \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_C}\right)} \right) \\ &= 0.5 \times 3550.778 \times 8.1086 \times \left(1 - e^{-\frac{1.58}{385.3915}} \right) \\ &= 58.899 \text{ V} \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} I'_S &= 0.5 \times \frac{I}{L_C} \times \left(1 - e^{-\frac{L}{L_C}} \right) \\ &= 0.5 \times \frac{3550.778}{385.3915} \times \left(1 - e^{-\frac{1.58}{385.3915}} \right) \\ &= 0.0188 \text{ mA/m} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ศักย์ไฟฟ้าที่รางในอัตรา 58.899 V และกระแสรั่วจากทางวิ่งในอัตรา 0.0188 mA/m สำหรับพิกัด 3550.778 A ดังแสดงในตารางที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการประเมินกระแสรั่วไหลระหว่างการจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟขบวนเดียว (OGM) กับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางที่ได้จากแบบจำลองการต่อลงดินตามมาตรฐาน EN 50122-2

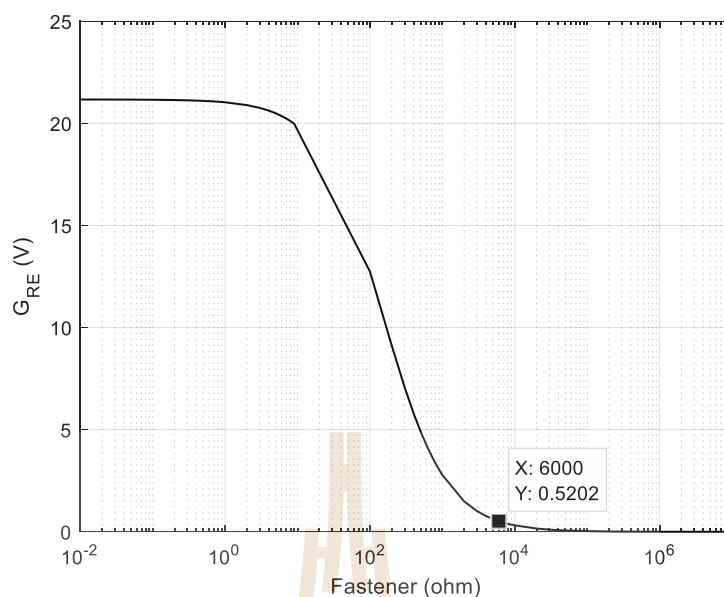
ตารางที่ 6.4 การเปรียบเทียบผลการประเมินกระแสรั่วไหล

วิธีการ	ศักย์ไฟฟ้าที่รั่ว (V)
การจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟขบวนเดียว (OGM)	74.312
การคำนวณตามมาตรฐาน EN 50122-2	58.899

จากการประเมินระบบโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ทั้งสองวิธี พบว่าการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเป็น 74.312 V จากการจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟขบวนเดียว (OGM) และ 58.899 V จากการคำนวณตามมาตรฐาน EN 50122-2 พบว่า ศักย์ไฟฟ้าที่รั่วมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากการจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟขบวนเดียวมีกระแสรั่วไหลที่สะสมอยู่ในดินที่ไหลย้อนกลับเข้าสู่สถานไฟฟ้าขับเคลื่อน แต่ก็ผ่านมาตรฐานที่กำหนดไว้ทั้งสองกรณี นั่นคือ แรงดันที่ยอมให้เข้าถึงได้มีค่าไม่เกิน 120 V ตามมาตรฐาน EN 50122-1

6.5.3 ผลกระทบของฉนวนรองที่เสื่อมสภาพต่อกระแสรั่วไหล

การศึกษาผลจากความเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ยึดจับ โดยใช้แบบจำลองการต่อลงดินในระบบรถไฟฟ้าโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) โดยปกติค่าความต้านทานของฉนวนอุปกรณ์ยึดจับรางที่ดีควรมีค่าไม่น้อยกว่า $10\text{ M}\Omega$ ในสภาวะแห้ง ดังนั้น การศึกษานี้ได้ทำการจำลองให้การเสื่อมสภาพเพื่อพิจารณาผลในเบื้องต้นว่าความต้านทานของอุปกรณ์ยึดจับรางมีค่าลดลงเท่าใดจึงจะทำให้ความนำไฟฟ้าระหว่างทางวิ่งและดินเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยการจำลองความต้านทานของอุปกรณ์ยึดจับรางทุกตัวในระบบให้มีค่าลดลง จากนั้นทำการจำลองเพื่อคำนวณค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของแบบจำลองการต่อลงดินในโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) โดยใช้โปรแกรม MATLAB&Simulink ได้แสดงผลการจำลองดังรูปที่ 6.21

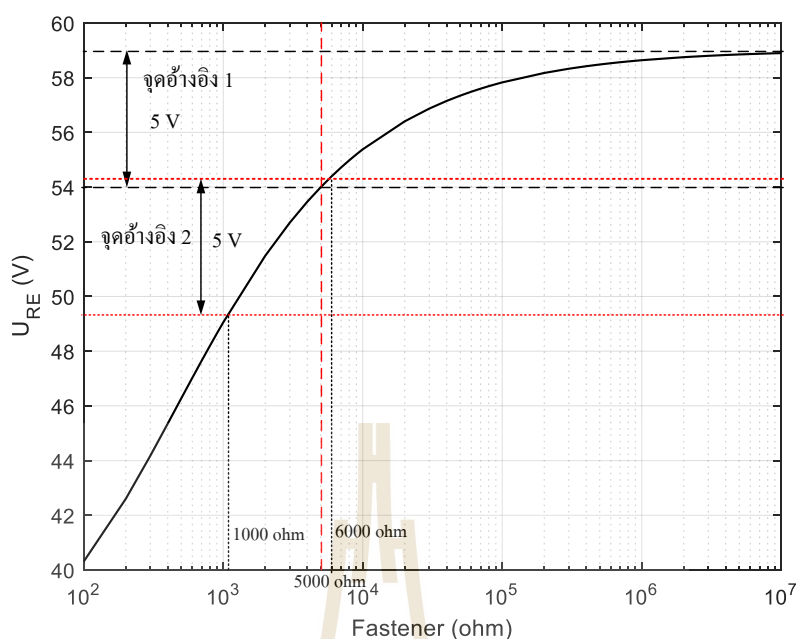


รูปที่ 6.21 ความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวเมื่ออุปกรณ์ยึดจับรางวิ่งเสื่อมสภาพ

จากตารางที่ 6.4 และรูปที่ 6.21 เมื่อพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวตามมาตรฐาน EN 50122-2 จะพบว่าจากเกณฑ์ความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวที่ตั้งไว้ที่ 0.5 S/km นั้น ระบบรถไฟจะมีความนำไฟฟ้าเกินค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้เมื่อความต้านทานของอุปกรณ์ยึดจับลดลงเหลือประมาณ 6 k Ω ทำให้ทราบถึงค่าความต้านทานวิกฤตของอุปกรณ์ยึดจับที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นเกณฑ์เพื่อประกอบการวินิจฉัยระบบการต่อลงดิน

นอกจากนั้นยังพิจารณาการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงโดยการทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้า 3550.788 A ที่ระยะ 1.58 km (ระยะทางที่ยาวที่สุดที่ในการพิจารณาในโครงการรถไฟมหานคร สายสีม่วง เหนือ) และใช้วิธีจำลองการคำนวณตามมาตรฐาน EN 50122-2 เพื่อประเมินกระแสรั่วไหลโดยพิจารณาศักย์ไฟฟ้าที่วางเทียบกับความต้านทานของฉนวนอุปกรณ์ยึดจับรางดังรูปที่ 6.22

จากมาตรฐาน EN 50122-2 อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงวิกฤตเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่รางมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่ามากกว่า + 5 V สำหรับระบบเปิด จากรูปที่ 6.22 พบว่าแรงดันอ้างอิงที่ 1 ซึ่งอ้างอิงกับที่ค่าความต้านทานของฉนวนอุปกรณ์ยึดจับราง 10 M Ω จะเกิดแรงดันวิกฤตที่ค่าความต้านทานของฉนวนอุปกรณ์ยึดจับรางเป็น 5 k Ω หรือ $G'_{RE} = 0.6212$ S/km และจากการอ้างอิงตามที่มาตรฐานกำหนด นั่นคือ $G'_{RE} = 0.5$ S/km หรือมีค่าความต้านทานของฉนวนอุปกรณ์ยึดจับรางเป็น 6 k Ω พบว่าจะเกิดแรงดันวิกฤตที่ค่าความต้านทานของฉนวนอุปกรณ์ยึดจับรางเป็น 1 k Ω หรือ $G'_{RE} = 2.78$ S/km



รูปที่ 6.22 ศักย์ไฟฟ้าที่รางเทียบกับความต้านทานของฉนวนอุปกรณ์ยึดจับราง

สำหรับการพิจารณากระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้านั้นจะทำการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งเป็นหลักซึ่งการกำหนดศักย์ไฟฟ้าที่รางอ้างอิงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับกระแสรั่วไหลในโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) โดยจะตั้งค่าค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงไว้ที่ 54.25 V

6.6 สรุป

การประเมินระบบโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ทั้งสองวิธีพบว่าการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเป็น 58.899 V ซึ่งถือว่าการประเมินผ่านมาตรฐานที่กำหนดไว้ นั่นคือ แรงดันที่ยอมให้เข้าถึงได้มีค่าไม่เกิน 120 V ตามมาตรฐาน EN 50122-1 เมื่อพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50122-2 จะพบว่า จากเกณฑ์ความนำไฟฟ้าที่ตั้งไว้ที่ 0.5 S/km นั้น ระบบรถไฟฟ้ามะม่วงจะมีความนำไฟฟ้าเกินค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้เมื่อความต้านทานของอุปกรณ์ยึดจับลดลงเหลือประมาณ 6 k Ω ทำให้ทราบถึงค่าความต้านทานวิกฤตของอุปกรณ์ยึดจับที่เหมาะสมและสำหรับการพิจารณากระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้านั้นจะทำการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งเป็นหลักซึ่งการกำหนดศักย์ไฟฟ้าที่รางอ้างอิงมีความจำเป็นยิ่งสำหรับการตั้งค่าอุปกรณ์ตรวจจับกระแสรั่วไหล

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน กระแสตรงโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การคำนวณการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่ราง

การวิเคราะห์และประเมินกระแสรั่วไหลในรถไฟฟ้ากระแสตรงโดยการพิจารณาศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางได้นำเสนอ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพื้นฐาน (CMM) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย (SMM) สำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวและสองด้านพบว่าทั้งสองแบบจำลองที่นำเสนอมีความแตกต่างกันเนื่องจากกำหนดขอบเขตด้านข้างที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ยังได้แสดงสมการการคำนวณอย่างง่าย (SCE) สำหรับการประมาณศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าถึงแม้ว่าจะเกิดความคลาดเคลื่อนสูงแต่ก็ยังสามารถนำไปใช้ได้สำหรับการประเมินกระแสรั่วไหลเนื่องจากมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางไม่เกิน 120 V ตามมาตรฐาน EN 50122-1 ได้กำหนดไว้และยังสามารถระบุได้ว่าโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ผ่านมาตรฐานการประเมินกระแสรั่วไหลเบื้องต้น

2. การจำลองกระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรง โครงสร้างทางยกระดับ

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าเดี่ยวในโครงสร้างทางยกระดับด้วยแบบจำลองการต่อลงดินชั้นเดียว (OGM) แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น (DGM) และ แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นที่เสา (TGM_{@poles}) เพื่อใช้ในการประเมินศักย์ไฟฟ้าที่รางและแรงดันไฟฟ้าในโครงสร้างสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) จากเปรียบเทียบการจำลองผลในกรณี OGM TGM และ TGM_{@poles} พบว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่รางมีค่าเป็น 74.35 V ซึ่งมีค่าไม่เกิน 120 ตามมาตรฐาน EN 50122-1 ซึ่งถือว่าผ่านมาตรฐานการประเมินกระแสรั่วไหลและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในโครงสร้าง มีค่าเป็น 0.76 V

3. แบบจำลองกระแสรั่วไหลในโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วน

จากการทดสอบโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวบางส่วนเพื่อพิจารณากระแสรั่วที่เกิดขึ้นโดยการวัดแรงดันไฟฟ้าที่รางพบว่าสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดินโดยเฉพาะเวลาที่ฝนตก ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณาในช่วงนี้เพื่อออกแบบ

ระบบป้องกันและอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ให้บริการ ช่างซ่อมบำรุง และอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบรถไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้สร้างและปรับปรุงแบบจำลองการต่อลงดินของโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียวส่วนเพื่อใช้สำหรับศึกษาและประเมินกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงได้ และพบว่าเกิดของแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดินมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นน้อยมากและเกิดขึ้นเนื่องจากการวัดโดยเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่แล้ว รวมถึงสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงเช่น อุณหภูมิและความชื้น

4. แบบจำลองกระแสรั่วไหลสำหรับรถไฟฟ้าสายสีม่วง

การประเมินระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน MRT สายสีม่วง ทั้งสองวิธีพบว่าการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเป็น 58.899 V ซึ่งถือว่าการประเมินเบื้องต้นผ่านมาตรฐานที่กำหนดไว้ นั่นคือ แรงดันที่ยอมให้เข้าถึงได้มีค่าไม่เกิน 120 V ตามมาตรฐาน EN 50122-1 เมื่อพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50122-2 จะพบว่า จากเกณฑ์ความนำไฟฟ้าที่ตั้งไว้ที่ 0.5 S/km นั้น ระบบรถไฟฟ้าจะมีความนำไฟฟ้าเกินค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้เมื่อความต้านทานของอุปกรณ์ยึดจับลดลงเหลือประมาณ 6 k Ω จากการอ้างอิงตามที่มาตรฐานกำหนดค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวมีค่าเป็น $G'_{RE} = 0.5$ S/km หรือมีค่าความต้านทานของฉนวนอุปกรณ์ยึดจับรางมีค่าเป็น 6 k Ω พบว่าจะเกิดศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง 5 V ที่ค่าความต้านทานของฉนวนอุปกรณ์ยึดจับรางเป็น 1 k Ω หรือค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวมีค่า $G'_{RE} = 2.78$ S/km แสดงว่าควรเปลี่ยนฉนวนของอุปกรณ์ยึดจับรางใหม่ได้แล้ว

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษากระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือและสมจริงมากยิ่งขึ้นการศึกษาระแสรั่วไหลจำเป็นต้องพิจารณาในกรณีที่เกิดไฟรั่วหลายขบวนโดยการใช้วิธีการคำนวณเปรียบเทียบผลการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟ และควรมีการเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ เช่น การใช้โปรแกรมสำเร็จรูป การใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองผล และการวัดผลจริงจากโครงการรถไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้การตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าควรใช้อุปกรณ์ที่น่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม รวมถึงการออกแบบวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าให้ครอบคลุมขอบเขตในการวัด ควรมีการตรวจวัดแต่ละจุดรูปแบบ เช่น การวัดแรงดันไฟฟ้าแบบ AC การวัดแรงดันไฟฟ้าแบบ DC การวัดแรงดันไฟฟ้าแบบ DC ร่วมกับวงจรกรองสัญญาณ และการวัดกระแสไฟฟ้า และควรมีการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่น่าเชื่อถือได้

รายการอ้างอิง

- ธนัชชัย กุลวรรณิษพงษ์. (2557). ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ. เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- นคร จันทศร. (2555). **ช่วงรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ**. โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของประเทศไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 2.
- สุวิทย์ บัวเพชร (2554). การศึกษาการเกิดรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าน้ำหนักเบาแบบโครงสร้างใต้ดิน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชัยยุทธ สัมภาวะคุปต์, (2560). กลยุทธ์การตัดจ่ายสำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นในรถไฟฟ้าน้ำหนักเบา. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว (2552). **ปัญญาเชิงคำนวณ**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- Alamuti, M. M., Nouri, H., and Jamali, S. (2011). Effects of earthing systems on stray current for corrosion and safety behaviour in practical metro systems. **IET Electrical Systems in Transportation**. 1(2): 69 – 79.
- Alexander K.C. and Sadiku N.O.M. (2009). **Fundamentals of Electric Circuits**, 4th edn, Published by McGraw-Hill.
- Alamuti, M.M., Zare, A., and Savaghebi, M. (2008). Reversed diode earthing scheme in DC traction power system. In **Proceedings of International Conference on Universities Power Engineering Conference 2008**, (pp. 1 – 5).
- Ardizzon, L., Pinato, P., and Zaninelli, D. (2003). Electric traction and electrolytic corrosion: a software tool for stray currents calculation. **Transmission and Distribution Conference and Exposition**, 2: 550 – 555.
- Anton C. František J., and Milan K. (2015). Resistive-type network model of stray current distribution in railway DC traction system. In **Proceedings of International Conference on Electric Power Engineering**,

- EN 50122-1. (2011). **Railway applications – Fixed installations – Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 1: Protective provisions against electric shock**. London: UK.
- EN 50122-2. (2010). **Railway applications – Fixed installations – Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems**. London: UK.
- Charalambous, C.A., and Cotton, I. (2007). Influence of soil structures on corrosion performance of floating-DC transit systems. **IET Electric Power Applications**. 1(1): 9 – 16.
- Charalambous C.A., Cotton I., and Aylott P. (2008). A Simulation Tool to Predict the Impact of Soil Topologies on Coupling Between a Light Rail System and Buried Third-Party Infrastructure. **IEEE Vehicular Technology Magazine**. 57(3): 1404 – 1416.
- Lee, C.H. (2005). Evaluation of the maximum potential rise in Taipei rail transit systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 20(2): 1379 – 1384.
- Lee, C.H., and Lu, C.J., (2006). Assessment of grounding schemes on rail potential and stray currents in a DC transit system. **IEEE Transactions on Power Delivery Magazine**. 21(4): 11941 – 1947.
- Cotton, I., Charalambous, Aylott, P., and Ernst, P. (2005). Stray current control in DC mass transit systems. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**. 54(2): 722 – 730.
- Chuchit T., Ratniyomchai T., and Kulworawanichpong T. (2018). Simulation of Stray Current in DC Railways System with Rail Potential and Structure Voltage. **International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering (IJIEEE)**. 6(6): 32 – 38.
- Friedrich, K., Rainer, P., Axel, S., and Egid, S. (2009). **Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance**, 2nd revised and enlarged edition. Publicis Publishing.
- Fichera F., Mariscotti A., Ogunsola A., and Sandrolini L. (2013). Comparison of distributed and lumped parameters stray current models. **IEEE Conference on AFRICON 2013**, (pp. 1 – 5).
- Fichera F., Mariscotti A., and Ogunsola, A. (2013). Evaluating stray current from DC electrified transit systems with lumped parameter and multi-layer soil models. **IEEE Conference on AFRICON 2013**, (pp.1187 – 1192).

- Guifu D., Dongliang Z., Guoxin L., Chonglin W. and Jianhua L. (2016) Evaluation of Rail Potential Based on Power Distribution in DC Traction Power Systems. **Energies** **2016**, 9(729).
- IEC60479-1 (2005) **Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects**, London: UK.
- Jabbehdari S., and Mariscotti A. (2015) Distribution of stray current based on 3-Dimensional earth model. **Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)**, **2015**, (pp. 1 – 6).
- JIS E 6002. (1989). **General Rules for Performance of Electric Railcars for Commuter Use**, Tokyo: Japan.
- Kim, K. (2010). **Optimal train control on various track alignments considering speed and schedule adherence constraints**. PhD Thesis. New Jersey Institute of Technology. USA. January.
- Kulworawanichpong, T. (2015). **Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method**. Journal of Modern Transportation. 23(4): 241–251.
- Kulworawanichpong, T. (2003). **Optimising AC electric railway power flows with power electronic control**. PhD Thesis. University of Birmingham. UK. November.
- Lee C.H., and Wang H.M. (2001) . Effects of grounding schemes on rail potential and stray currents in Taipei Rail Transit Systems. **IEE Proceedings on Electric Power Applications**. 148(2): 148 – 154.
- Leonardo, S. (2013). Analysis of the insulation resistances of a high-speed rail transit system viaduct for the assessment of stray current interference. Part 1: Measurement. **Electric Power Systems Research**. 103, October 2013: 248 – 254.
- Leonardo, S. (2013). Analysis of the insulation resistances of a high-speed rail transit system viaduct for the assessment of stray current interference. Part 2: Modelling Original Research Article. **Electric Power Systems Research**. 103, October 2013: 248 – 254.
- Liu, Y.C., and Chen, J.F. (2005). Control scheme for reducing rail potential and stray current in MRT systems. **IEE Proceedings on Electric Power Applications**. 152(3): 612 – 618.

- Mariscotti A., Reggiani U., Ogunsola A., and Sandrolini L. (2012) Mitigation of electro-magnetic interference generated by stray current from a dc rail traction system. In **Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2012**, (pp. 1 – 6). Pisa, Italy.
- Mu L.H., and Zhouwei, W. (2007). Stray current automatic monitoring system and intelligent obviating current device in metro. In **Proceedings of Power Engineering Conference, 2007**, (pp. 1070 – 1074).
- Mongkoldee K., Leeton U. and Kulworawanichpong T. (2016) Single train movement modeling and simulation with rail potential consideration. In **Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration**, Sapporo, Japan, December 13 – 15, 2016.
- Ogunsola A., Mariscotti, A., and Sandrolini L. (2012). Estimation of Stray Current from a DC-Electrified Railway and Impressed Potential on a Buried Pipe. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 27(4): 2238 – 2246.
- Ogunsola A., Sandrolini L. and Mariscotti A. (2015) Evaluation of stray current from a DC-electrified railway with integrated electric-electromechanical modeling and traffic simulation. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 51(6):
- Petrica Ionut I. Banea, (2015). **Study of Electrical Resistivity of Mature Concrete**. Master's thesis. Delft University of Technology.
- Pham, K.D., Thomas, R.S., and Stinger, W.E. (2001). Analysis of stray current, track-to-earth potentials and substation negative grounding in DC traction electrification system. In **Proceedings of Railroad Conference 2001 (IEEE)**, (pp 141–160).
- Reis, M. (2006). DC traction power negative cable monitoring system. In **Proceedings of Rail Conference 2006 (IEEE/ASME)**, (pp. 225–229).
- Ramos G., Leal A.F., Rios M.A., and Roa, L.F. (2014). Grounding Model in Multi-Train DC Traction Systems. Latin America Transactions. **IEEE Latin America Transactions**. 12(2): 169–175.
- Xu, S.Y., Li, W., and Wang Y.Q. (2013). Effects of Vehicle Running Mode on Rail Potential and Stray Current in DC Mass Transit Systems. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**. 68(8): 3569–3580.

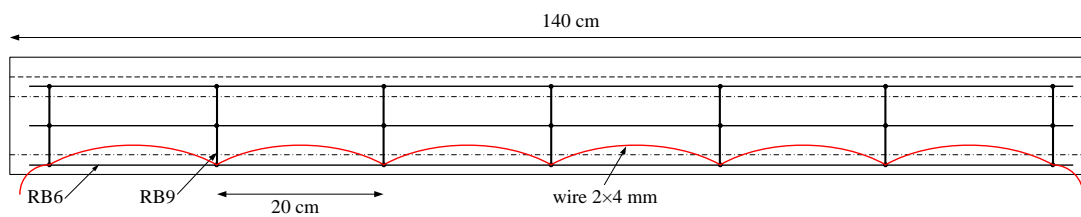
- Sumpavakup, C. Ratniyomchai, T., and Kulworawanichpong, T. (2017). Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy. **Journal of Modern Transportation**. 25(4): 223–235.
- Valero Rodriguez J., Sanz Feito J. (2013). Calculation of remote effects of stray currents on rail voltages in dc railways systems. **Electrical Systems in Transportation**. 3(2): 31 – 40.
- Chen, Z.G., Qin, C.K., Zhang, Y.J., and Yang, X.C. (2010). Application of a stray current monitoring system base upon virtual instrument. **IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL) 2010**, (pp. 341-344).



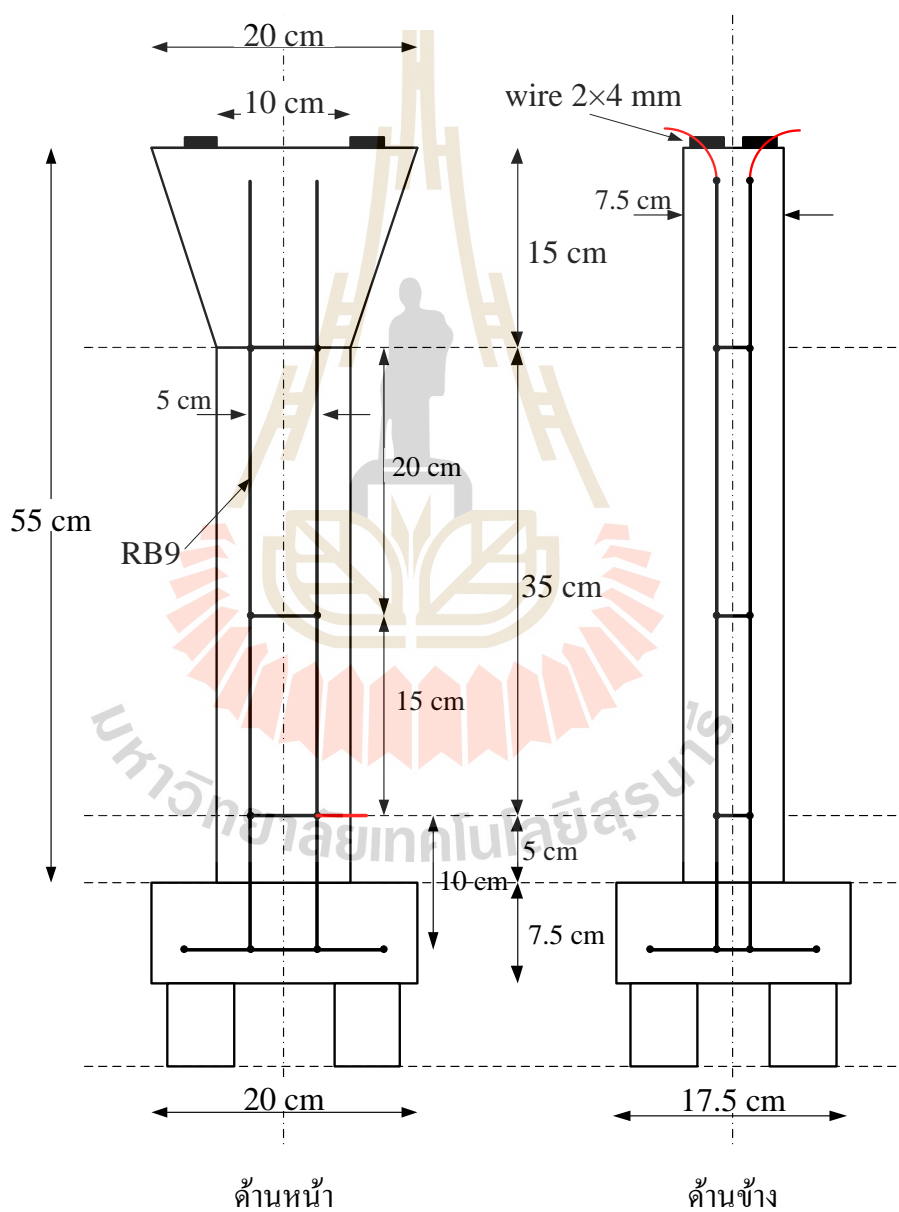
ภาคผนวก ก

ชุดทดสอบโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

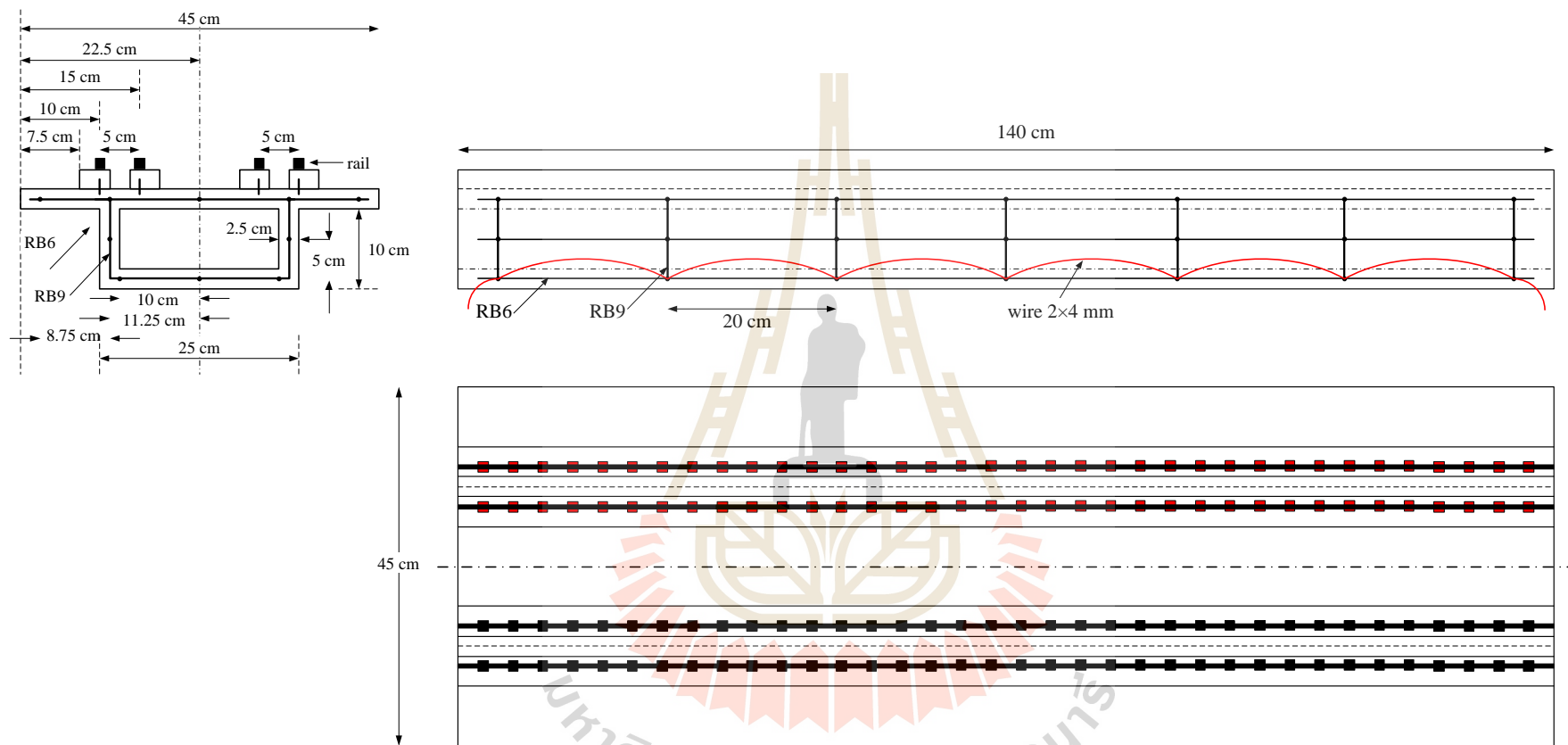


รูปที่ ก.3 ขนาดของทางยกระดับด้านข้างสำหรับ โครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน



รูปที่ ก.4 ขนาดของเสาสำหรับ โครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน





รูปที่ ก.6 ขนาดทางยกระดับในโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน

จากออกแบบโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวส่วนที่มีอัตราส่วนเป็น 5 cm : 1.435 m ดังแสดงในรูปที่ ก.3 – ก.6 มีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

1. เตรียมพื้นที่สำหรับสร้างชุดทดสอบโดยการขุดหลุมเพื่อวางเสาจำนวน 3 หลุมและปรับสภาพดินโดยใช้เกลือเพื่อลดความต้านทานในดิน ดังแสดงในรูปที่ ก.7



รูปที่ ก.7 การเตรียมหลุมสำหรับหล่อเสาทางยกระดับ

2. การตั้งระดับของเสาแต่ละเสา พร้อมเทคอนกรีตเพื่อวางระดับเสาดังรูปที่ ก.8



รูปที่ ก.8 การตั้งระดับของเสา

3. การผูกเหล็กโครงสร้างเสา การเทคอนกรีตบนโครงสร้างรากเสาที่วางไว้ดังรูปที่ ก.9 และรูปที่ ก.10 แสดงการเทคอนกรีตที่ฐานของเสาโครงสร้าง



รูปที่ ก.9 เหล็กโครงสร้างของเสา



รูปที่ ก.10 การเทคอนกรีตที่ฐานเสา

4. การเทแบบเสาคอนกรีตพร้อมการถอดแบบแสดงได้ดังรูปที่ ก.11



รูปที่ ก.11 การหล่อเสาของโครงสร้างทางยกระดับ

5. การสร้างบล็อกและโครงสร้างเหล็กของทางยกระดับได้ดังรูปที่ ก.12 และการเทคอนกรีตลงในแบบทางยกระดับได้ดังรูปที่ ก.13 และการถอดแบบพร้อมสร้างหมอนรองรับรางชนิดคอนกรีตที่ขนานไปกับรางแสดงได้ดังรูปที่ ก.14



รูปที่ ก.12 เหล็กโครงสร้างของทางยกระดับ

รูปที่ ก.13 การเทคอนกรีตของทางยกระดับ



รูปที่ ก.14 การถอดแบบทางยกระดับ

5. ติดตั้งเสากับทางยกระดับดังแสดงได้ดังรูปที่ ก.15



รูปที่ ก.15 ชุดทดสอบโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวข้อย่อยส่วน

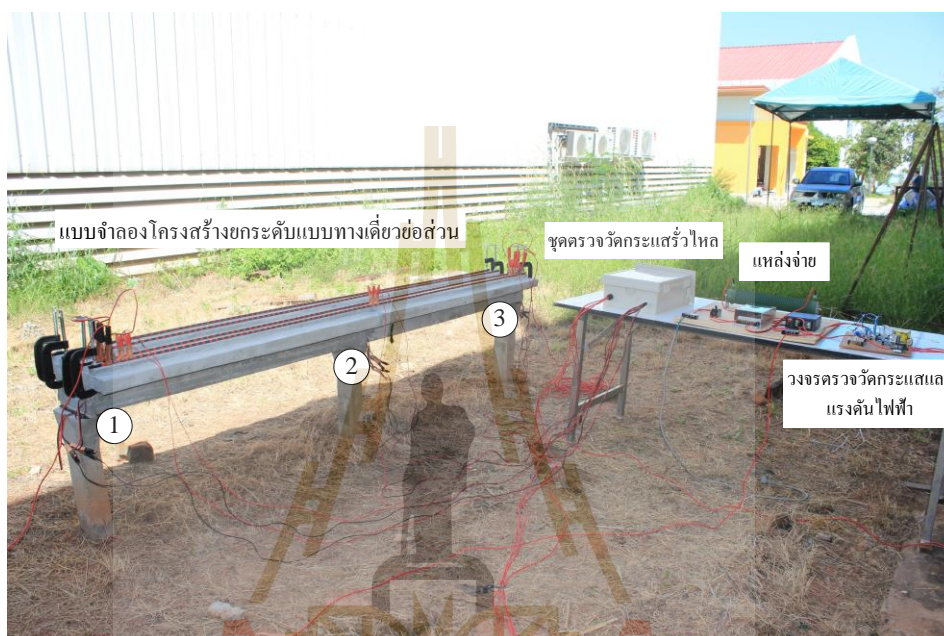
6. การติดตั้งรางวิ่งแสดงได้ดังรูปที่ ก.16



รูปที่ ก.16 ชุดทดสอบโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวข้อย่อยส่วนหลังติดตั้งรางวิ่ง

ก.2 วงจรตรวจวัดกระแสรั่วไหล

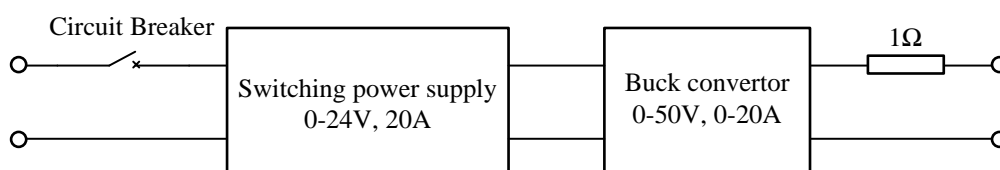
วงจรตรวจวัดกระแสรั่วไหลประกอบไปด้วย แบบจำลองโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยว ย่อส่วน แหล่งจ่าย วงจรตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า และ ชุดตรวจวัดกระแสรั่วไหลแลเก็บข้อมูล แสดงได้ดังรูปที่ ก.17 และรายละเอียดในแต่ละส่วนแสดงได้ดังนี้



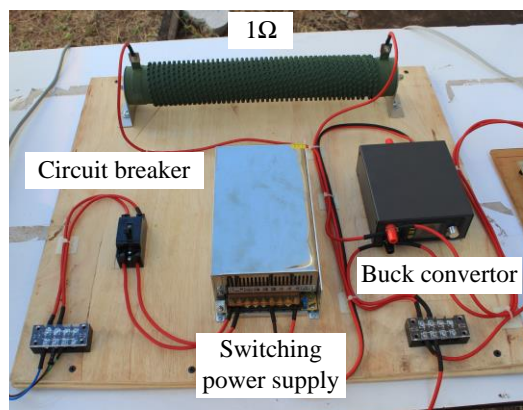
รูปที่ ก.17 ชุดทดสอบกระแสรั่วไหลสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวย่อส่วน

ก.2.1 แหล่งจ่าย

วงจรสำหรับแหล่งจ่ายได้ออกแบบไว้ให้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้มีพิสัยเป็น 0 – 24 V และรับกระแสไฟฟ้าได้ไม่เกิน 20 A ดังแสดงในรูปที่ ก.18 และสามารถสร้างเป็นชุดวงจรแหล่งจ่ายได้ดังรูปที่ ก.19

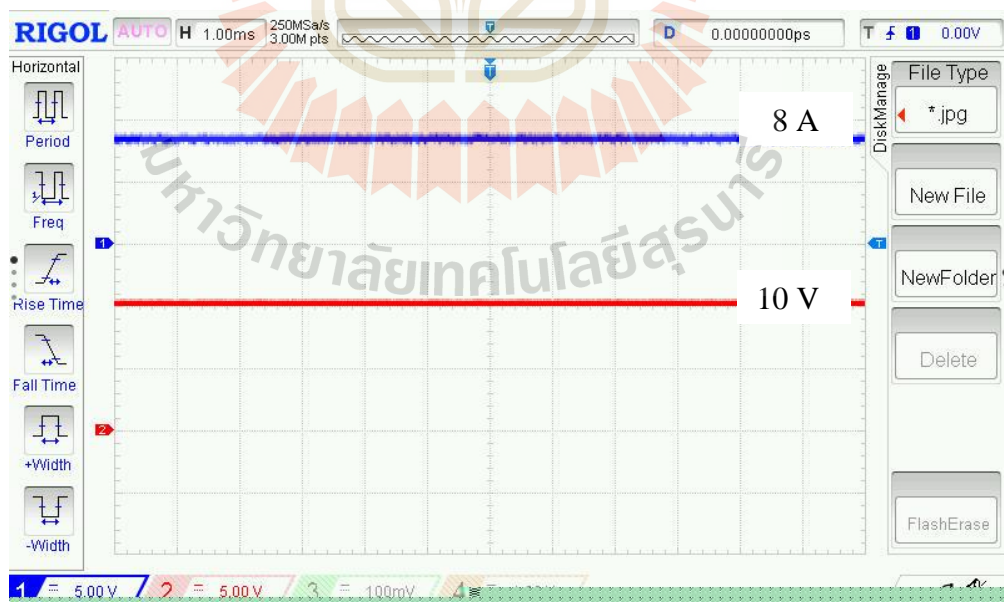


รูปที่ ก.18 วงจรแหล่งจ่าย



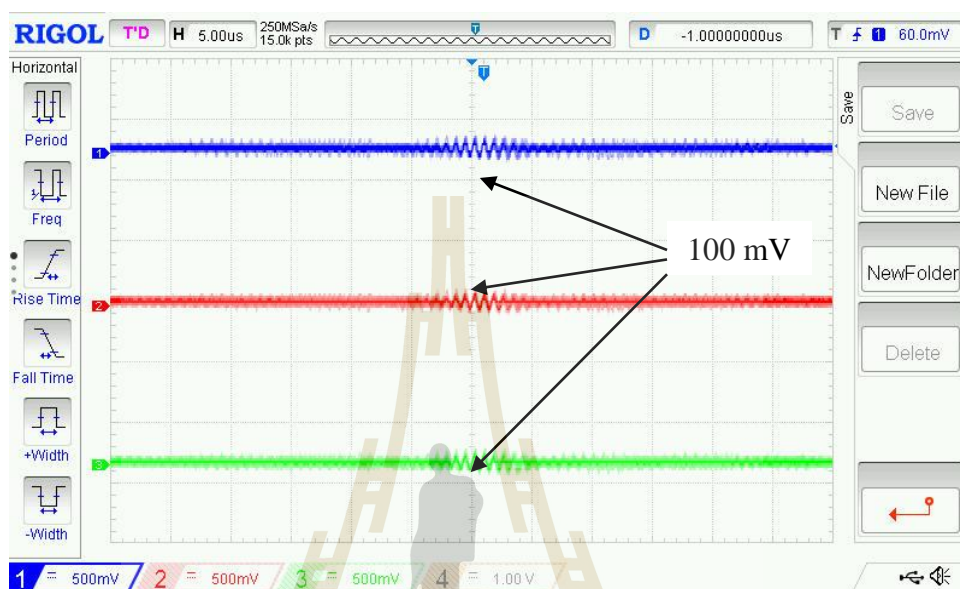
รูปที่ ก.19 ชุดวงจรแหล่งจ่าย

รูปที่ ก.19 ได้แสดงวงจรแหล่งจ่ายซึ่งประกอบไปด้วย เบรกเกอร์ขนาด 20A สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายขนาด 24V 20A วงจรบัลค์ที่สามารถปรับแรงดันได้ 0 - 50V และตัวต้านทานขนาด $1\ \Omega$ และได้ทำการทดสอบชุดวงจรแหล่งจ่ายกับแบบจำลองโครงสร้างยกระดับแบบทางเดียว ย่อส่วนแสดงผลการวัดผ่านออสซิลโลสโคปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก.20 ซึ่งเป็นการทดสอบการปรับแหล่งจ่ายแรงดันไปที่ 10 V และวงจรแหล่งจ่ายได้จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่วจร 8 A

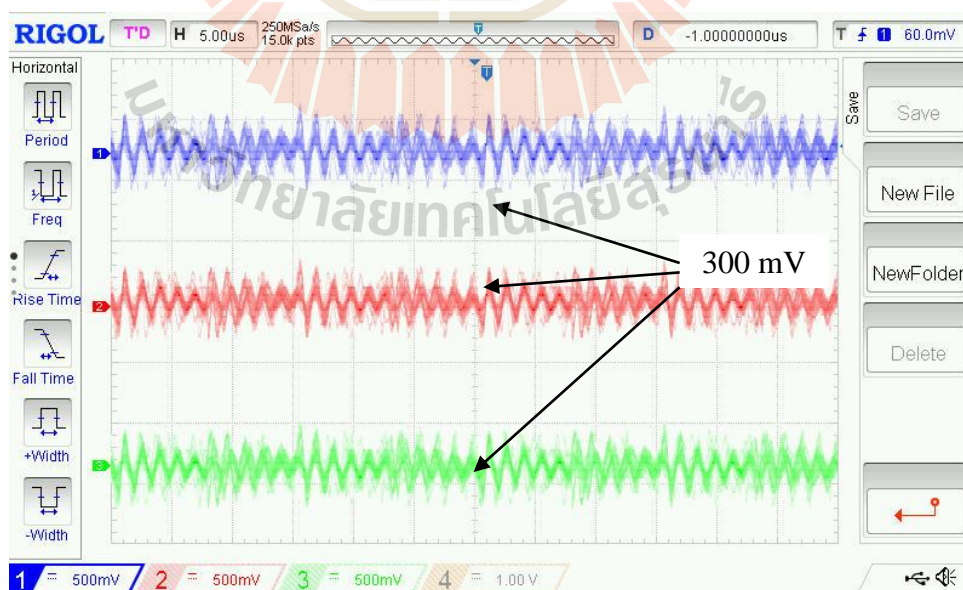


รูปที่ ก.20 การตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าเมื่อจ่ายไฟฟ้าพิกัด 10 V

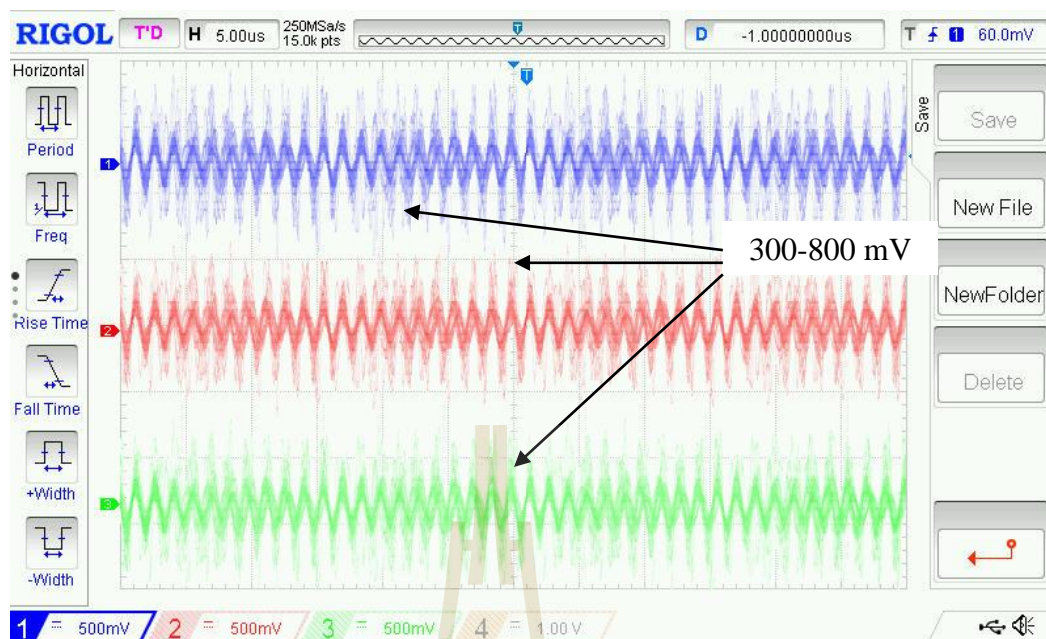
วัดแรงดันไฟฟ้าที่จุดทดสอบกระแสไหลโดยใช้ฮอสซิลโลสโคปในโหมดไม่กรองสัญญาณกรณีที่ไม่จ่ายไฟ จ่ายไฟที่พิกัดแรงดัน 5 V 10 V และ 15 V แสดงได้ดังรูปที่ ก.21 – ก.24 ตามลำดับ เมื่อตำแหน่งการวัดแสดงในรูปที่ ก.17



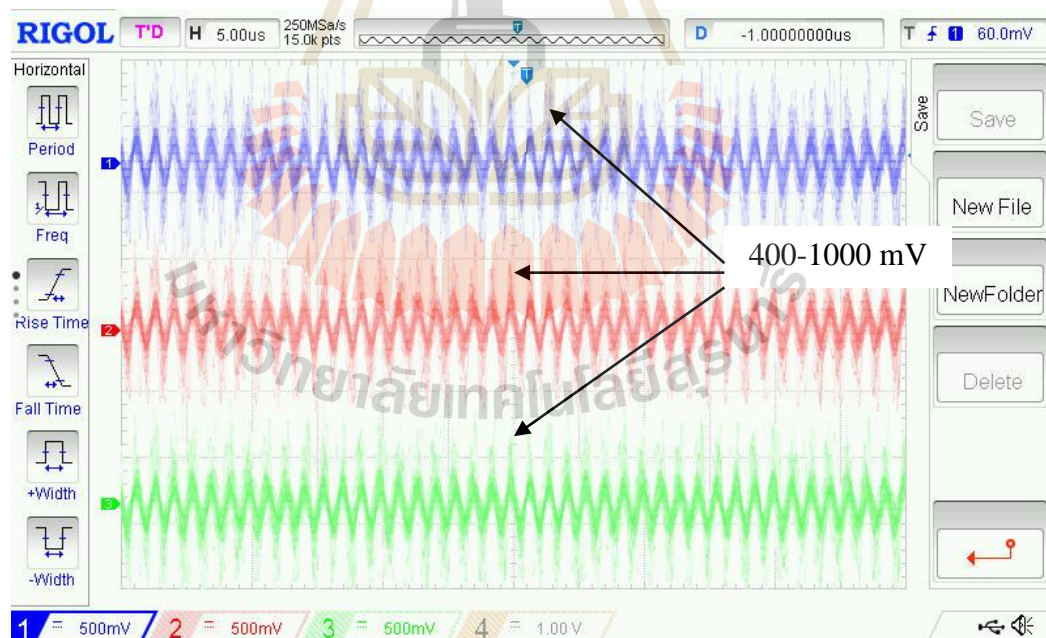
รูปที่ ก.21 การทดสอบกระแสไหลในกรณีที่ไม่จ่ายไฟ



รูปที่ ก.22 การทดสอบกระแสไหลในกรณีที่จ่ายไฟ 5 V

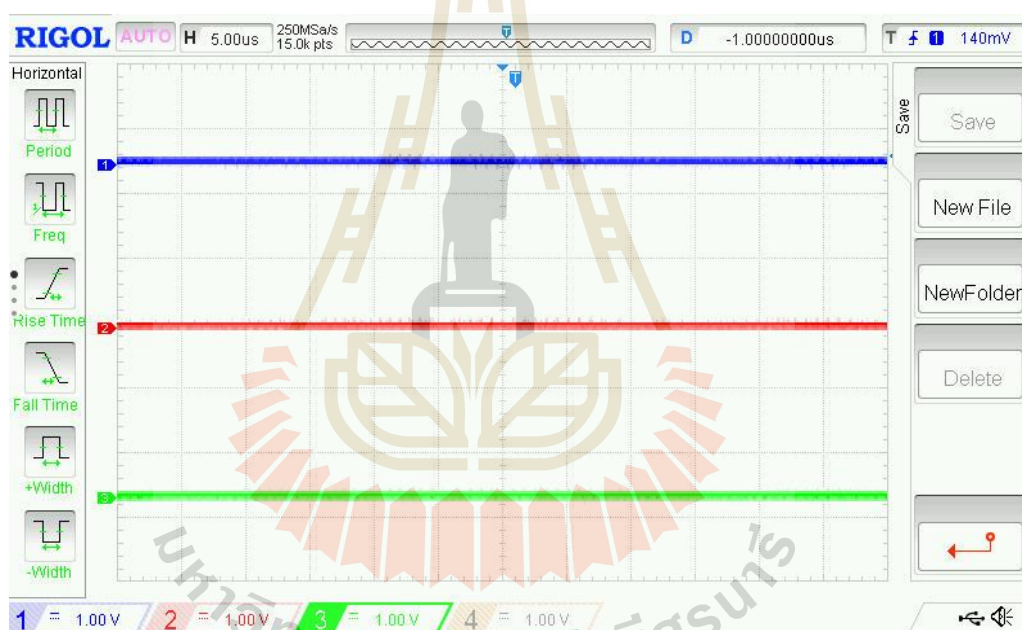


รูปที่ ก.23 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่จ่ายไฟ 10 V



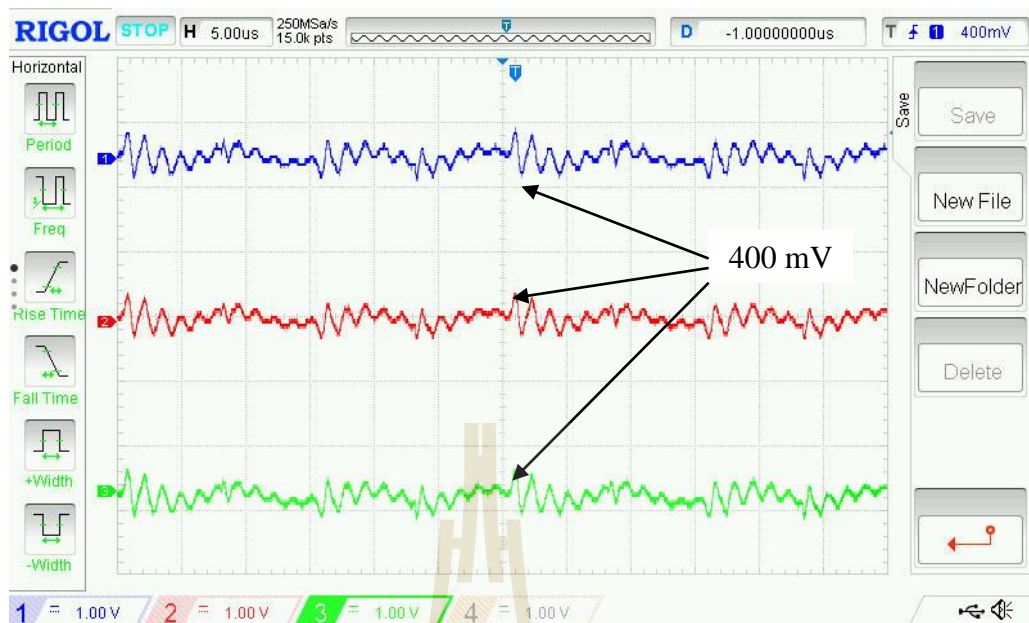
รูปที่ ก.24 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่จ่ายไฟ 15 V

จากผลการทดสอบในกรณีที่ไม่มีกระแสไฟแสดงในรูปที่ ก.21 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้ามาในวงจรประมาณ 100 mV ซึ่งโดยปกติแล้วต้องเป็นศูนย์จากการทดสอบในกรณีที่จ่ายไฟที่พิกัดแรงดัน 5 V 10 V และ 15 V ดังแสดงในรูปที่ ก.22 -ก.23 พบว่าสามารถวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้ามาในวงจรมีขนาดประมาณ 400-1000 mV หรือมากกว่าแต่ไม่สามารถตรวจจับได้แต่สามารถวัดด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์รุ่น FLUKE 179 ได้ประมาณ 180 mVDC และ 2 VAC ดังนั้นสามารถนำค่าดังกล่าวนี้ไปออกแบบสร้างวงจรตรวจวัดแรงดันที่วางได้ นอกจากนี้จากนี้ยังได้ทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ชุดทดสอบกระแสรั่วไหลโดยใช้ฮอสซิลโลสโคปในโหมดกรอสสัญญาณกรณีที่ไม่มีจ่ายไฟ จ่ายไฟที่พิกัดแรงดัน 5 V 10 V และ 15 V แสดงได้ดังรูปที่ ก.25 – ก.28 ตามลำดับ

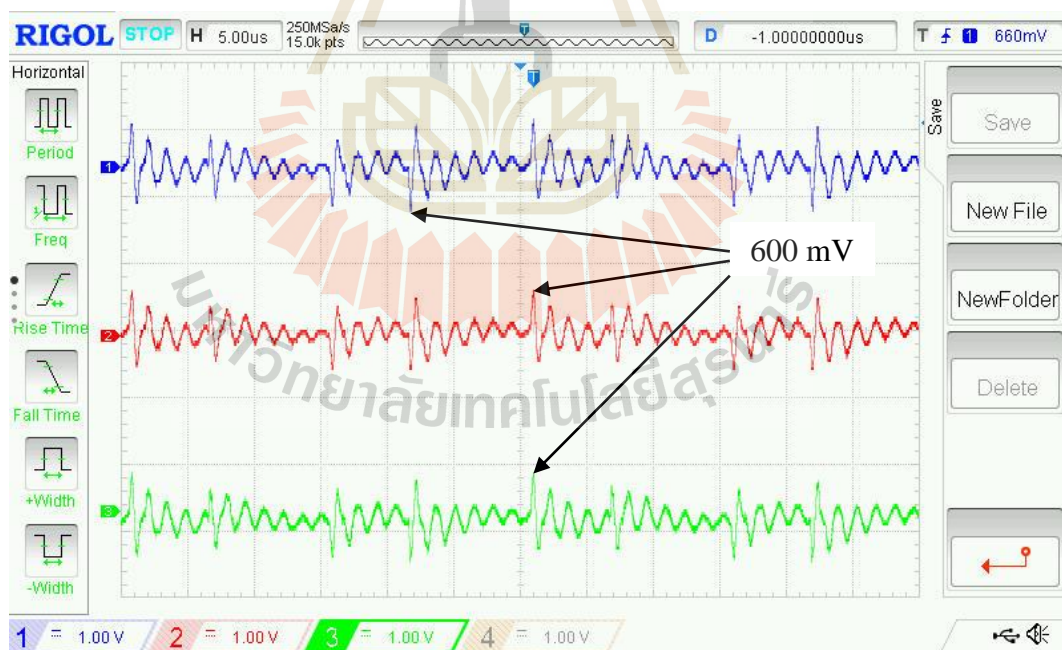


รูปที่ ก.25 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่ไม่มีจ่ายไฟในโหมดกรอสสัญญาณ

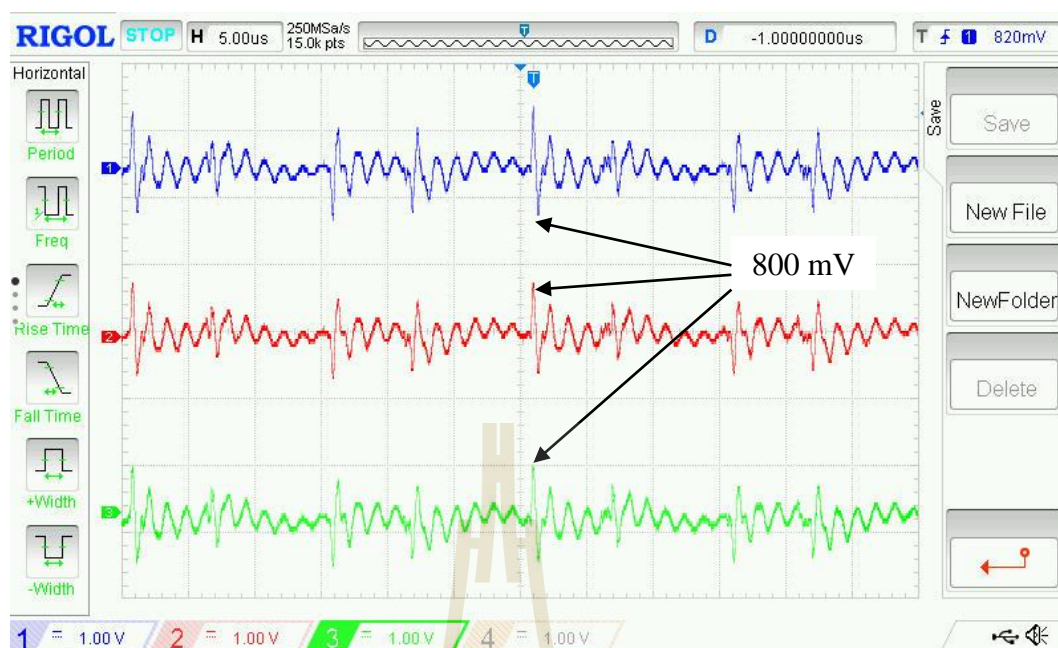
จากผลการวัดแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ฮอสซิลโลสโคปในโหมดกรอสสัญญาณกรณีที่ไม่มีกระแสไฟแสดงในรูปที่ ก.25 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเป็นศูนย์โดยที่ไม่มีสัญญาณรบกวน และกรณีที่จ่ายไฟ 5 V 10 V และ 15 V สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้เป็น 400 mV 600 mV และ 800 mV ตามลำดับ



รูปที่ ก.26 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่จ่ายไฟ 5 V ในโหมดกรองสัญญาณ



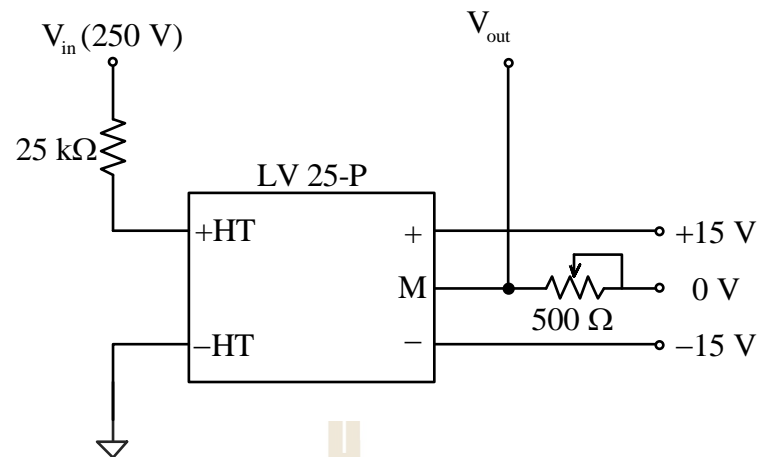
รูปที่ ก.27 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่จ่ายไฟ 10 V ในโหมดกรองสัญญาณ



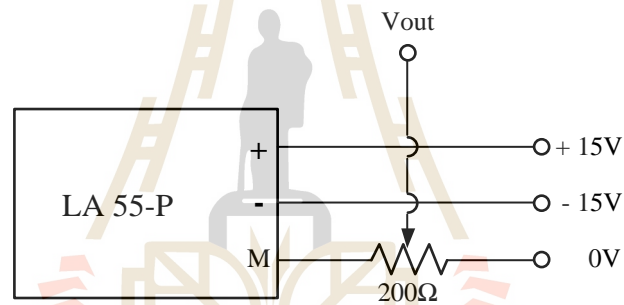
รูปที่ ก.28 การทดสอบกระแสรั่วไหลในกรณีที่จ่ายไฟ 15 V ในโหมดกรองสัญญาณ

ก.2.2 ชุดวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

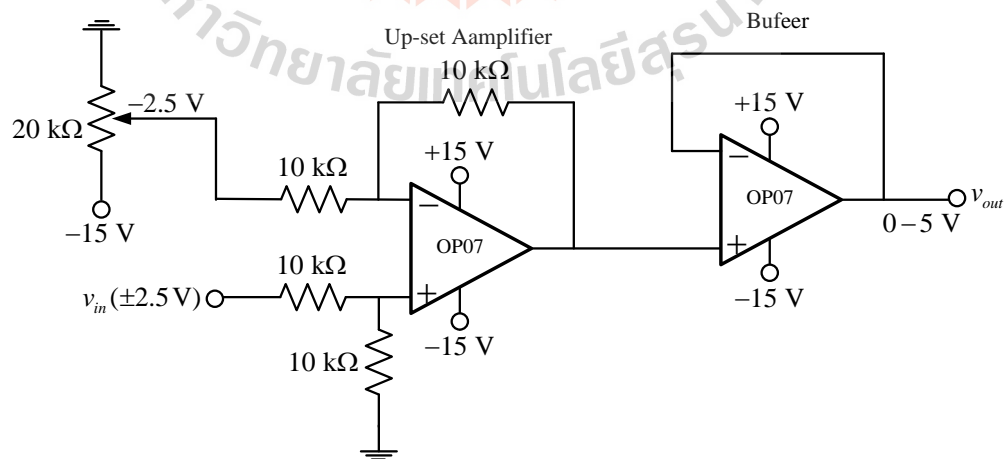
วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าได้เลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P โดยแสดงวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้างดรูปที่ ก.29 ซึ่งได้กำหนดพิสัยการตรวจวัดไว้ที่ ± 30 V และวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้าได้เลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ LA 55-P ดังรูปที่ ก.30 ซึ่งได้กำหนดพิสัยการตรวจวัดไว้ที่ ± 30 A โดยที่ทั้งสองวงจรนี้ต้องใช้งานร่วมกับวงจรปรงแต่งสัญญาณเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0-5 V สำหรับใช้งานร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ดังแสดงในรูปที่ ก.31 ดังนั้นชุดวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ ก.32 ซึ่งประกอบไปด้วย วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า วงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า วงจรปรงแต่งสัญญาณ และแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง -15 0 +15 V



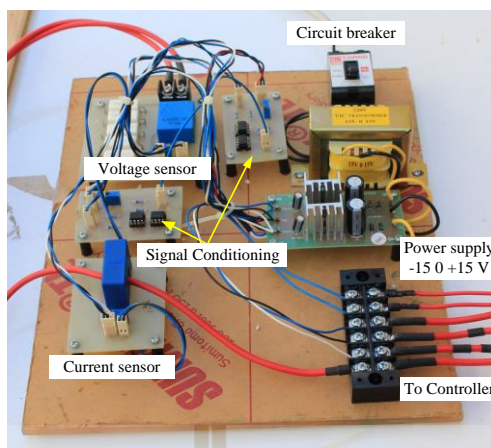
รูปที่ ก.29 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P



รูปที่ ก.30 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าเบอร์ LA 55-P



รูปที่ ก.31 วงจรปรับแต่งสัญญาณ

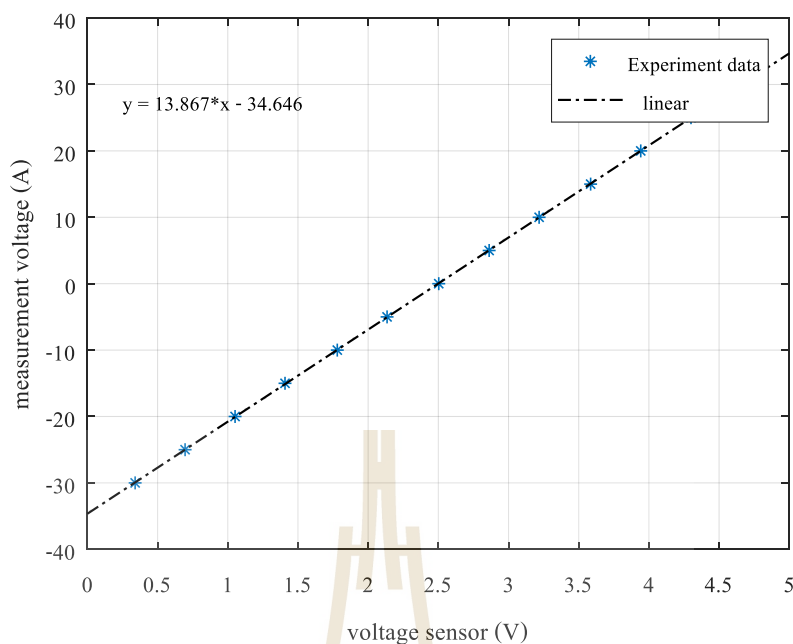


รูปที่ ก.32 ชุดวงจรตรวจจับกระแสและแรงดันไฟฟ้า

ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามตารางที่ ก.1 แสดงการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าในย่าน -30 ถึง 30 V ซึ่งผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าสามารถนำไปพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ ก.33

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้า (V)	แรงดันไฟฟ้าจากวงจรแปลงสัญญาณ (V)
-30	0.3401
-25	0.6960
-20	1.0520
-15	1.4078
-10	1.7802
-5	2.1348
0	2.5030
5	2.8620
10	3.2180
15	3.5850
20	3.9420
25	4.300
30	4.6580



รูปที่ ก.33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์

จากรูปที่ ก.33 สามารถหาสมการเชิงเส้นเพื่อแทนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเซนเซอร์ได้จากสมการต่อไปนี้

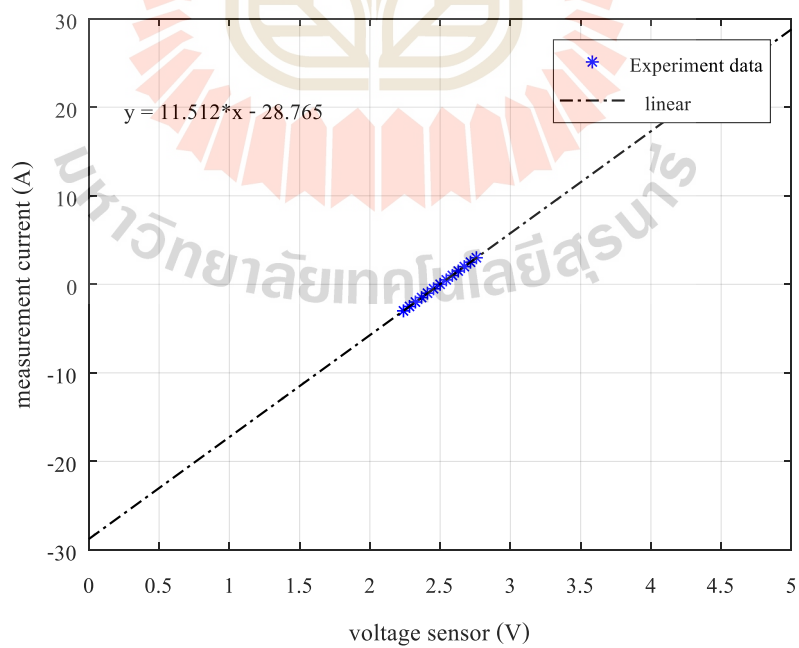
$$v_{in} = 13.867 \times v_{sensor} - 34.646 \quad (ก.1)$$

ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามตารางที่ 2 แสดงการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าในย่าน -3.0 ถึง 3.0 A ซึ่งผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าสามารถนำไปพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ ก.34 โดยการขยายแรงดันจากวงจรแปลงสัญญาณให้อยู่ในช่วง 0 – 5 V และสามารถหาสมการเชิงเส้นเพื่อแทนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเซนเซอร์ได้จากสมการที่ (ก.2)

$$i_{in} = 11.512 \times v_{sensor} - 28.765 \quad (ก.2)$$

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

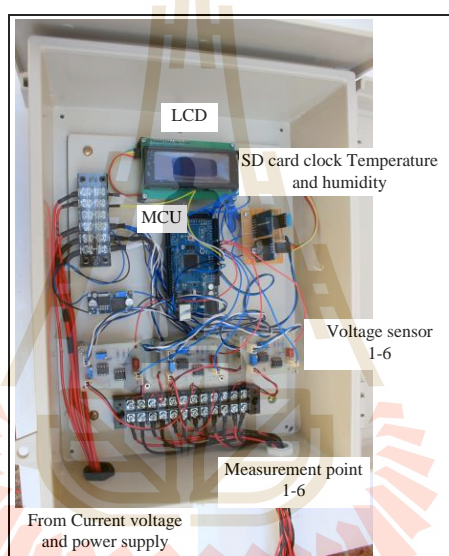
กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้าจากวงจรแปลงสัญญาณ (V)
-3.0	2.239
-2.5	2.282
-2.0	2.324
-1.5	2.368
-1.0	2.410
-0.5	2.453
0	2.5
0.5	2.544
1.0	2.587
1.5	2.629
2.0	2.672
2.5	2.716
3.0	2.758



รูปที่ ก.34 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์

ก.3.3 ชุดตรวจวัดกระแสรั่วไหล

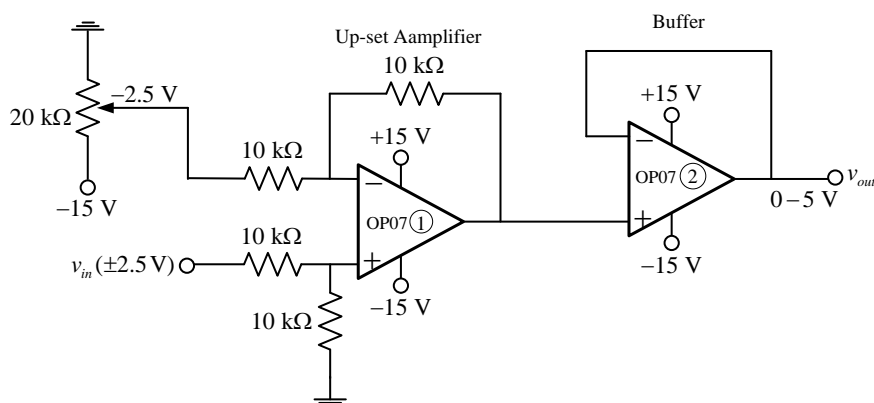
กระแสรั่วไหลของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงจะตรวจวัดอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นชุดตรวจวัดกระแสรั่วไหลจึงใช้วงจรสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ ก.35 ซึ่งประกอบไปด้วย วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอน วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบขยาย ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Mega 2560 โมดูล SD Card รุ่น SPI Reader mini SD Memory Card TF Memory Card Shield Module for Arduino โมดูล clock รุ่น DS3231 AT24C32 IIC และ โมดูลอุณหภูมิและความชื้นรุ่น DHT11 Arduino Digital โดยมีรายละเอียดของวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอนและวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบขยายดังต่อไปนี้



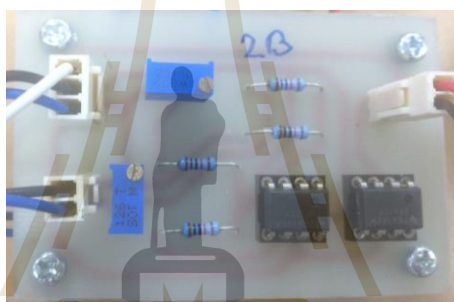
รูปที่ ก.35 ชุดตรวจวัดกระแสรั่วไหล

1. วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอน

เป็น วงจรที่ลดทอน สัญญาณ จาก $\pm 20\text{ V}$ เป็น 0 ถึง 5 V เพื่อใช้กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้วงจรผลต่างเพื่อขยายระดับแรงดัน (Up-set amplifier) รวมวงจรบัพเฟออร์ ซึ่งได้เลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ OP07 โดยกำหนดให้แรงดันอินพุตที่เข้าลดทอนสัญญาณลงโดยใช้ วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage division) จาก $\pm 20\text{ V}$ เป็น $\pm 2.5\text{ V}$ แล้วนำสัญญาณที่ได้เข้าที่ขาบวกของ ออปแอมป์ และใช้วงจรแบ่งแรงดันให้มีพิกัด -2.5 V เข้าที่ขาลบของออปแอมป์ สัญญาณที่ได้จาก ออปแอมป์ตัวที่ 1 จะกลับเฟส ดังนั้นต้องต่อด้วยวงจรบัพเฟออร์เพื่อกลับเฟสอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ ก.36



รูปที่ ก.36 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอน



รูปที่ ก.37 ชุดวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอน

ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของวงจรตรวจจำแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามตารางที่ ก.3 แสดงการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าในย่าน -20 V ถึง 20 V ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าสามารถนำไปพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ ก.38 – ก.40 ซึ่งสามารถหาสมการเชิงเส้นเพื่อแทนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ของวงจรลดทอนสัญญาณตัวที่ 1 2 และ 3 ได้ดังสมการที่ (ก.3) (ก.4) และ (ก.5) ตามลำดับ

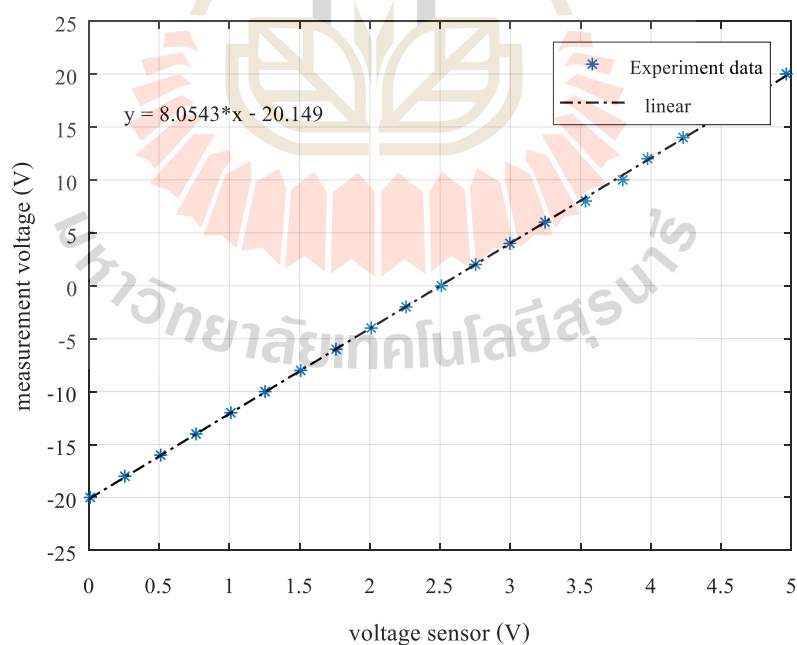
$$v_{in} = 8.0543 \times v_{\text{sensor}} - 20.149 \quad (\text{ก.3})$$

$$v_{in} = 8.0691 \times v_{\text{sensor}} - 20.148 \quad (\text{ก.4})$$

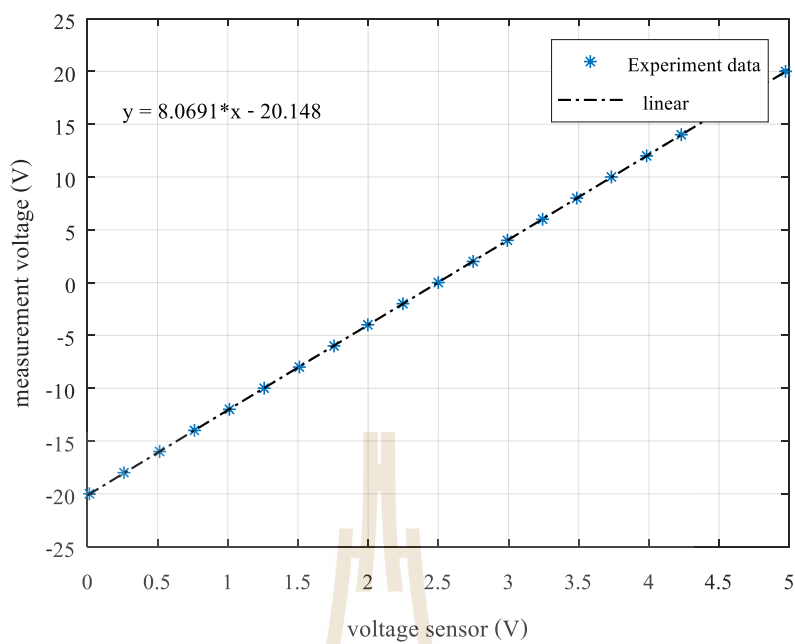
$$v_{in} = 8.0699 \times v_{\text{sensor}} - 20.183 \quad (\text{ก.5})$$

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าของชุดวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอน

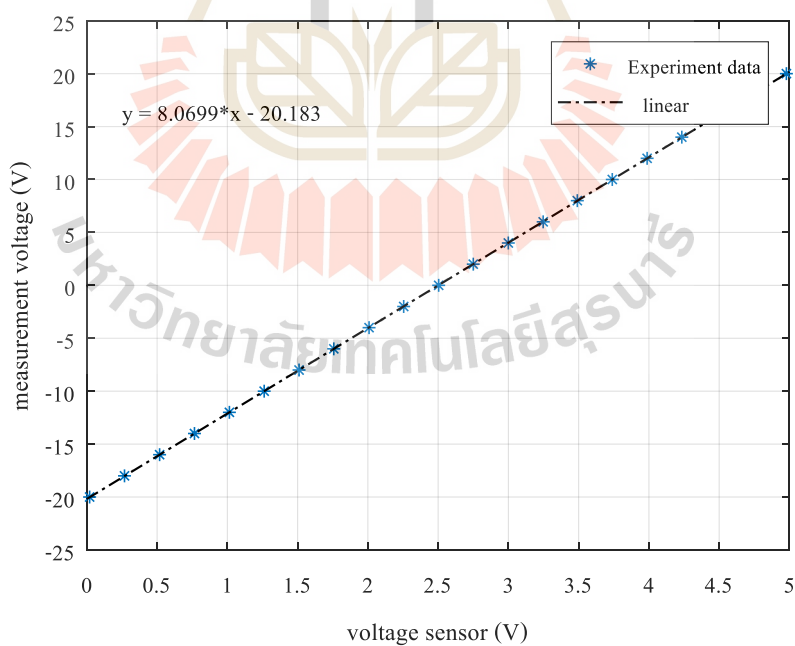
แรงดันไฟฟ้า (V)	วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า (V)		
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
-20	0.0099	0.0142	0.0198
-16	0.5115	0.5145	0.5178
-12	1.0109	1.0118	1.0144
-8	1.5075	1.5102	1.5102
-4	2.0095	11.9978	2.0084
0	2.5090	2.4999	2.5038
4	2.9965	2.9918	2.9994
8	3.5344	3.4862	3.4905
12	3.9760	3.9839	3.9873
16	4.4708	4.4803	4.4818
20	4.9638	4.9735	4.9784



รูปที่ ก.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์
ของวงจรลดทอนสัญญาณตัวที่ 1



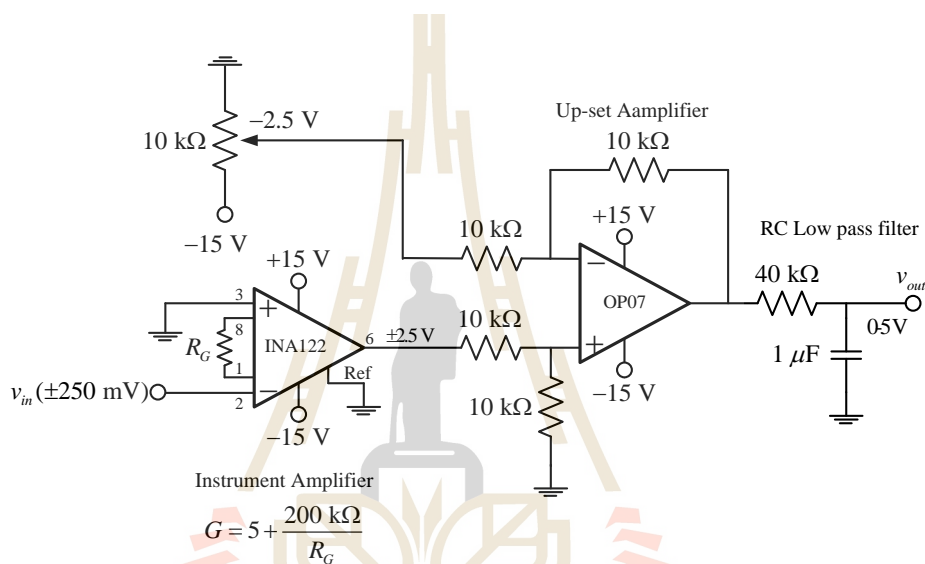
รูปที่ ก.39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์
ของวงจรลดทอนสัญญาณตัวที่ 2



รูปที่ ก.40 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์
ของวงจรลดทอนสัญญาณตัวที่ 3

2. วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบขยาย

วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบขยายเป็นวงจรที่ขยายสัญญาณจาก ± 250 mV เป็น 0 - 5 V เพื่อใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ INA122 เป็นตัวขยายสัญญาณจาก ± 250 mV เป็น ± 2.5 V รวมวงจรผลต่างเพื่อยกระดับแรงดันซึ่งได้เลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ OP07 และวงจรกรองสัญญาณ RC โดยกำหนดให้ความถี่ตัดผ่านเป็น 40Hz เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากไฟบ้าน(50Hz) ดังนั้น $R = 40$ k Ω และ $C = 1$ μ F ดังแสดงในรูปที่ ก.41 และรูปที่ ก.42 แสดงชุดวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบขยาย



รูปที่ ก.41 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบขยาย

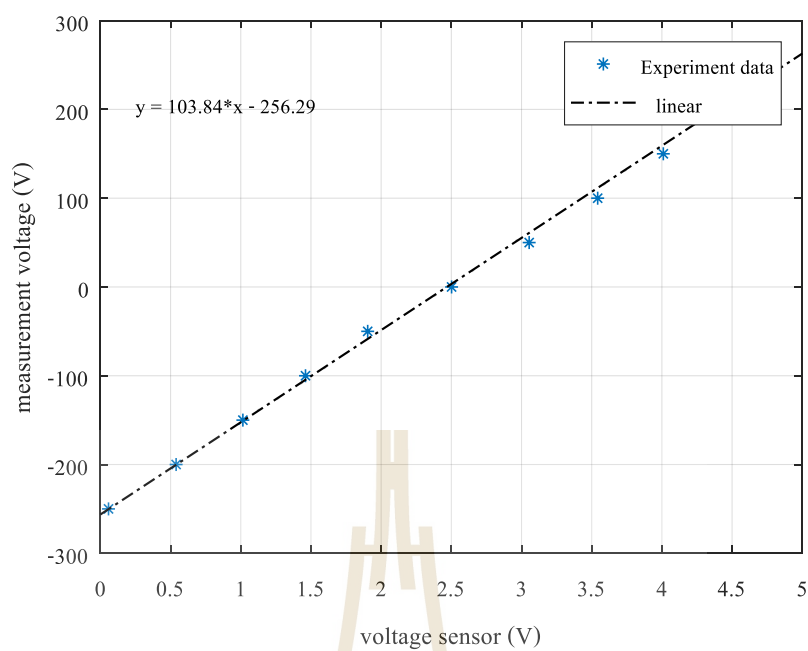


รูปที่ ก.42 ชุดวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบขยาย

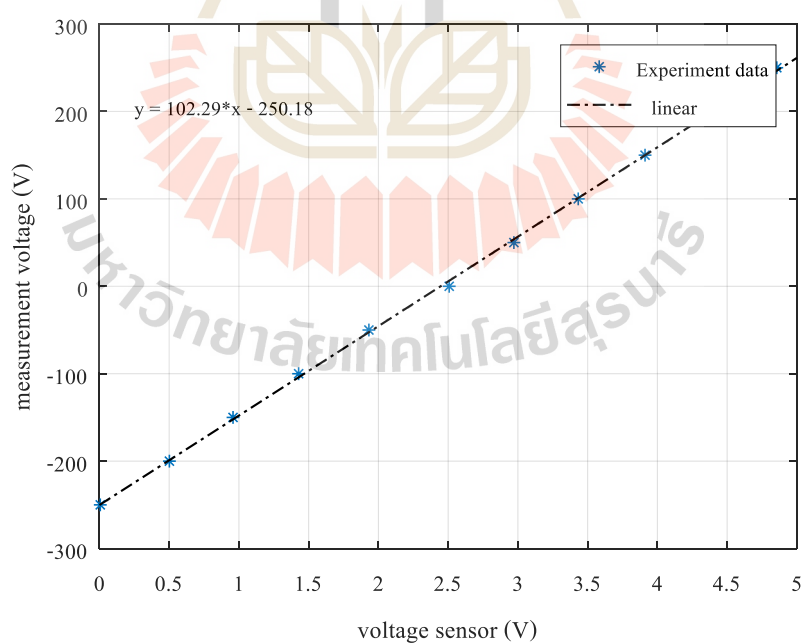
ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของวงจรตรวจจำแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามตารางที่ ก.4 แสดงการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าในย่าน -250 mV ถึง 250 mV ซึ่งผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าสามารถนำไปพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ ก.43 ก.44 และ ก.45

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าของชุดวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบขยาย

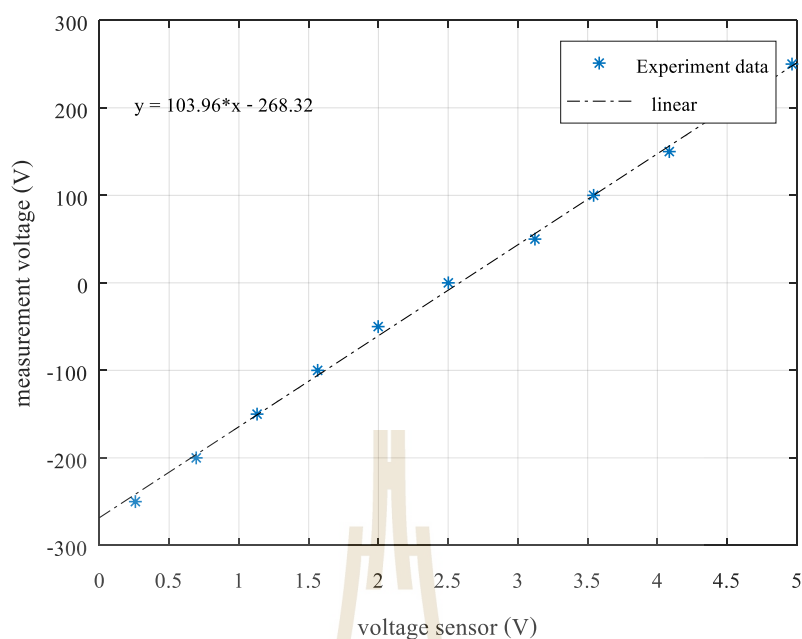
แรงดันไฟฟ้า (mV)	การวัดแรงดันไฟฟ้า (V)		
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
-250	0.0579	0.0060	0.2576
-200	0.5395	0.5015	0.6938
-150	1.0150	0.9578	1.1301
-100	1.4612	1.4280	1.5643
-50	1.9042	1.9318	1.9983
0	2.5018	2.5076	2.5012
50	3.0546	2.9713	3.1221
100	3.5426	3.4326	3.5428
150	4.0102	3.9115	4.0855
200	4.3401	4.3985	4.5302
250	4.7215	4.8560	4.9652



รูปที่ ก.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์
ของวงจรขยายสัญญาณตัวที่ 1



รูปที่ ก.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์
ของวงจรขยายสัญญาณตัวที่ 2



รูปที่ ก.45 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์
ของวงจรขยายสัญญาณตัวที่ 3

จากรูปที่ ก.43 - ก.45 สามารถหาสมการเชิงเส้นเพื่อแทนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ของวงจรขยายสัญญาณตัวที่ 1 2 และ 3 ได้จากสมการที่ (ก.6) (ก.7) และ (ก.8) ตามลำดับ

$$v_{in} = 103.84 \times v_{sensor} - 256.29 \quad (\text{ก.6})$$

$$v_{in} = 102.29 \times v_{sensor} - 250.18 \quad (\text{ก.7})$$

$$v_{in} = 103.96 \times v_{sensor} - 268.32 \quad (\text{ก.8})$$

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบกระแสร่วงไหลและการวัดค่าความต้านทาน

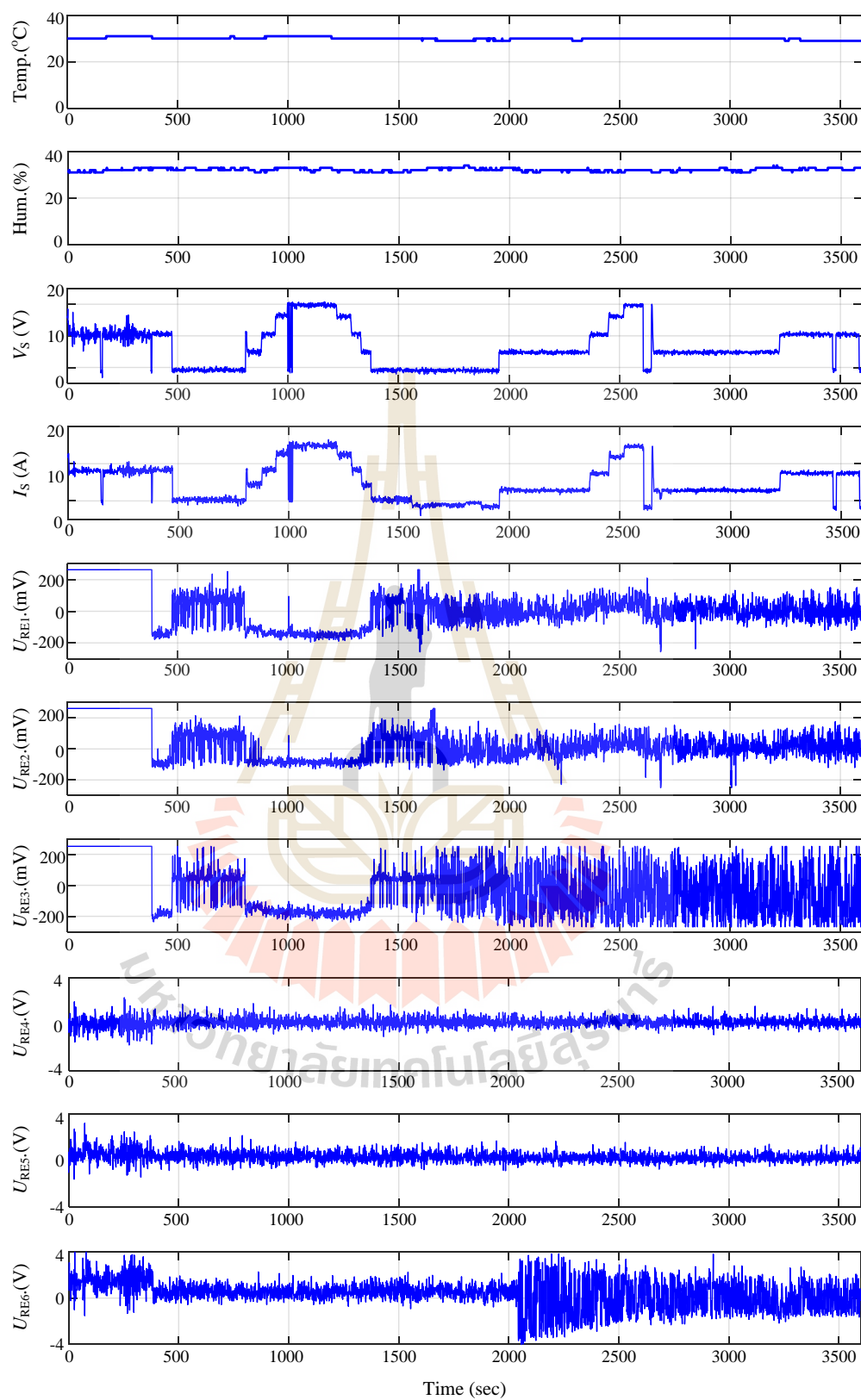
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.1 ผลการทดสอบกระแสรั่วไหล

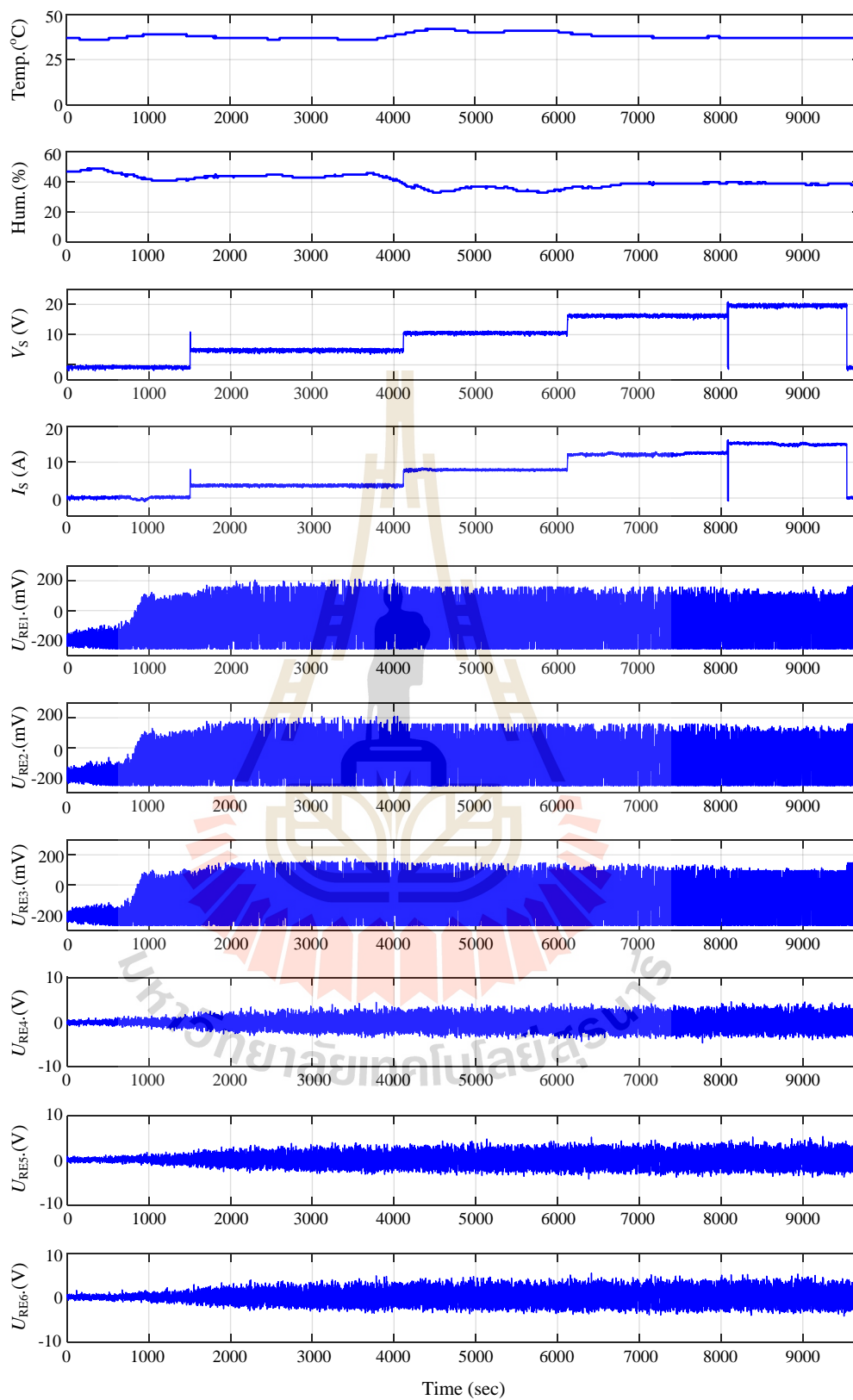
การทดสอบเมื่อมีการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจะทำการทดสอบตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่รางเทียบโครงสร้างดินในกรณีจ่ายไฟที่พิกัดแรงดัน 5 V 10 V และ 15 V โดยชุดทดสอบนี้สามารถตรวจจับอุณหภูมิ ความชื้น แรงดันและกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายและแรงดันไฟฟ้าที่รางจำนวน 6 จุด ซึ่งมีการทดสอบในวันที่ 1/11/2018 ดังแสดงในรูปที่ ข.1 การทดสอบในวันที่ 16/11/2018 ดังแสดงในรูปที่ ข.2 ทดสอบตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่รางเทียบโครงสร้างดินในกรณีจ่ายไฟที่พิกัดแรงดัน 0 20 5 15 และ 10 V ตามลำดับ โดยทดสอบในวันที่ 14/12/2018 ดังรูปที่ ข.3 และทดสอบตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่รางเทียบโครงสร้างดินในกรณีจ่ายไฟที่พิกัดแรงดัน 0 V 5 V 10 V 15 V และ 20 V ตามลำดับ โดยทดสอบในวันที่ 14/01/2019 ดังรูปที่ ข.4

การทดสอบเมื่อแรงดันไฟฟ้าคงที่ 10 V โดยทำการตรวจจับอุณหภูมิ ความชื้น แรงดันและกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายและแรงดันไฟฟ้าที่รางจำนวน 3 จุดวัด แต่ละจุดมีเซนเซอร์ตรวจจับ 2 ตัว ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ ข.5-ข.7

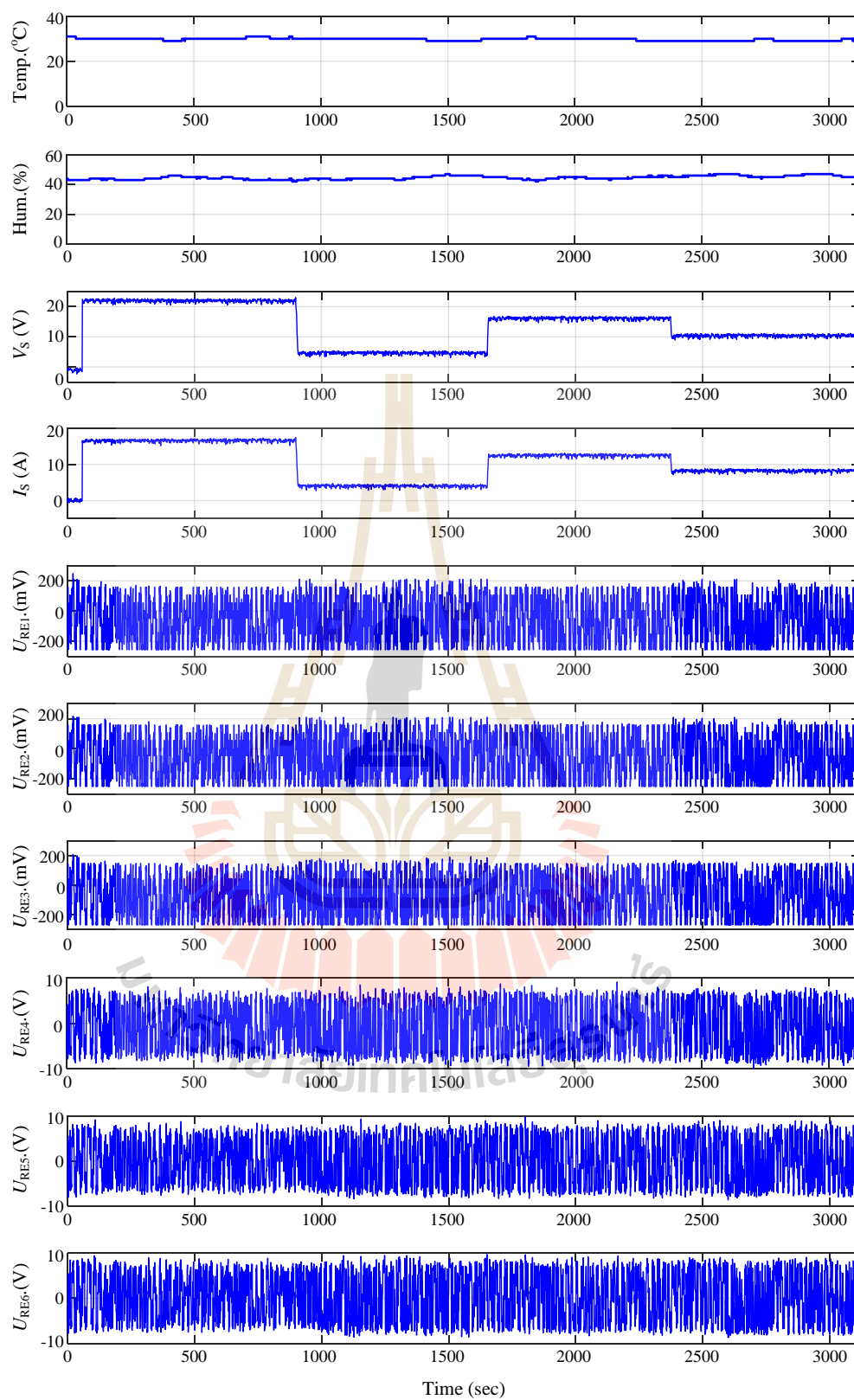




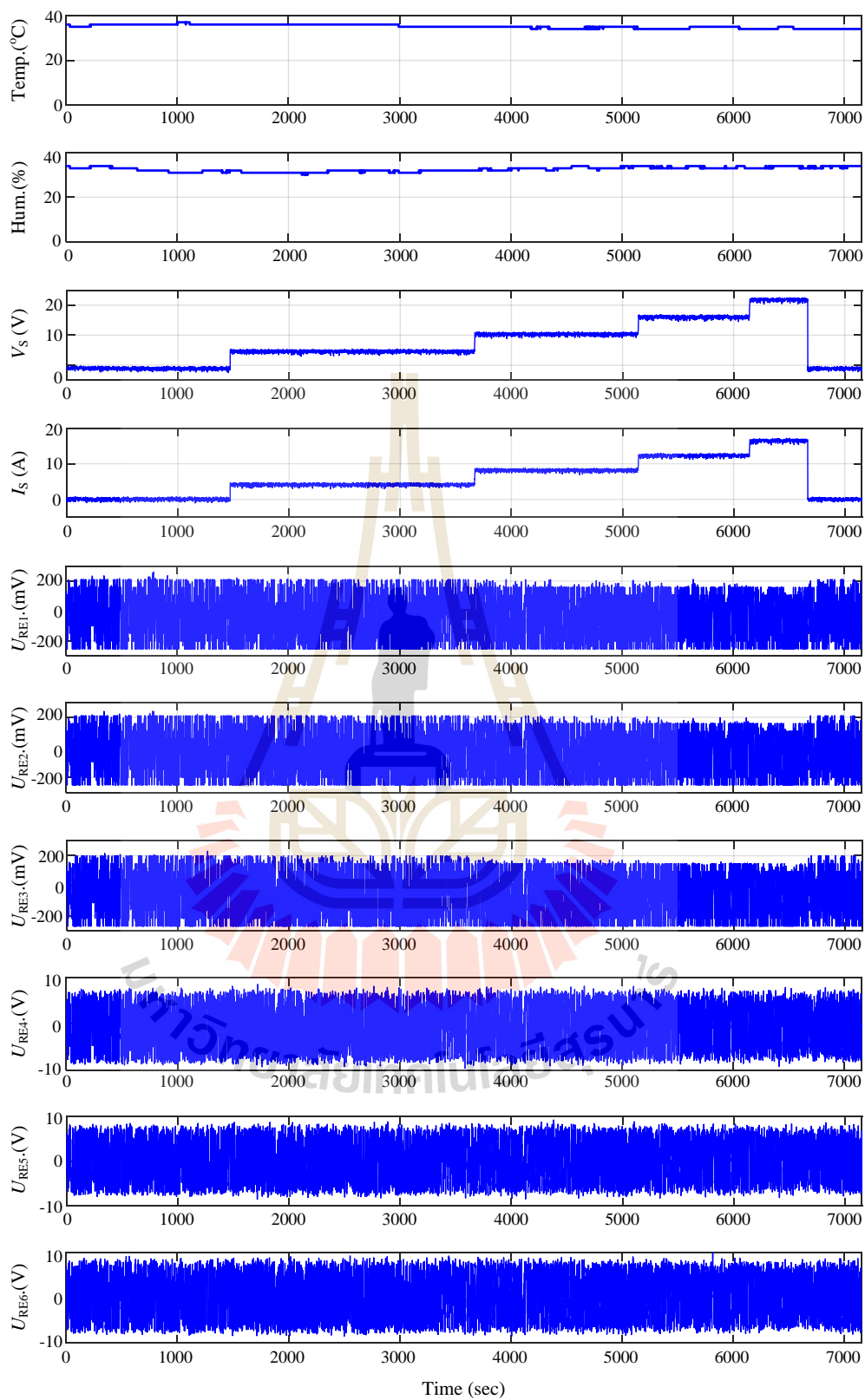
รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบวันที่ 1/11/2018



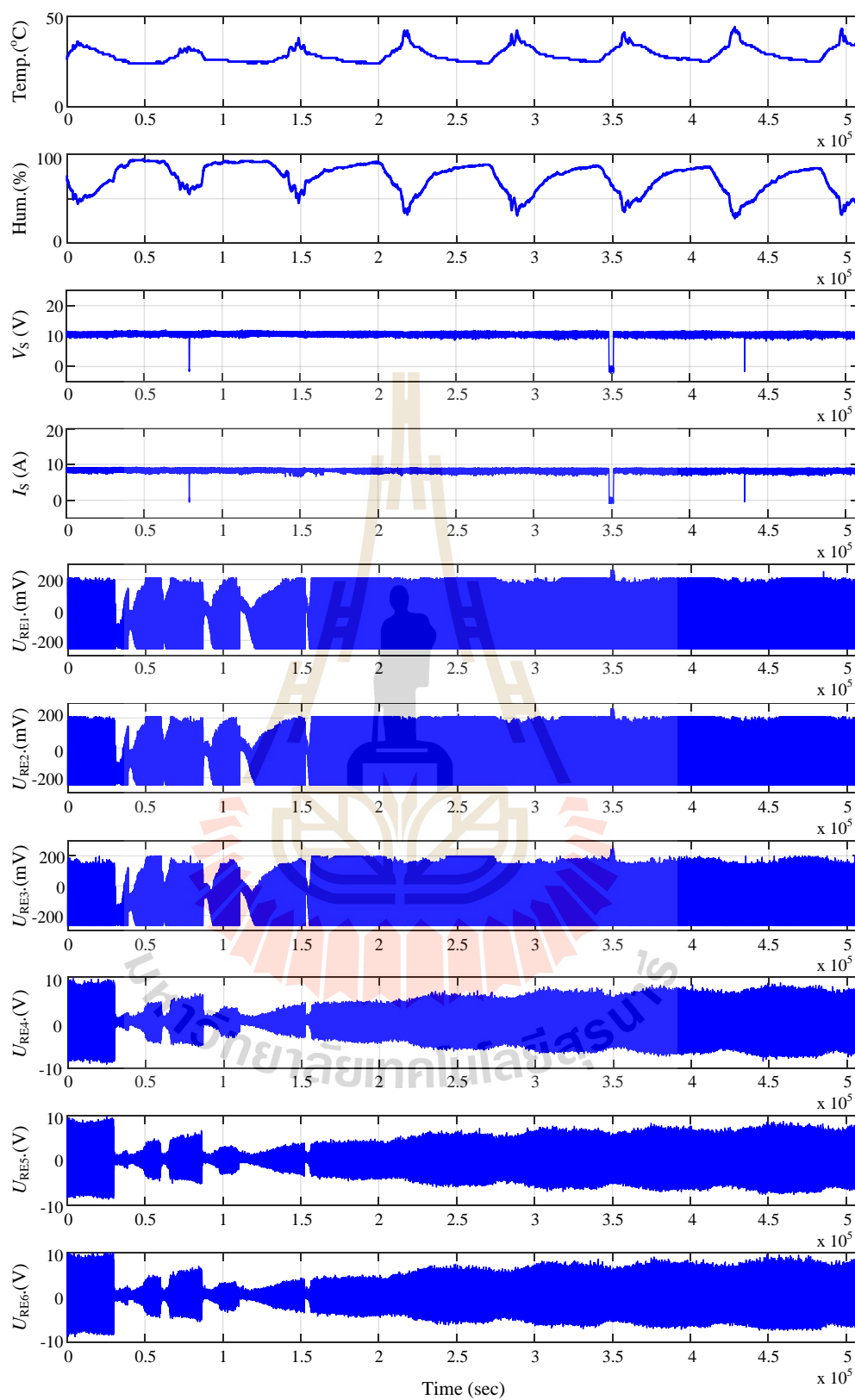
รูปที่ ข.2 ผลการทดสอบวันที่ 16/11/2018



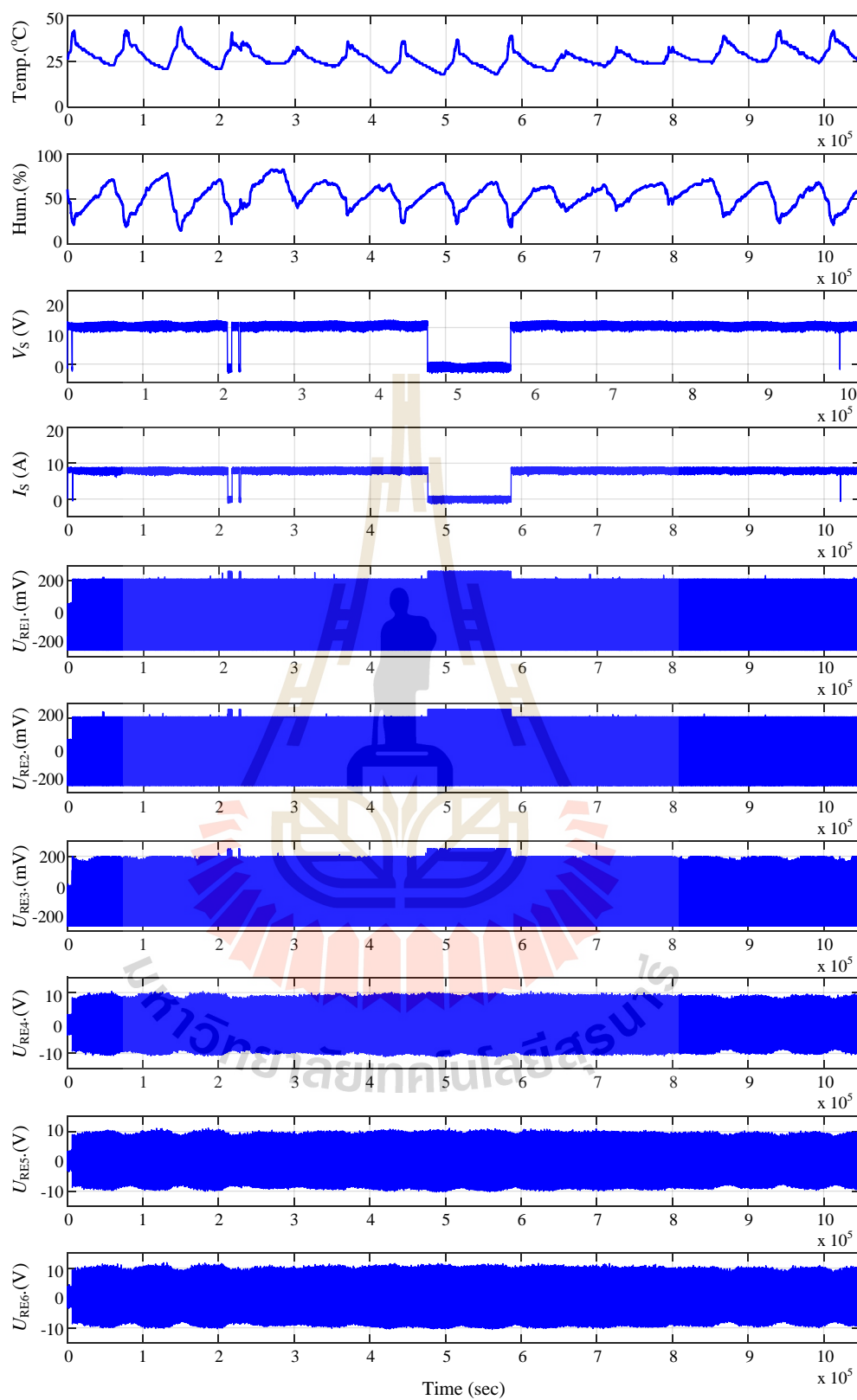
รูปที่ ข.3 ผลการทดสอบวันที่ 14/12/2018



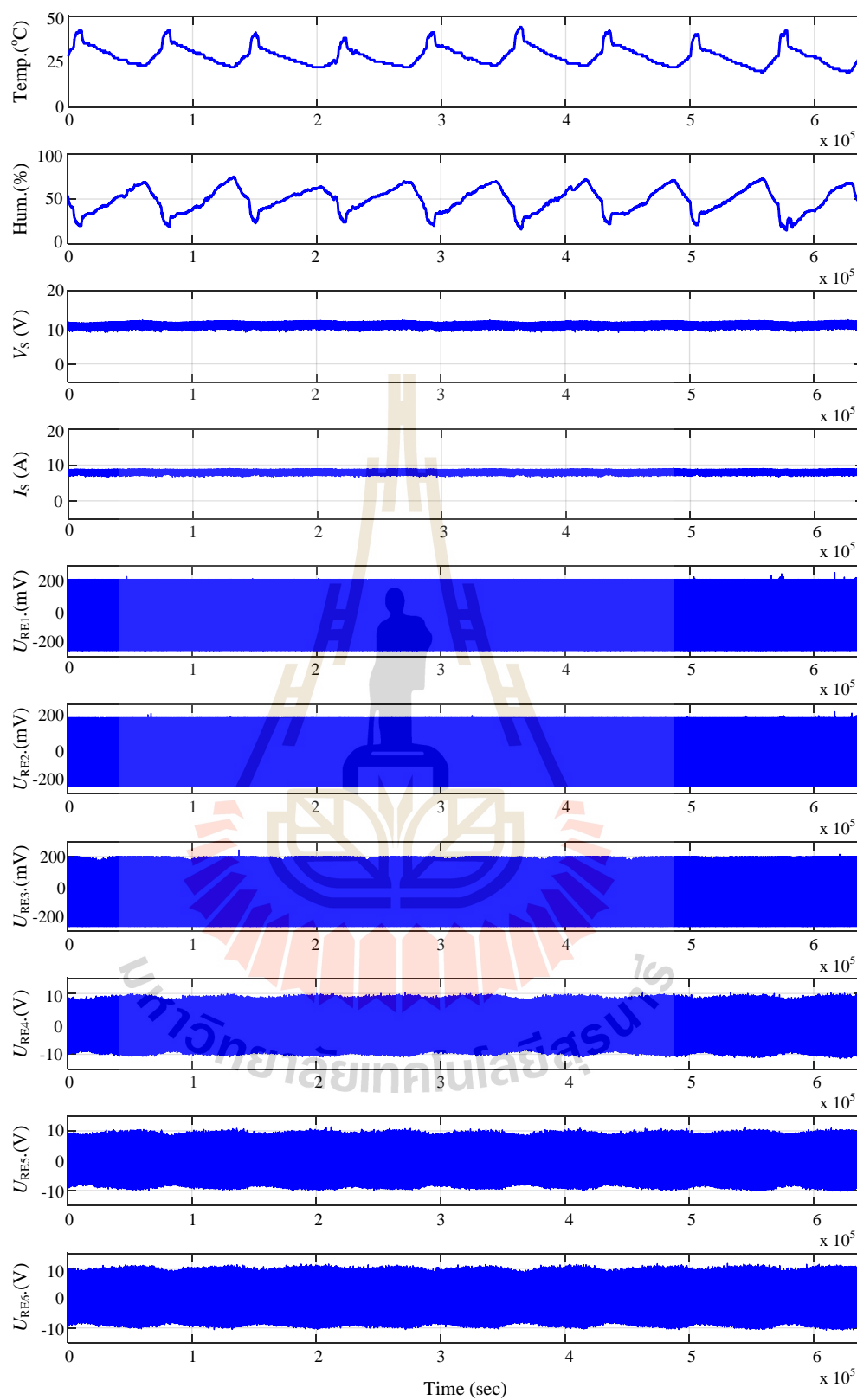
รูปที่ ข.4 ผลการทดสอบวันที่ 14/01/2019



รูปที่ ข.5 ผลการทดสอบวันที่ 8/11/2018 – 15/11/2018



รูปที่ ข.6 ผลการทดสอบวันที่ 19/12/2018 – 9/1/2019



รูปที่ ข.7 ผลการทดสอบวันที่ 15/01/2019 – 24/01/2019

ค่าเฉลี่ยของแรงดันและกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย และแรงดันไฟฟ้าที่วางจำนวน 6 จุด ในวันที่ 16/11/2018 ดังแสดงในรูปที่ ข.1 วันที่ 14/12/2018 ดังรูปที่ ข.2 และในวันที่ 14/01/2019 ดังรูปที่ ข.3 ดังแสดงในตารางที่ ข.1 – ข.3

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบในการกระจายแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงวันที่ 16/11/2018

ลำดับ ที่	Setting (V)	V_s (V)	I_s (A)	U_{RE} (mV)			U_{RE} (V)		
				1	2	3	1	2	3
1	0	-0.7723	0.0622	-125.84	-120.71	-143.80	-0.0404	0.2200	0.2510
2	5	4.841	3.4891	-68.607	-64.499	-86.966	-0.1390	0.1846	0.2626
	delta	5.613	3.427	57.238	56.211	56.832	-0.0986	-0.0353	0.0116
3	10	10.581	7.909	-74.941	-70.756	-90.981	-0.1573	0.1044	0.2401
	delta	11.353	7.847	50.903	49.954	52.816	-0.1168	-0.1156	-0.0109
4	15	16.263	12.168	-74.847	-69.775	-88.997	-0.0966	0.2012	0.3260
	delta	17.035	12.106	50.997	50.935	54.801	-0.0562	-0.0188	0.0750
5	18	19.640	14.958	-77.313	-72.156	-91.218	-0.0171	0.2769	0.4153
	delta	20.412	14.896	48.531	48.554	52.580	0.0233	0.0569	0.1643

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบในการกระจายแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงวันที่ 14/12/2018

ลำดับ ที่	Setting (V)	V_s (V)	I_s (A)	U_{RE} (mV)			U_{RE} (V)		
				1	2	3	1	2	3
1	0	-1.0390	0.0576	-13.790	-12.847	-30.269	-0.6095	0.0485	0.2639
2	20	21.942	16.619	-58.582	-54.729	-74.790	-0.7160	0.1016	0.3693
	delta	22.981	16.561	-44.792	-41.881	-44.521	-0.1065	0.0532	0.1054
3	5	4.6359	4.0651	-55.062	-49.721	-71.639	-1.1264	-0.3577	-0.1284
	delta	5.6749	4.0074	-41.272	-36.874	-41.370	-0.5169	-0.4061	-0.3923
4	15	16.129	12.516	-61.530	-56.771	-77.979	-0.9245	-0.1501	0.1040
	delta	17.168	12.458	-47.739	-43.924	-47.710	-0.3150	-0.1986	-0.1599
5	10	10.382	8.268	-51.702	-46.867	-68.069	-0.7098	0.0592	0.3024
	delta	11.421	8.210	-37.912	-34.020	37.799	-0.1003	0.0107	0.0385

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบในกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงวันที่ 14/01/2019

ลำดับ ที่	Setting (V)	V_s (V)	I_s (A)	U_{RE} (mV)			U_{RE} (V)		
				1	2	3	1	2	3
1	0	-1.1002	0.0097	-35.273	-31.181	-46.793	-1.1044	-0.1665	-0.0741
2	5	4.6039	4.1371	-56.748	-52.434	-72.731	-1.3899	-0.5130	-0.3656
	delta	5.7040	4.1273	-21.475	-21.253	-25.938	-0.2856	-0.3465	-0.2915
3	10	10.337	8.1542	-50.854	-46.607	-65.824	-0.7422	0.1022	0.2393
	delta	11.437	8.1444	-15.581	-15.425	-19.031	0.3622	0.2687	0.3133
4	15	16.053	12.308	-34.863	-30.828	-49.929	-0.0704	0.7580	1.0009
	delta	17.153	12.298	0.4096	0.3538	-3.1356	1.0340	0.9245	1.0750
5	20	21.801	16.498	-59.191	-55.527	-73.601	-0.6033	0.2653	0.4651
	delta	22.901	16.484	-23.919	-24.346	-26.808	0.5010	0.4318	0.5392

หาค่าเฉลี่ยของแรงดันและกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย และแรงดันไฟฟ้าที่รางจำนวน 6 จุด ในวันที่ 15/01/2019 – 24/01/2019 ดังแสดงในรูปที่ ข.6 โดยพิจารณาเป็นรายชั่วโมง วันที่ 15/01/2019 และรายวันในช่วงวันที่ 16/01/2019 – 24/01/2019 ดังแสดงในตารางที่ ข.4 และ ข.5 ตามลำดับ

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบในกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ในระยะเวลาหนึ่งสัปดาห์

ชั่วโมง ที่	Temp. °C	Hum. (%)	V_s (V)	I_s (A)	U_{RE} (mV)			U_{RE} (V)		
					1	2	3	1	2	3
0	28.00	41.989	-0.712	0.112	-45.82	-41.88	-57.88	-1.726	-0.877	0.753
1	29.50	47.356	10.67	8.178	-54.88	-50.92	-70.71	-1.109	-0.290	-0.157
2	29.32	47.643	10.78	8.187	-58.15	-54.15	-73.71	-1.199	-0.389	-0.263
3	27.42	49.859	10.82	8.194	-59.19	-55.16	-74.67	-1.243	-0.441	-0.322
4	26.79	51.509	10.81	8.193	-60.17	-56.22	-75.69	-1.285	-0.504	-0.391
5	29.17	49.318	10.74	8.188	-60.12	-56.33	-76.18	-1.083	-0.507	-0.392
6	29.50	47.619	10.71	8.175	-59.00	-55.11	-74.91	-1.082	-0.421	-0.301
7	28.76	47.665	10.75	8.173	-58.49	-54.46	-74.22	-1.123	-0.404	-0.279

ตารางที่ ข.5 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบในกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ในระยะเวลาหนึ่งสัปดาห์

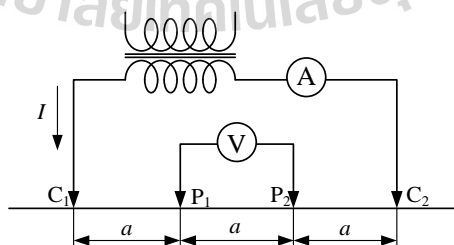
ลำดับ ที่	Setting (V)	V_s (V)	I_s (A)	U_{RE} (mV)			U_{RE} (V)		
				1	2	3	1	2	3
1	0	-0.7118	0.1124	-45.818	-41.876	-57.879	-1.7261	-0.8770	-0.7532
2	10	10.7482	8.1713	-58.066	-54.097	-73.813	-1.1967	-0.4345	-0.3140
	delta	11.4600	8.0590	-12.248	-12.221	-15.934	0.5294	0.4425	0.4393

ข.2 การวัดความต้านทานดินและความต้านทานของโครงสร้างทางยกระดับ

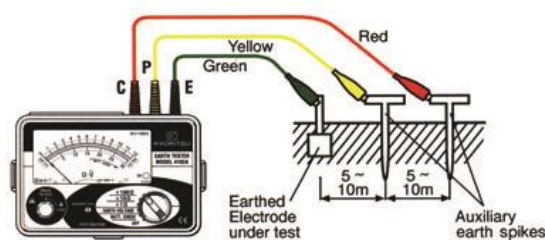
การวัดค่าความต้านทานในที่นี้จะกล่าวถึงการวัดค่าความต้านทานดินและค่าความต้านทานของโครงสร้างที่ต่อลงดินเทียบกับดิน ซึ่งเป็นการวัดที่นอกเหนือจากการวัดในมาตรฐาน EN 50122-2 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ข.2.1 การวัดค่าความต้านทานดิน

วิธีการส่วนใหญ่ที่ใช้กันในการวัดความต้านทานดินขึ้นอยู่กับความลึกของดิน คือ วิธีการวัด 4 จุด ที่เรียกว่าวิธีการเวอร์เนอร์ (Wenner) โดยใช้เมกะโอห์มมิเตอร์สำหรับวัดสภาพความต้านทานของดินแสดงได้ดังรูปที่ ข.8 การจัดเรียงแท่งดิน 4 แท่งให้มีระยะห่างเท่า ๆ กัน โดยที่ I คือ การจ่ายกระแสไฟฟ้าระหว่างสายวัด C_1 กับ C_2 และแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุด P_1 และ P_2 ด้วยการเพิ่มขึ้นของระยะห่างในการวัดความต้านทานของดินบ่งบอกถึงในระดับความลึกที่ของดินเนื่องจากกระแสไหลผ่านชั้นดินในลึกมากขึ้น ซึ่ง a เป็นระยะทางของสายวัดและ R_E ค่าความต้านทานที่บันทึกไว้ และสามารถแสดงการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดได้ดังรูปที่ ข.9 เป็นการแสดงการวัดแบบ 3 จุดทดสอบ



รูปที่ ข.8 การวัดค่าความต้านทานดินด้วยวิธีเวอร์เนอร์

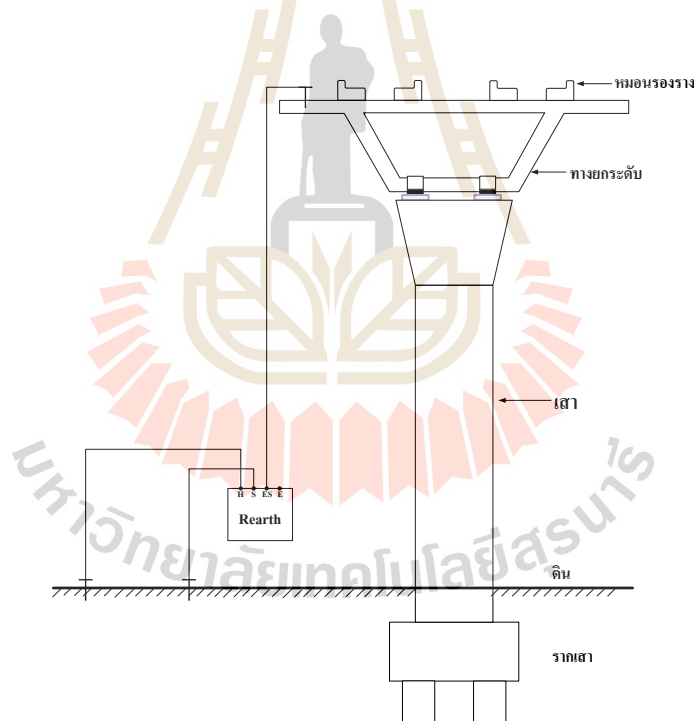


รูปที่ ข.9 การแสดงการวัดแบบ 3 จุดทดสอบ

ที่มา: www.praguynakorn.com/tips/12/การวัดความต้านทานดิน [เข้าถึงเมื่อ 22 พ.ค. 2562]

ข.2.2 การวัดค่าความต้านทานของโครงสร้างที่ต่อลงดินเทียบกับดิน

วิธีการวัดค่าความต้านทานดินแบบ 3 จุดทดสอบในรูปที่ ข.9 สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าความต้านทานดินของโครงสร้างเทียบกับดินได้ดังแสดงในรูปที่ ข.10



รูปที่ ข.10 การวัดค่าความต้านทานของโครงสร้างที่ต่อลงดินเทียบกับดิน

การวัดความต้านทานดินและความต้านทานของโครงสร้างทางยกระดับมีรายละเอียดในการวัดดังแสดงต่อไปนี้

1. การวัดความต้านทานดินก่อนก่อสร้าง

ได้วัดความต้านทานดินที่หลุมสำหรับการก่อสร้างเสาทางยกระดับย่อส่วนแสดงได้
ดังรูปที่ ข.11 โดยใช้วิธีการวัดดังรูปที่ ข.9



หลุมที่ 1



หลุมที่ 2



หลุมที่ 3

รูปที่ ข.11 การวัดความต้านทานดินที่หลุมสำหรับการก่อสร้างเสา

2. การวัดความต้านทานดินหลังก่อสร้าง

ได้ทดสอบวัดความต้านทานดินหลังก่อสร้างเป็นจำนวน 3 ครั้งดังแสดงในตารางที่
ข.6 – ข.8 ซึ่งได้วัดความต้านทานดินบริเวณเสา ความต้านทานดินระหว่างโครงสร้างกับดิน ความ
ต้านทานดินที่จุดวัด และความต้านทานดินระหว่างเสาแสดงได้ดังรูปที่ ข.12 และการหาค่าเฉลี่ยดัง
ตารางที่ ข.9



รูปที่ ข.12 ตัวอย่างการวัดความต้านโครงสร้างเทียบกับดิน

ตารางที่ ข.6 การวัดความต้านทานดินของโครงสร้างยกระดับแบบย้อยส่วน

ทดสอบวันที่ 16/10/2561 อุณหภูมิ 29 °C ความชื้น 54%

ตำแหน่งการวัด	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$R (\Omega)$	$\rho (\Omega m)$	$R (\Omega)$	$\rho (\Omega m)$	$R (\Omega)$	$\rho (\Omega m)$
1. การวัดความต้านทานดินบริเวณเสา						
เสาที่ 1	26.7	1.733 k	29.7	2.006 k	28.2	1.780 k
เสาที่ 2	26.6	1.614 k	32.3	2.030 k	28.1	1.812 k
เสาที่ 3	36.6	2.40 k	56.6	3.58 k	57.1	3.59 k
2. การวัดความต้านทานดินระหว่างโครงสร้างกับดิน						
เสาที่ 1	5.49	345	5.46	342	5.45	343
เสาที่ 2	5.46	343	5.46	343	5.45	343
เสาที่ 3	5.66	353	5.46	343	5.45	342
3. การวัดความต้านทานดินที่จุดวัด						
เสาที่ 1	5.78	356	6.09	371	5.49	345
เสาที่ 2	6.13	384	5.65	356	5.68	356
เสาที่ 3	5.64	355	5.61	352	5.57	351
4. การวัดความต้านทานดินระหว่างเสา						
ก่อนเสาที่ 1	32.3	2.030 k	50.7	3.19 k	32.3	2.030 k
ระหว่างเสาที่ 1-2	32.3	2.030 k	50.7	3.19 k	32.3	2.030 k
ระหว่างเสาที่ 2-3	56.6	3.58 k	56.6	3.58 k	56.6	3.58 k
หลังเสาที่ 3	56.6	3.58 k	56.6	3.58 k	56.6	3.58 k

*สภาพดินเปียกชื้น

ตารางที่ ข.7 การวัดความต้านทานดินของโครงสร้างยกระดับแบบย้อยส่วน

ทดสอบวันที่ 15/11/2561 อุณหภูมิ 27 °C ความชื้น 34%

ตำแหน่งการวัด	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$R (\Omega)$	$\rho (\Omega m)$	$R (\Omega)$	$\rho (\Omega m)$	$R (\Omega)$	$\rho (\Omega m)$
1. การวัดความต้านทานดินบริเวณเสา						
เสาที่ 1	49.5	3.12 k	37.7	2.37 k	147.9	9.31 k
เสาที่ 2	40.3	2.53 k	49.4	3.10 k	83.0	5.22 k
เสาที่ 3	14.92	973	35.7	2.24 k	150	9.36 k
2. การวัดความต้านทานดินระหว่างโครงสร้างกับดิน						
เสาที่ 1	7.38	463	7.50	472	7.36	463
เสาที่ 2	7.32	460	7.33	460	7.33	460
เสาที่ 3	7.33	461	7.34	461	7.31	460
3. การวัดความต้านทานดินที่จุดวัด						
เสาที่ 1	7.62	479	7.46	469	7.42	467
เสาที่ 2	7.58	477	7.81	492	7.51	472
เสาที่ 3	7.72	484	7.52	472	7.75	486
4. การวัดความต้านทานดินระหว่างเสา						
ก่อนเสาที่ 1	78.0	4.90 k	54.9	3.45 k	72.7	4.57 k
ระหว่างเสาที่ 1-2	91.7	5.76 k	84.9	5.33 k	64.7	4.06 k
ระหว่างเสาที่ 2-3	129.2	8.18 k	83.9	5.27 k	90.5	5.70 k
หลังเสาที่ 3	65.1	4.09 k	67.0	4.21 k	79.1	4.94 k

*สภาพดินแห้ง

ตารางที่ ข.8 การวัดความต้านทานดินของโครงสร้างยกระดับแบบย้อยส่วน

ทดสอบวันที่ 30/01/2561 อุณหภูมิ 31 °C ความชื้น 70%

ตำแหน่งการวัด	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$R (\Omega)$	$\rho (\Omega m)$	$R (\Omega)$	$\rho (\Omega m)$	$R (\Omega)$	$\rho (\Omega m)$
1. การวัดความต้านทานดินบริเวณเสา						
เสาที่ 1	68.5	4.31 k	56.0	3.52 k	93.8	5.90 k
เสาที่ 2	54.2	3.41 k	40.5	2.54 k	77.8	4.88 k
เสาที่ 3	80.8	5.06 k	87.1	5.47 k	117.2	7.35 k
2. การวัดความต้านทานดินระหว่างโครงสร้างกับดิน						
เสาที่ 1	9.00	565	8.99	564	8.96	564
เสาที่ 2	9.03	576	9.04	568	9.03	567
เสาที่ 3	9.12	573	9.08	571	9.06	569
3. การวัดความต้านทานดินที่จุดวัด						
เสาที่ 1	9.05	569	9.04	569	9.04	568
เสาที่ 2	9.62	601	9.60	602	9.46	594
เสาที่ 3	9.14	574	9.13	574	9.14	574
4. การวัดความต้านทานดินระหว่างเสา						
ก่อนเสาที่ 1	82.3	5.18 k	72.1	4.53 k	102.7	6.24 k
ระหว่างเสาที่ 1-2	128.8	8.07 k	72.5	4.54 k	94.1	5.93 k
ระหว่างเสาที่ 2-3	103.1	6.49 k	115.3	7.26 k	101.4	6.40 k
หลังเสาที่ 3	133.0	8.34 k	157.2	9.91 k	88.3	5.55 k

ตารางที่ ข.9 ค่าเฉลี่ยของการวัดความต้านทานดินของโครงสร้างระดับแบบย่อส่วน

ตำแหน่งการวัด	วันที่ 1		วันที่ 2		วันที่ 3	
	$R (\Omega)$	$\rho (\Omega m)$	$R (\Omega)$	$\rho (\Omega m)$	$R (\Omega)$	$\rho (\Omega m)$
1. การวัดความต้านทานดินบริเวณเสา						
เสาที่ 1	28.2	1.84 k	78.37	4.93 k	72.77	4.58 k
เสาที่ 2	29.0	1.82 k	57.57	3.62 k	57.50	3.61 k
เสาที่ 3	50.1	3.19 k	66.87	4.19 k	95.03	5.96 k
2. การวัดความต้านทานดินระหว่างโครงสร้างกับดิน						
เสาที่ 1	5.47	343.33	7.41	466.00	8.98	564.33
เสาที่ 2	5.46	343.00	7.33	460.00	9.03	570.33
เสาที่ 3	5.52	346.00	7.33	460.67	9.09	571.00
3. การวัดความต้านทานดินที่จุดวัด						
เสาที่ 1	5.79	357.33	7.50	471.67	9.04	568.67
เสาที่ 2	5.82	365.33	7.63	480.33	9.56	599.00
เสาที่ 3	5.61	352.67	7.66	480.67	9.14	574.00
4. การวัดความต้านทานดินระหว่างเสา						
ก่อนเสาที่ 1	38.43	2.42 k	68.53	4.31 k	85.70	5.32 k
ระหว่างเสาที่ 1-2	38.43	2.42 k	80.43	5.05 k	98.47	6.18 k
ระหว่างเสาที่ 2-3	56.60	3.58 k	101.2	6.38 k	106.6	6.72 k
หลังเสาที่ 3	56.60	3.58 k	70.40	4.41 k	126.2	7.93 k

3. การวัดความต้านทานของโครงสร้างทางยกระดับก่อนก่อสร้าง

การวัดความต้านทานของโครงสร้างทางยกระดับก่อนก่อสร้างใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานด้วย DMM ได้แสดงการวัดความต้านทานของเสาโครงสร้างและทางยกระดับดังแสดงในรูปที่ ข.13 –ข.15



ข.13 ตัวอย่างการวัดความต้านทานของเสาโครงสร้าง



ข.14 ตัวอย่างการวัดความต้านทานของทางยกระดับชั้นที่ 1



ข.15 ตัวอย่างการวัดความต้านทานของทางยกระดับชั้นที่ 2

4. การวัดความต้านทานของโครงสร้างทางยกระดับหลังก่อสร้าง

ได้วัดความต้านทานของโครงสร้างทางยกระดับหลังก่อสร้างจำนวน 3 ครั้งดังแสดงในตารางที่ ข.10 – ข.12 โดยวัดความต้านทานระหว่างรางวิ่งกับคอนกรีต ความต้านทานระหว่างคอนกรีตกับโครงสร้าง และ ความต้านทานระหว่างโครงสร้างกับจุดวัด

ตารางที่ ข.10 การวัดความต้านทานของโครงสร้างที่ยกระดับแบบย้อยส่วน

ทดสอบวันที่ 16/10/2561 อุณหภูมิ 27 °C ความชื้น 34%

ตำแหน่งการวัด	R (Ω)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
การวัดความต้านทานระหว่างรางวิ่งกับคอนกรีต				
เสาที่ 1	13.38 M	15.66 M	12.76 M	13.93 M
เสาที่ 2	11.69 M	10.47 M	13.23 M	11.80 M
เสาที่ 3	15.59 M	16.79 M	14.38 M	15.59 M
การวัดความต้านทานระหว่างคอนกรีตกับโครงสร้าง				
เสาที่ 1	1.306 M	1.379 M	1.296 M	1.327 M
เสาที่ 2	1.232 M	1.335 M	1.306 M	1.291 M
เสาที่ 3	1.333 M	1.313 M	1.283 M	1.310 M
การวัดความต้านทานระหว่างโครงสร้างกับจุดวัด				
เสาที่ 1	0.10	0.11	0.13	0.12
เสาที่ 2	0.11	0.13	0.11	0.12
เสาที่ 3	0.12	0.15	0.14	0.14

หมายเหตุ ความต้านทานสายวัด 0.1 Ω และ 0.06 Ω

ตารางที่ ข.11 การวัดความต้านทานของโครงสร้างที่ยกระดับแบบย้อยส่วน

ทดสอบวันที่ 15/11/2561 อุณหภูมิ 29 °C ความชื้น 54%

ตำแหน่งการวัด	$R (\Omega)$			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
การวัดความต้านทานระหว่างรางวิ่งกับคอนกรีต				
เสาที่ 1	127.4 M	161.9 M	169.3 M	152.9 M
เสาที่ 2	143.5 M	174.4 M	190.3 M	169.4 M
เสาที่ 3	94.7 M	147.2 M	154.7 M	132.2 M
การวัดความต้านทานระหว่างคอนกรีตกับโครงสร้าง				
เสาที่ 1	68.4 M	63.76 M	50.9 M	61.02 M
เสาที่ 2	70.8 M	66.7 M	60.1 M	65.87 M
เสาที่ 3	80.5 M	61.8 M	61.3 M	67.87 M
การวัดความต้านทานระหว่างโครงสร้างกับจุดวัด				
เสาที่ 1	0.20	0.15	0.18	0.18
เสาที่ 2	0.18	0.19	0.18	0.18
เสาที่ 3	0.18	0.15	0.19	0.17

หมายเหตุ ความต้านทานสายวัด 0.1 Ω และ 0.06 Ω

ตารางที่ ข.12 การวัดความต้านทานของโครงสร้างที่ยกระดับแบบย้อยส่วน

ทดสอบวันที่ 16/01/2562 อุณหภูมิ 27 °C ความชื้น 34%

ตำแหน่งการวัด	$R (\Omega)$			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
การวัดความต้านทานระหว่างรางวิ่งกับคอนกรีต				
เสาที่ 1	79.5 M	80.6 M	81.5 M	80.53 M
เสาที่ 2	111.6 M	110.7 M	111.2 M	111.2 M
เสาที่ 3	89.3 M	90.2 M	91.2 M	90.23 M
การวัดความต้านทานระหว่างคอนกรีตกับโครงสร้าง				
เสาที่ 1	88.3 M	87.4 M	86.8 M	84.83 M
เสาที่ 2	99.6 M	100.7 M	101.5 M	100.6 M
เสาที่ 3	80.1 M	89.5 M	96.7 M	88.77 M
การวัดความต้านทานระหว่างโครงสร้างกับจุดวัด				
เสาที่ 1	0.224	0.209	0.210	0.214
เสาที่ 2	0.262	0.259	0.254	0.258
เสาที่ 3	0.213	0.208	0.205	0.209

หมายเหตุ ความต้านทานสายวัด 0.1 Ω และ 0.06 Ω

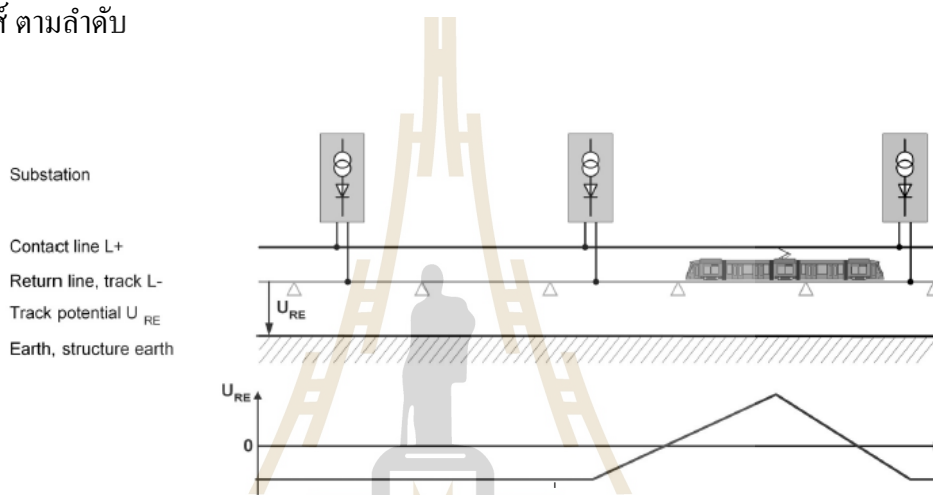
ภาคผนวก ค

ชุดต้นแบบระบบตรวจจับกระสุนไร้ไหล

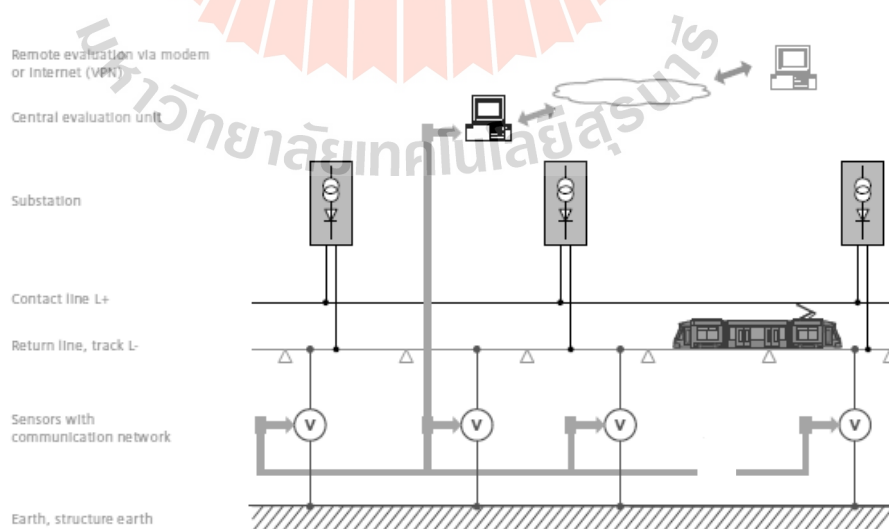
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค.1 ระบบตรวจวัดกระแสรั่วไหล

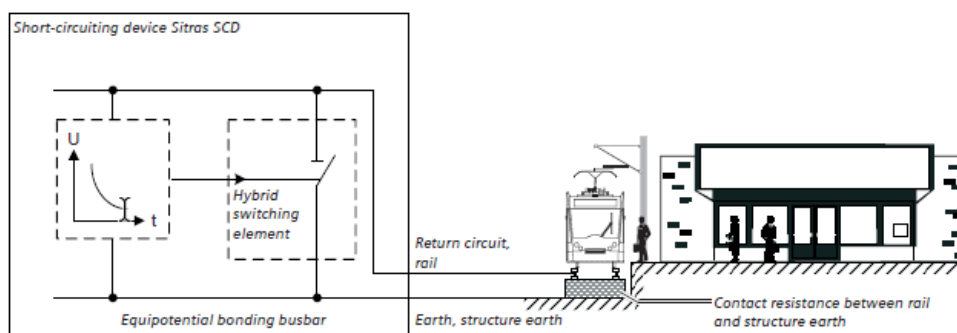
ระบบส่วนกลางการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหลคือการวัดค่าแรงดันจากอุปกรณ์ลัดวงจรซึ่งติดตั้งไว้ที่สถานีผู้โดยสาร โดยจะเปรียบเทียบค่าแรงดันเฉลี่ยด้านบวกกับค่าอ้างอิงจากระบบนวน และการเก็บค่าในอุปกรณ์ตรวจจับ ในกรณีที่มีความขัดแย้งระหว่างค่าที่เก็บบันทึกไว้กับค่าที่วัดได้ ตัวอุปกรณ์จะทำการลัดวงจรและแจ้งเหตุ การวัดค่าความแตกต่างของแรงดันระหว่างโครงสร้างกับดิน โดยรูปที่ ค.1 ค.2 และ ค.3 แสดงรูปร่างของสัคยไฟฟ้าที่รางวิ่ง ระบบแสดงการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหล และการวัดสัคยไฟฟ้าที่รางวิ่งโดยใช้ Short-circuit device Sitras SCD ของ บริษัท ซีเมนส์ ตามลำดับ



รูปที่ ค.1 การตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหลของ บริษัท ซีเมนส์

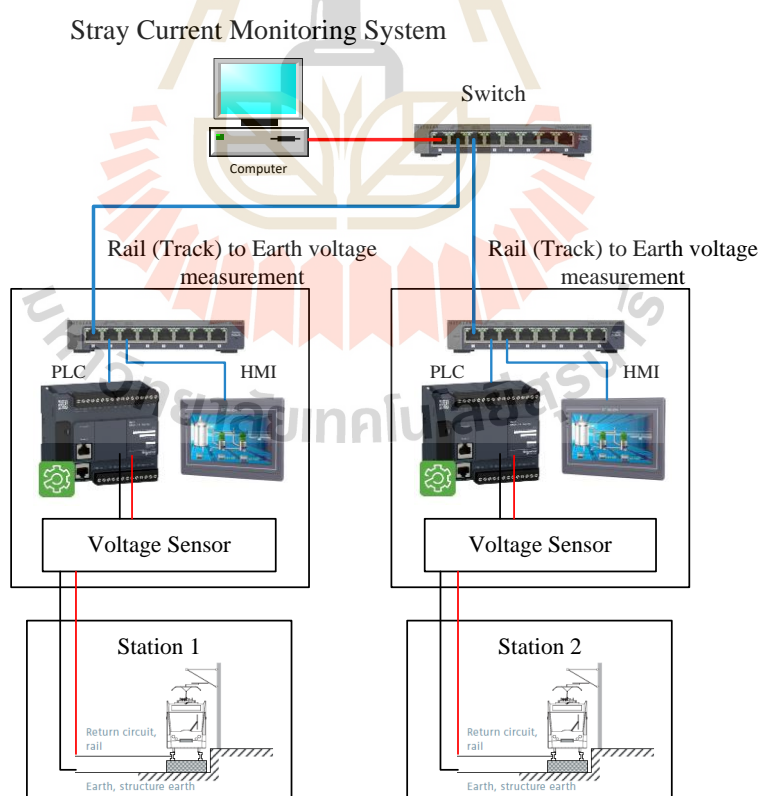


รูปที่ ค.2 ระบบแสดงการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหล ของบริษัท ซีเมนส์



รูปที่ ค.3 การวัดศักย์ไฟฟ้าที่รางวิ่งโดยใช้ Short-circuiting device Sitras SCD ของ บริษัท ซีเมนต์

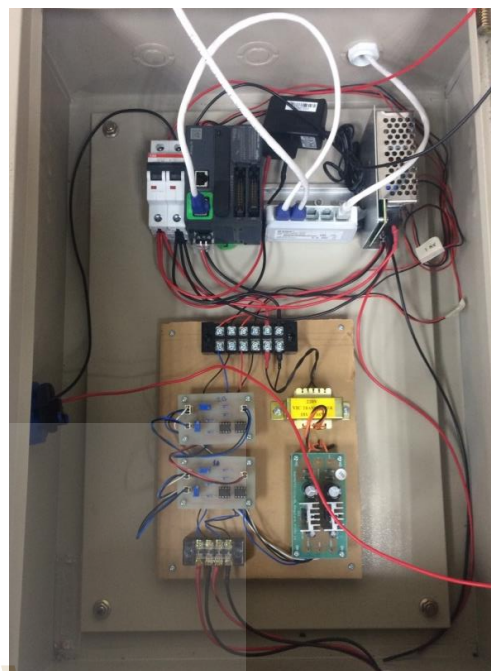
ดังนั้นระบบตรวจจับกระแสรั่วไหลที่สร้างขึ้นจะใช้แนวความคิดของระบบตรวจจับกระแสรั่วไหลโดยการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างการต่อลงดินที่สถานีให้บริการจำนวน 2 สถานี แสดงดังรูปที่ ค.4 ซึ่งประกอบไปด้วย PLC จอ Touch screen siwitch hup วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ ค.5



รูปที่ ค.4 ระบบตรวจจับกระแสรั่วไหล



ก) ตู้ควบคุม



ข) ภายในตู้ควบคุม

รูปที่ ค.5 ชุดทดสอบระบบตรวจจับกระแสรั่วไหล

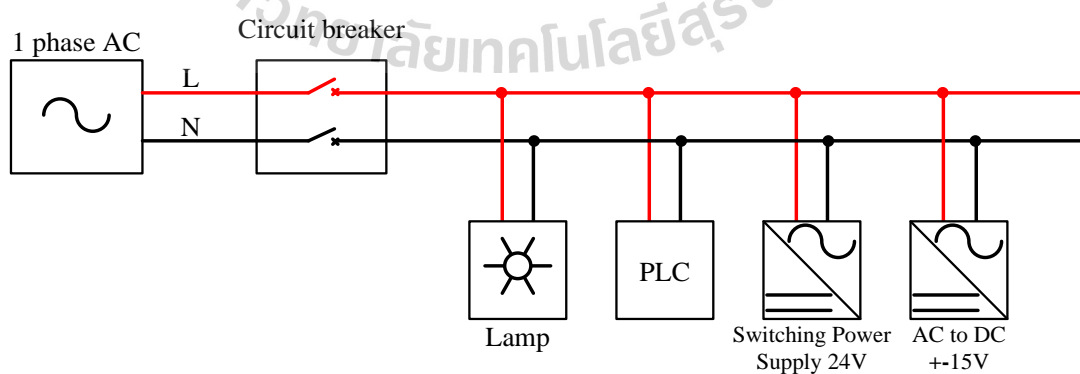
การสร้างระบบตรวจจับกระแสรั่วไหลดังกล่าวจำเป็นต้องใช้วัสดุและอุปกรณ์ดังแสดงในตารางที่ ค.1 ซึ่งอุปกรณ์หลักได้แก่ PLC Schneider รุ่น M221 TM221CE16R จอ Touch screen PI WECON ขนาด 7 นิ้ว Switch hup และ Voltage transducer LV 25P โดยสามารถแยกออกเป็นวงจรที่สำคัญได้แก่ วงจรแหล่งจ่ายและวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรายละเอียดต่อไปนี้

ค.1.1 วงจรแหล่งจ่าย

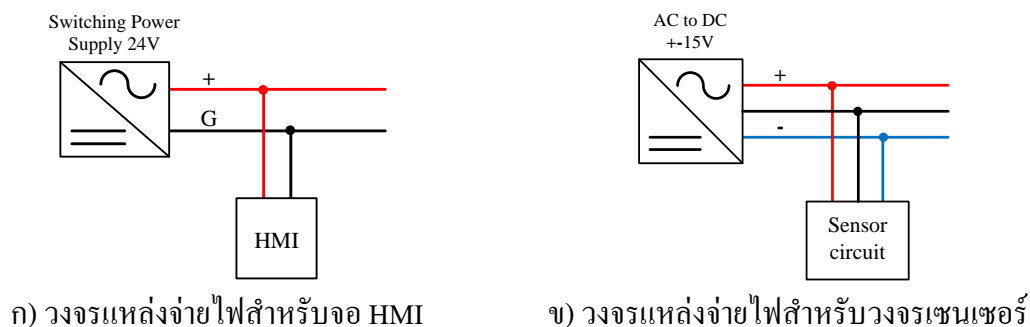
วงจรแหล่งจ่ายในระบบตรวจจับกระแสรั่วไหลใช้ระบบไฟ 220 VAC 1 เฟส ต่อผ่านเบรกเกอร์เพื่อจ่ายไฟให้แก่ หลอดไฟ PLC Switching power supply 24 VDC และวงจร Regulator -15 0 15 V 1A ดังแสดงในรูปที่ ค.6 โดยที่ Switching power supply ทำหน้าที่จ่ายไฟเลี้ยงให้กับจอ Touch screen ดังแสดงในรูปที่ ค.7 ก) และวงจร Regulator ทำหน้าที่จ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ ค.7 ข)

ตารางที่ ค.1 อุปกรณ์สำหรับระบบตรวจจับกระแสรั่วไหล

ลำดับ	รายการ	จำนวน	ราคา
1	PLC Schneider รุ่น M221 TM221CE16R	1	10000
2	จอ Touch screen PI WECON ขนาด 7 นิ้ว	1	15000
3	Switch hup	1	6000
4	ตู้ Control	1	2500
5	เบรกเกอร์	1	500
6	Lamp	1	100
7	ซีเลกเตอร์สวิตช์	1	150
8	สาย Lan 0.5 m	2	100
9	สาย Lan 5 m	1	150
10	Power pluck	1	500
11	Terminal 8 ขา	1	120
12	Terminal 4 ขา	1	60
13	หม้อแปลง -15 0 15 V 0.5A	1	180
14	วงจร regulator -15 0 15 V 1A	1	150
15	Voltage transducer LV 25P	1	2700
16	อื่นๆ		1000
รวม			39210



รูปที่ ค.6 วงจรแหล่งจ่ายในระบบตรวจจับกระแสรั่วไหล



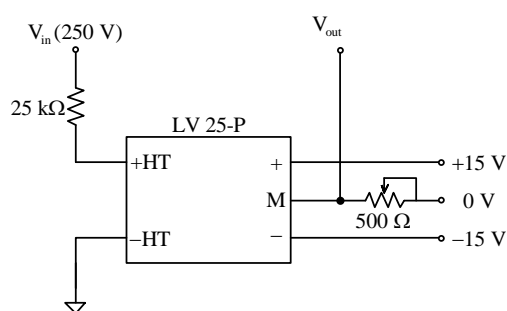
รูปที่ ค.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับจอ HMI และ วงจรเซนเซอร์

ค.1.2 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

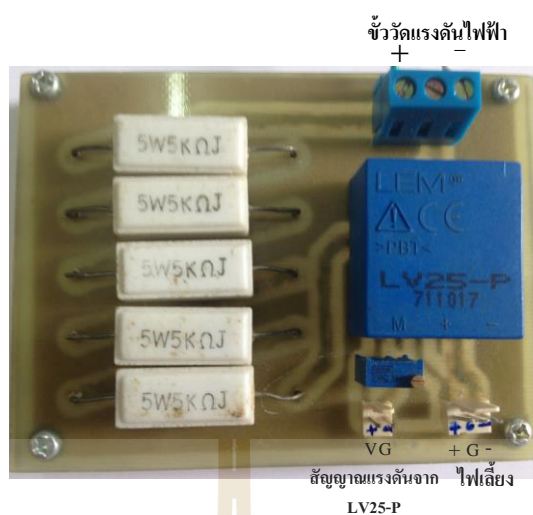
วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้มี 3 ระดับ นั่นคือ การตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด ± 250 VAC ± 100 V และ ± 20 V ตามลำดับ โดยอุปกรณ์ในจุดวัดที่ 1 ประกอบไปด้วยวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด ± 250 VAC และ ± 20 V และสำหรับจุดวัดที่ 2 ประกอบไปด้วยตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด ± 100 V และ ± 20 V การตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าทั้งสามระดับแสดงได้ดังต่อไปนี้

- วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าพิกัด 250 V

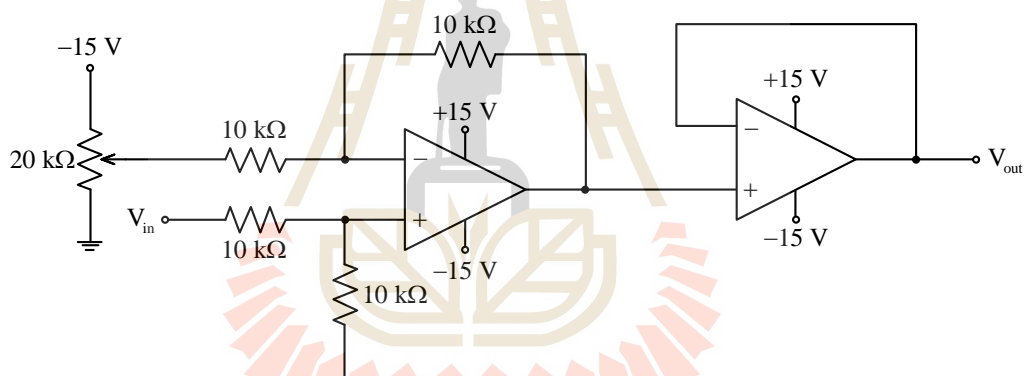
ชุดตรวจจับแรงดันไฟฟ้าได้เลือกใช้วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P ซึ่งทนแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด 500 V และกระแสพิกัดอยู่ที่ 10 mA ดังแสดงในรูปที่ ค.8 และ ค.9 ทำหน้าที่ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่ราง วงจรตรวจจับต้องใช้ไฟเลี้ยง +15 V 0V และ -15 V จะสังเกตได้ว่ามีความต้านทานแรงสูงและด้านแรงต่ำโดยใช้งานร่วมกับวงจรวงจรปรับแต่งสัญญาณ โดยวงจรปรับแต่งสัญญาณจะปรับแต่งสัญญาณจากเซนเซอร์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่อยู่ในย่าน -5 ถึง 5 V ให้อยู่ในย่าน 0-10 V ซึ่งเป็นแรงดันที่ PLC อ่านค่าได้ดังแสดงในรูปที่ ค.10 และ ค.11



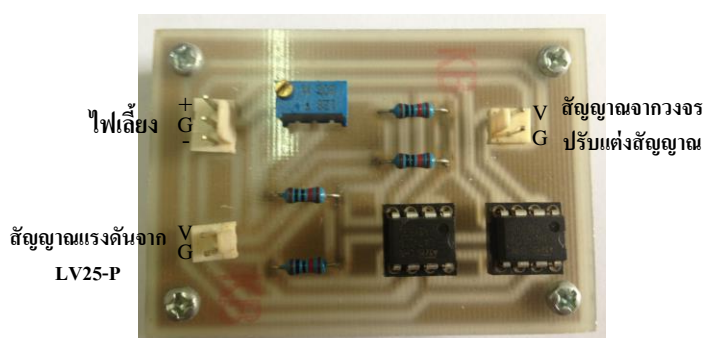
รูปที่ ค.8 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ ค.9 ชุดวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ ค.10 วงจรปรับแต่งสัญญาณ

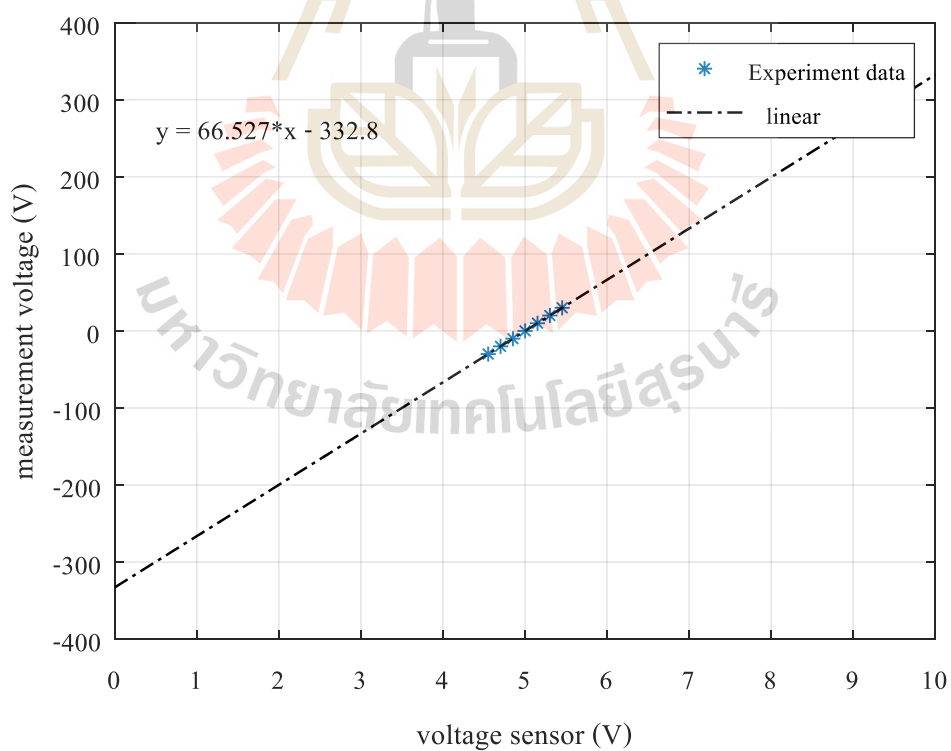


รูปที่ ค.11 ชุดวงจรปรับแต่งสัญญาณ

ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามตารางที่ ค.2 แสดงการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าในย่าน -30 ถึง 30 V ซึ่งผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าสามารถนำไปพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ ค.12

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าพิกัด 330 V

แรงดันไฟฟ้า (V)	แรงดันไฟฟ้าจากวงจรแปลงสัญญาณ (V)
-30	4.5517
-20	4.7021
-10	4.8526
0.0127	5.0015
10	5.1530
20	5.3036
30	5.4535



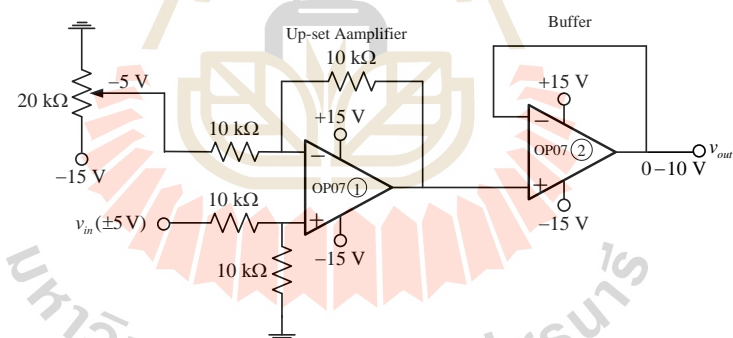
รูปที่ ค.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์พิกัด 330 V

จากรูปที่ ค.12 สามารถหาสมการเชิงเส้นเพื่อแทนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเซนเซอร์ได้จากสมการที่ (ค.1) ซึ่งมีผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเป็น 0.092

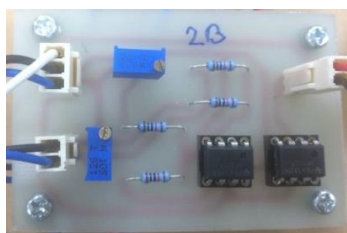
$$v_{in} = 66.527 \times v_{\text{sensor}} - 332.8 \quad (\text{ค.1})$$

- วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าพิกัด 100 V

วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอนเป็นวงจรที่ลดทอนสัญญาณจาก ± 100 V เป็น 0 ถึง 10 V เพื่อใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้วงจรผลต่างเพื่อขยายระดับแรงดัน (Up-set amplifier) รวมวงจรบูฟเฟอร์ ซึ่งได้เลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ OP07 โดยกำหนดให้แรงดันอินพุตที่เข้าลดทอนสัญญาณลงโดยใช้วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage division) จาก ± 100 V เป็น ± 5 V แล้วนำสัญญาณที่ได้เข้าที่ขาบวกของออปแอมป์ และใช้วงจรแบ่งแรงดันให้มีพิกัด -5 V เข้าที่ขาลบของออปแอมป์ สัญญาณที่ได้จากออปแอมป์ตัวที่ 1 จะกลับเฟส ดังนั้นต้องต่อด้วยวงจรบูฟเฟอร์เพื่อกลับเฟสอีกครั้งดังแสดงในรูปที่ ค.13 และ ค.14



รูปที่ ค.13 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าพิกัด 100 V

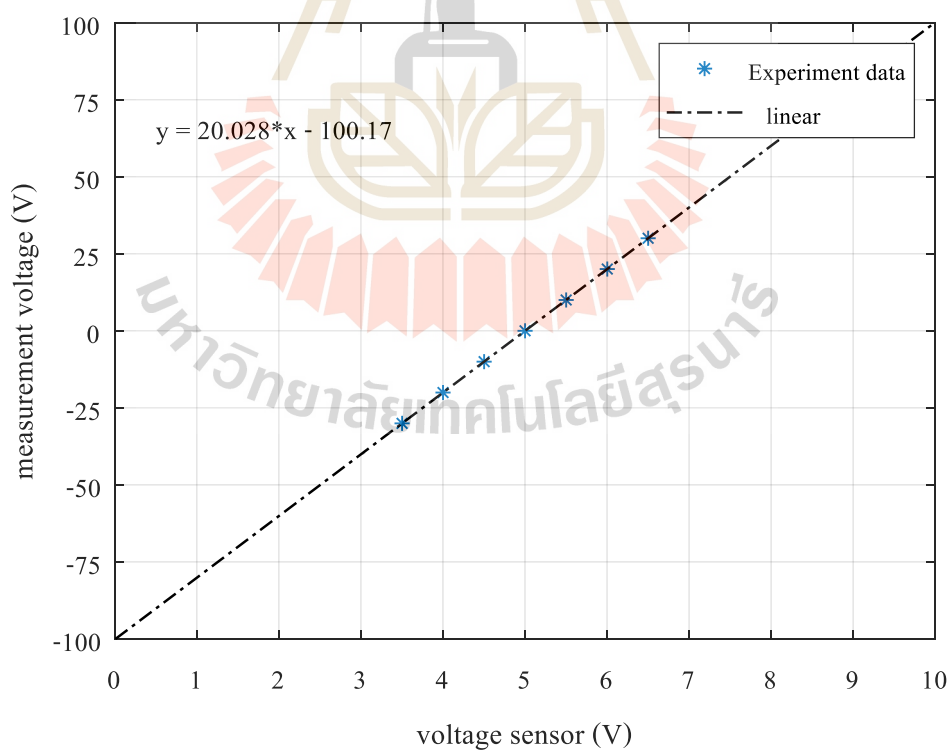


รูปที่ ค.14 ชุดวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าพิกัด 100 V

จากวงจรรูปที่ ค.14 สามารถทดสอบการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ ค.3 แสดงการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าในย่าน -30 V ถึง 30 V ซึ่งผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าสามารถนำไปพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ ค.15

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าพิกัด 100 V

แรงดันไฟฟ้า (V)	แรงดันไฟฟ้าจากวงจรแปลงสัญญาณ (V)
-30.038	3.502
-20.033	4.001
-10.014	4.502
0.0041	5.001
10.006	5.502
20.050	6.003
30.036	6.501



รูปที่ ค.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์พิกัด 100 V

จากรูปที่ ค.15 สามารถหาสมการเชิงเส้นเพื่อแทนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ได้ดังสมการที่ (ค.2) ซึ่งมีผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเท่ากับ 0.0267

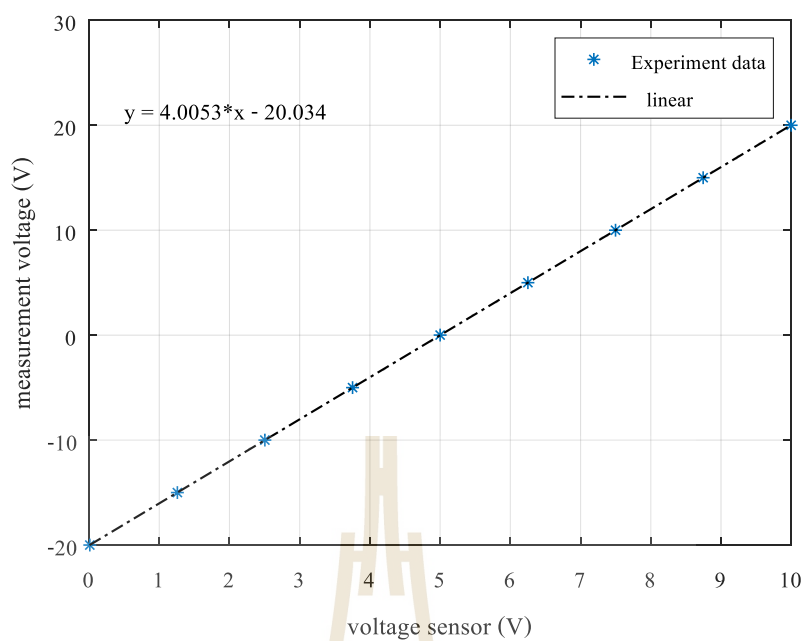
$$v_{in} = 20.028 \times v_{\text{sensor}} - 100.17 \quad (\text{ค.2})$$

- วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าพิกัด 20 V

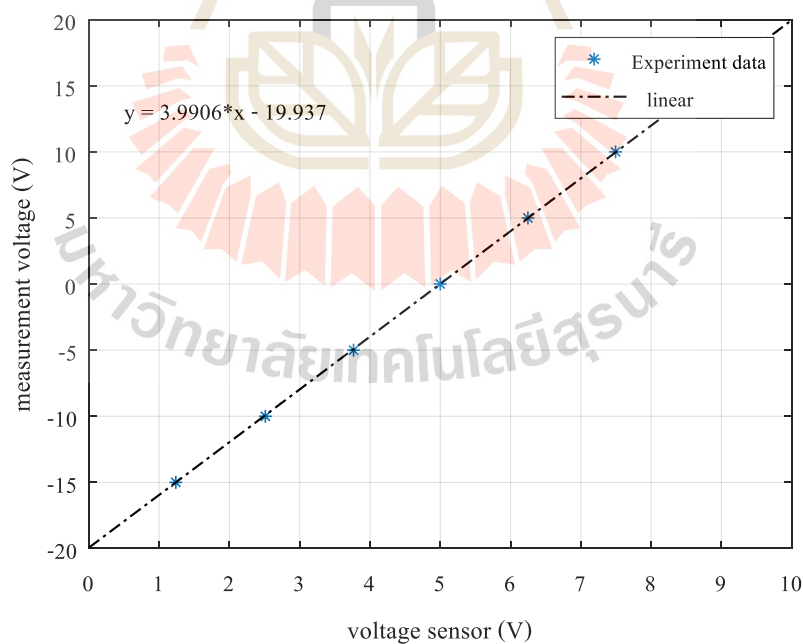
วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอนเป็นวงจรที่ลดทอนสัญญาณจาก ± 20 V เป็น 0 ถึง 5 V เพื่อใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้วงจรผลต่างเพื่อยกระดับแรงดัน (Up-set amplifier) รวมวงจรบัฟเฟอร์ซึ่งได้เลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ OP07 โดยกำหนดให้แรงดันอินพุตที่เข้าลดทอนสัญญาณลงโดยใช้วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage division) จาก ± 20 V เป็น ± 2.5 V แล้วนำสัญญาณที่ได้เข้าที่ขาบวกของออปแอมป์ และใช้วงจรแบ่งแรงดันให้มีพิกัด -2.5 V เข้าที่ขาลบของออปแอมป์ สัญญาณที่ได้จากออปแอมป์ตัวที่ 1 จะกลับเฟส ดังนั้นต้องต่อด้วยวงจรบัฟเฟอร์เพื่อกลับเฟสอีกครั้งดังแสดงในรูปที่ ค.13 และ ค.14 สามารถทดสอบการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าทั้ง 2 วงจรได้ดังตารางที่ ค.4 ซึ่งได้ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าในย่าน -20 V ถึง 20 V จากผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าสามารถนำไปพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ ค.16 และ ค.17

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าพิกัด 20 V

วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า (V) ตัวที่ 1		วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า (V) ตัวที่ 2	
แรงดันไฟฟ้า (V)	การวัด (V)	แรงดันไฟฟ้า (V)	การวัด (V)
-20	0.011	-20	-0.043
-15	1.258	-15	1.237
-10	2.504	-10	2.511
-5	3.753	-5	3.766
0.0080	4.9999	0.0072	5.0001
5	6.250	5	6.247
10	7.498	10	7.494
15	8.746	15	8.752
20	9.999	20	10.003



รูปที่ ค.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์
พิกัด 20 V ตัวที่ 1



รูปที่ ค.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์
พิกัด 20 V ตัวที่ 2

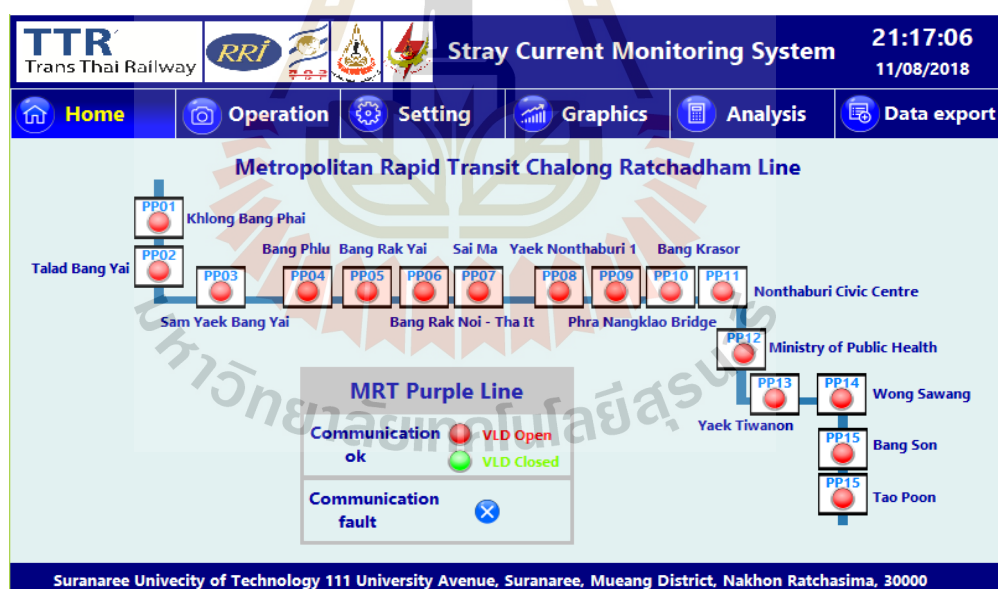
จากรูปที่ ค.16 และ ค.17 สามารถหาสมการเชิงเส้นเพื่อแทนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 ได้จากสมการที่ (ค.3) และ (ค.5) โดยผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเป็น 0.025428 และ 0.16958 ตามลำดับ

$$v_{in} = 4.0053 \times v_{\text{sensor}} - 20.034 \quad (\text{ค.3})$$

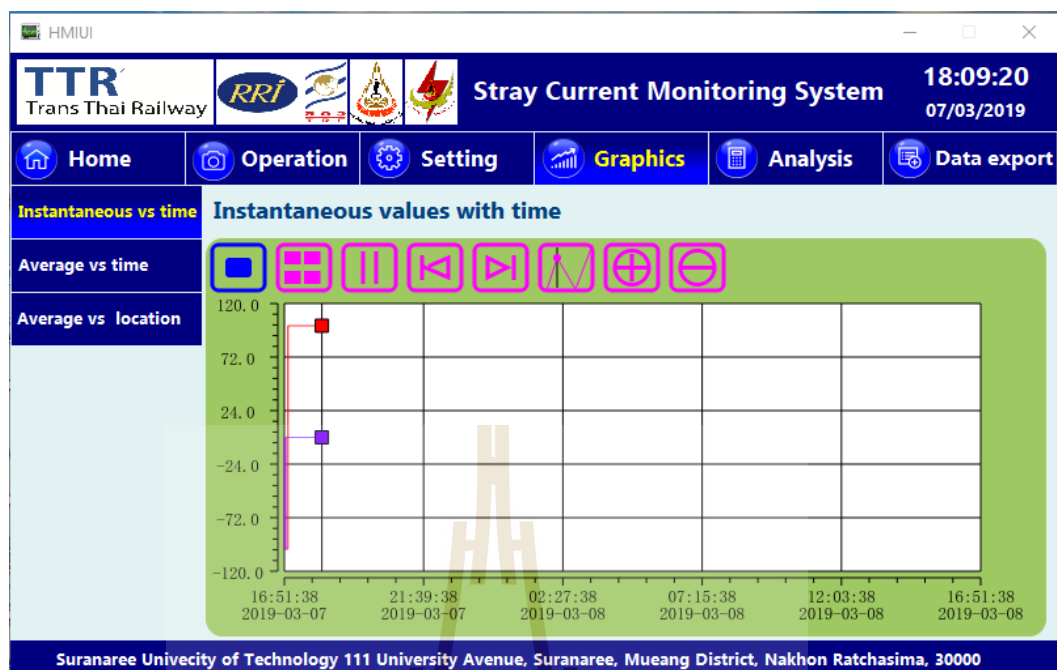
$$v_{in} = 3.9906 \times v_{\text{sensor}} - 19.937 \quad (\text{ค.4})$$

ค.1.3 ระบบตรวจวัดกระแสรั่วไหล

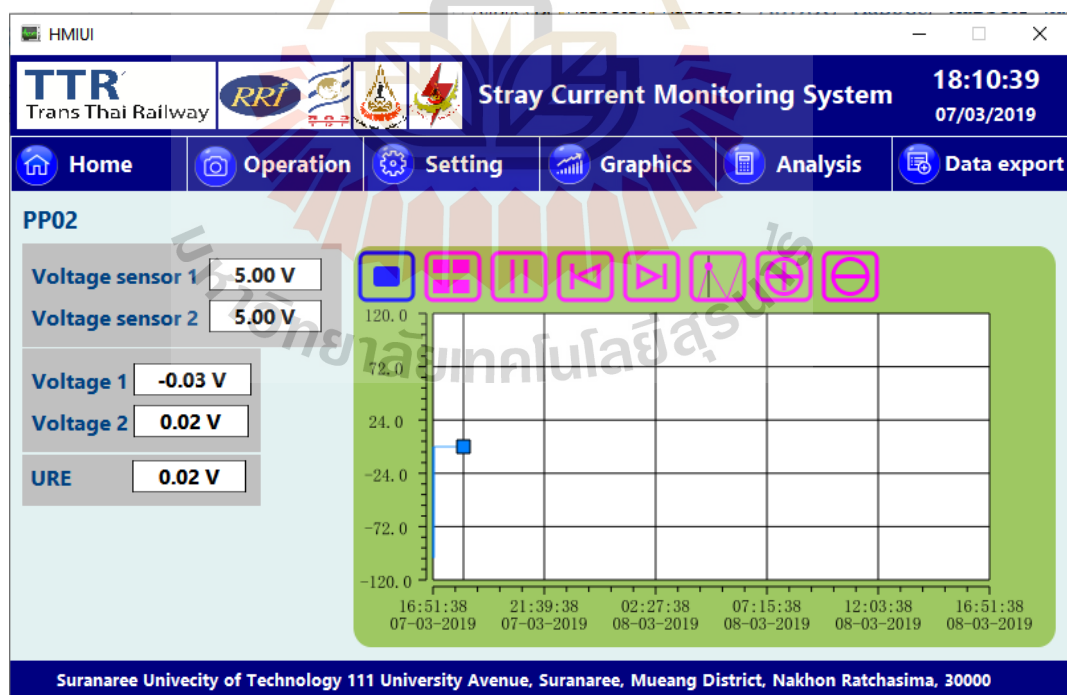
หน้าโฮมของระบบตรวจวัดกระแสรั่วไหลแสดงได้ดังรูปที่ ค.18 ซึ่งแสดงตัวอย่างการตรวจวัดกระแสรั่วไหลในโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) โดยรูปที่ ค.19 แสดงหน้ากราฟของระบบตรวจวัดกระแสรั่วไหล ซึ่งเป็นการแสดงการตรวจจับศักย์ไฟฟ้าที่รางในสถานีที่ PP01 และ PP02 ตามลำดับ และรูปที่ ค.20 แสดงการวัดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า PP02



รูปที่ ค.18 หน้าโฮมของระบบตรวจวัดกระแสรั่วไหล

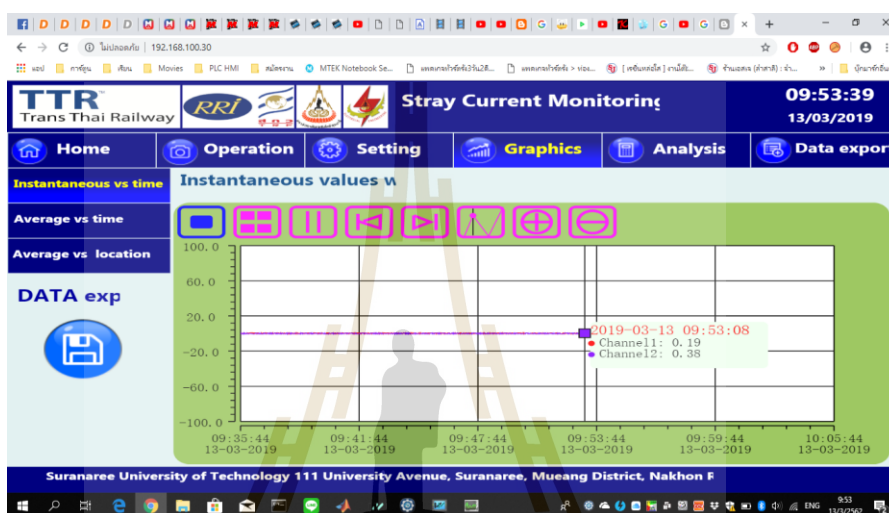


รูปที่ ค.19 หน้ากราฟิก ของระบบตรวจวัดกระแสรั่วไหล



รูปที่ ค.20 การวัดแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า PP02

นอกจากนี้ระบบตรวจจับกระแสรั่วไหลที่สร้างขึ้นสามารถแสดงผลการทดสอบผ่านสาย LAN โดยใช้ web browser โดยการป้อน IP ของจอ Touch screen ดังแสดงในรูปที่ ก.21 และยังสามารถเก็บข้อมูลเป็น Data logging โดยเข้าไปที่โปรแกรม Data Viewing Tools ของ WECON หลังจากนั้นค้นหาไฟล์ที่เก็บข้อมูลไว้ดังแสดงในรูปที่ ก.22 และ Export ข้อมูลเป็นไฟล์ .csv แสดงได้ดังรูปที่ ก.23



รูปที่ ก.21 ผลการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าผ่าน web browser

IndexID	CollectTime	Channel1	Channel2
1	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
2	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
3	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
4	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
5	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
6	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
7	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
8	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
9	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
10	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
11	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
12	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
13	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
14	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
15	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
16	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
17	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14
18	2019-03-12 13:32:01	0.07	-0.14

รูปที่ ก.22 การข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Data Viewing Tools ของ WECON

A	B	C	D
IndexID	CollectTime	Channel1	Channel2
1	12/3/2019 13:32	0	0
2	12/3/2019 13:32	0.07	-0.1
3	12/3/2019 13:32	0.07	0.02
4	12/3/2019 13:32	0.07	-0.14
5	12/3/2019 13:32	0.07	0.02
6	12/3/2019 13:32	0.07	-0.18
7	12/3/2019 13:32	0.07	0.02
8	12/3/2019 13:32	0.07	0.02
9	12/3/2019 13:32	0.07	-0.14
10	12/3/2019 13:32	0.07	-0.02
11	12/3/2019 13:32	0.07	-0.02
12	12/3/2019 13:32	0.07	-0.02
13	12/3/2019 13:32	0.07	0.02
14	12/3/2019 13:32	0.07	0.02
15	12/3/2019 13:32	0.07	-0.14
16	12/3/2019 13:32	0.07	0.02
17	12/3/2019 13:32	0.07	-0.14
18	12/3/2019 13:32	0.07	-0.14
19	12/3/2019 13:32	0.07	0.02
20	12/3/2019 13:32	0.07	0.02
21	12/3/2019 13:32	0.07	-0.06
22	12/3/2019 13:32	0.07	-0.06
23	12/3/2019 13:32	0.07	-0.02
24	12/3/2019 13:32	0.07	0.02
25	12/3/2019 13:32	0.07	-0.14
26	12/3/2019 13:32	0.07	-0.14
27	12/3/2019 13:32	0.07	-0.14

รูปที่ ค.23 การ Export ข้อมูลเป็นไฟล์ .csv

ค.2 ผลการตรวจวัดกระแสรั่วไหล

การทดสอบตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่รางเทียบโครงสร้างดินสำหรับโครงสร้างยกระดับแบบทางเดี่ยวส่วน ชุดทดสอบนี้สามารถตรวจจับการวัดแรงดันระหว่างรางวิ่งกับดิน โดยมีการทดสอบดังต่อไปนี้

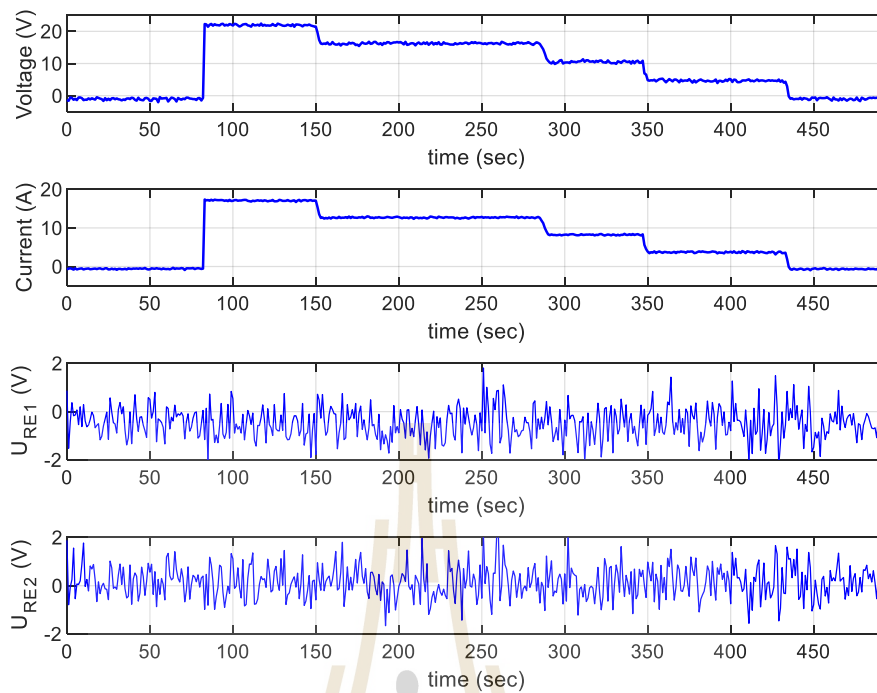
กรณีโหลดเปลี่ยนแปลง

การทดสอบในกรณี โหลดเปลี่ยนแปลงได้มีการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลด ทุก ๆ 2 นาที โดยกำหนดพิกัดแรงดันไฟฟ้าเป็น 20 15 10 5 และ 0 V ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ ค.24 กราฟแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดินในจุดวัดที่ 1 และ 2 (U_{RE1} และ U_{RE}) มีลักษณะของรูปกราฟที่ใกล้เคียงกัน

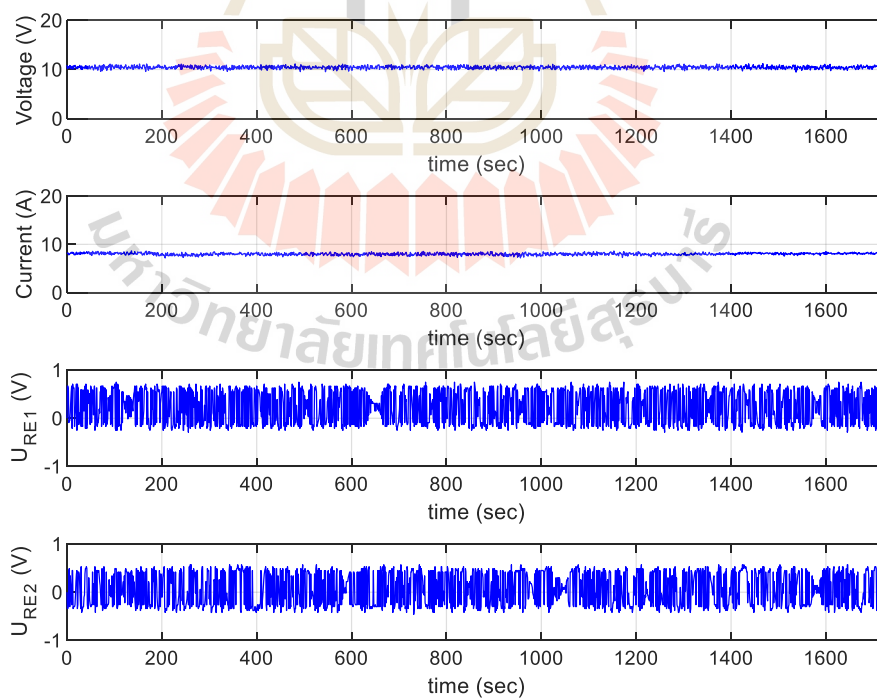
กรณีโหลดคงที่

การทดสอบตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่รางเทียบโครงสร้างดินในกรณีที่จ่ายไฟให้แก่ระบบคงที่ พิกัดแรงดัน 10 V ชุดทดสอบได้ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่รางในสถานะฝนตก อากาศเย็น และอากาศร้อนดังรูปที่ ค.25 จากผลการทดสอบให้ผลเช่นเดียวกันกับการทดสอบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง

ในการทดสอบจริงควรพิจารณาสภาพแวดล้อมซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดินโดยเฉพาะเวลาที่ฝนเพื่อออกแบบระบบป้องกันและอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ให้บริการ ช่างซ่อมบำรุงและอุปกรณ์ต่าง ๆ ของรถไฟฟ้า



รูปที่ ค.24 ผลการทดสอบในกรณีโหลดเปลี่ยนแปลง



รูปที่ ค.25 ผลการทดสอบกรณีโหลดคงที่

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a stylized sunburst or fan-like pattern. The entire emblem is set against a light background.

ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

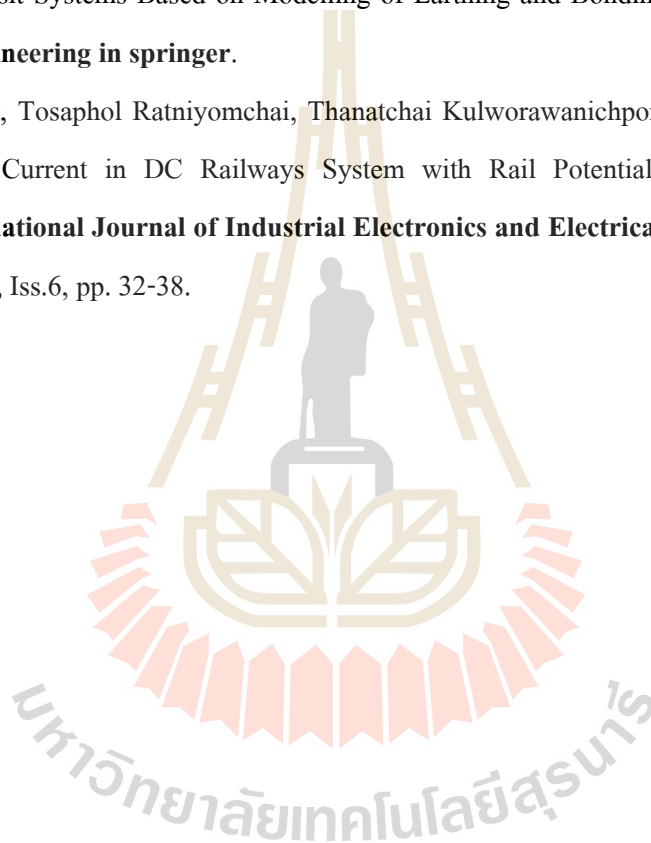
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

T. Chuchit and T. Kulworawanichpong, “Rail Potential Calculation between Traction Substations for DC Railway Systems”, **Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand**, [Accepted].

Tawat Cuchit, and Thanatchai Kulworawanichpong, (2019). Stray Current Assessment for DC Transit Systems Based on Modelling of Earthing and Bonding., **Journal of Electrical Engineering in springer**.

Tawat Chuchit, Tosaphol Ratniyomchai, Thanatchai Kulworawanichpong, (2018). Simulation of Stray Current in DC Railways System with Rail Potential and Structure Voltage. **International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering (IJIEEE)**. Vol. 6, Iss.6, pp. 32-38.





การคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางระหว่างสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง RAIL POTENTIAL CALCULATION BETWEEN TRACTION SUBSTATIONS FOR DC RAILWAY SYSTEMS

ธวัช ชูจิต¹ และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์²

^{1,2}สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาศักย์ไฟฟ้าที่รางในระบบรถไฟฟ้าขับเคลื่อนที่มีสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนสองสถานี เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์ที่สถานีไฟฟ้า ความปลอดภัยของผู้โดยสารและการป้องกัน โครงสร้างพื้นฐานของรถไฟอยู่ภายใต้การกักตุนเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดไว้หรือไม่ ในบทความนี้แสดงการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพื้นฐานและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่อวิเคราะห์กระแสและศักย์ไฟฟ้าที่ราง นอกจากนี้ยังได้แสดงสมการการคำนวณอย่างง่ายสำหรับการประมาณศักย์ไฟฟ้าที่รางและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าเพื่อให้ง่ายแก่การนำไปใช้ในการวิเคราะห์และประเมินกระแสรั่วไหลอีกด้วย สมการการคำนวณทางคณิตศาสตร์นี้ยังได้ตรวจสอบความถูกต้องแล้วว่าเป็นไปตามสมการในมาตรฐาน EN 50122-2

คำสำคัญ: ศักย์ไฟฟ้าที่ราง, ระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง, กระแสรั่วไหล

ABSTRACT

This paper presents a mathematical model for rail potential calculation in the DC electrified railway with two traction substations. The rail potential and traction substation voltage are essential for supply equipment, passenger safety and railway infrastructure protection against corrosion, all of which must comply with requirements and standards. The classical and simplified mathematical models are described in this study to analyses the rail potential and current. In addition, the simplified equations for estimating the rail potential and traction substation voltage are derived to simply determine the stray current. These equations can be used to analyses and calculate the stray current based on the approximate rail potential. They are also validated according to the equations in EN 50122-2.

KEYWORDS: rail potential, dc railway systems, stray current

1. บทนำ

ประมาณครึ่งหนึ่งของระบบรถไฟฟ้าทั่วโลกใช้สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงใช้พลังงาน (MW) ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าสูงที่แรงดันไฟฟ้า 750 - 3000 V ทำให้เกิดการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้าสูง โดยกระแสไฟฟ้าขับเคลื่อน (traction current)

Tawat Chuchit¹ and Thanatchai Kulworawanichpong²

^{1,2} School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.



Stray current assessment for DC transit systems based on modelling of earthing and bonding

Tawat Chuchit¹ · Thanatchai Kulworawanichpong¹

Received: 26 April 2018 / Accepted: 20 February 2019
 © Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

Abstract

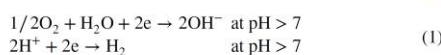
The paper presents results of a stray current assessment study performed for MRT Purple Line in Bangkok, Thailand. Factors of interest in the study are a rail-to-earth conductance per unit length and rail potential. A grounding system model is developed in MATLAB/Simulink using electrical resistances of track composite materials. From the simulation results, both conductance per unit length and rail potential comply with the European Standard EN 50122 for all viaduct structures and track configurations even in absence of stray current collector system.

Keywords Stray current · DC rail transit systems · Rail-to-earth conductance · Rail potential

1 Introduction

A railway track has running rails installed on sleepers, which in turn are placed on ballast, sub-ballast, sometimes an insulating layer and earth. A concrete slab permanent way is an alternative to sleepers and ballast. In electrified railways, running rails are also used as returning conductors. High track-to-earth electrical resistance is found in cases where new track is laid with well-insulating ballast on exceedingly dry sandy soils or where the rails are specifically insulated from sleepers shown in Fig. 1. In most cases, however, the track-to-earth resistance allows part of the return current to flow through earth, whereby the soil acts like an electrolyte. Currents leaving running rails (the intended return path) are called stray currents, and they can cause corrosion on metal pipes and other underground metallic installations in the vicinity of DC traction railway [1–10].

The corrosion due to stray current is an electrochemical process involving two reactions occurring simultaneously. Taking steel as an example, a part where stray current enters a metallic structure, cathodic reaction occurs as follows [1]:



where pH is the pH at a location where stray current flows out of the metal structure. A part where stray current leaves the metallic structure, anodic reaction occurs as follows:



The assessment of stray currents in DC rail transit systems is done to determine whether its magnitude is within acceptable range, if it is not, to take necessary measures that will lower the current so as to prevent damage to the railway infrastructure, nearby structures and underground metallic installations in the vicinity. The key factor that influences return current to flow out of the intended return circuit (running rails) is the conductance per unit length between the rails and earth. The rate of corrosion due to stray current is the main parameters used in risk assessment. Experience suggests that there will be no track damage over a period of 25 years, if the average stray current per unit length does not exceed 2.5 mA/m [2]. As it is impractical to measure stray currents directly, conductance of returning circuit to earth and rail potential is used to indirectly determine magnitude of stray current. Consequently, standards have been established for maximum acceptable values of the two parameters, conductance of returning circuit to earth and average rail potential (over a period of 24 h or multiples) [2].

Calculation of current flow and induced voltage in the tunnel structure by means of distributed and lumped models is presented in [5] and [6], the later uses MATLAB GUI. A multi-train simulator to simulate the behaviour of the running rail voltage and stray current is presented in [7–9], and

✉ Thanatchai Kulworawanichpong
 thanatchai@gmail.com

¹ School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

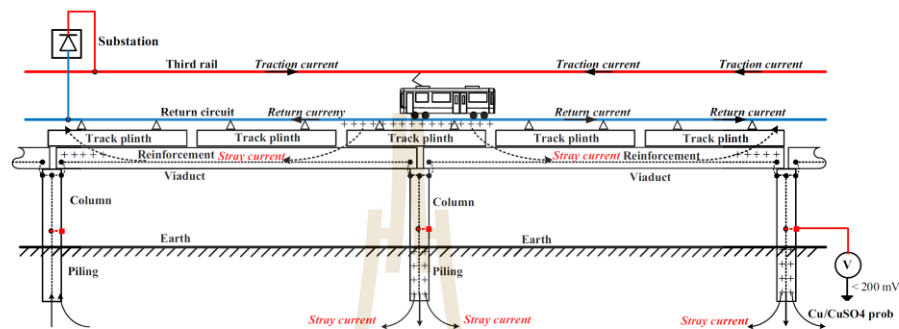


Fig. 1 Stray current path of a viaduct structure

simulation of stray currents using CDEGS and MATLAB/Simulink is presented in [10]. Assessment of stray currents in DC rail transit systems must conform to standards, analysis and assessment to measure the Red Line of the Dubai Metro, for example, was done according to EN 50122-2 [11].

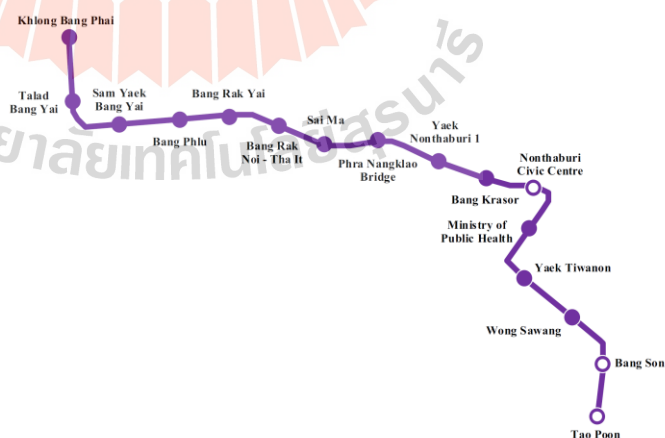
The aim of this work is to model the earthing system of the MRT Purple Line in Bangkok, Thailand, shown in Fig. 2 [12] and use the model to compute and assess stray currents. The European standard EN 50122-2: 2010 Railway applications—Fixed installations—Electrical safety, earthing and return circuit Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by DC traction systems is used. Other standards may be referred to as appropriate. The commonly

used single, double and triple viaduct railway structures are studied.

2 Stray current assessment

The amount of stray currents and their effects depend on the overall system design of the traction power supply. As aforementioned, based on experience, no damage occurs in the tracks over a period of 25 years, if the average stray current per unit length does not exceed 5 mA/m per track. Conductance per unit length between running rails and earth is the most critical parameter to consider in the design of an electrified railway system. After the completion of the

Fig. 2 Route map of MRT Purple Line in Bangkok, Thailand



railway system, if values for the conductance per unit length G'_{RE} and average rail potential U_{RE} satisfy (3) and (4) and are maintained, no further investigations are requested [2].

$$G'_{RE} \leq 0.5 \text{ S/km per track and } U_{RE} \leq +5 \text{ V for open formation} \quad (3)$$

$$G'_{RE} \leq 2.5 \text{ S/km per track and } U_{RE} \leq +1 \text{ V for closed formation} \quad (4)$$

in heavy railways, measured rail-to-earth conductance values range from less than 1 mS/m to about 25 mS/m [11]. The running rail voltage must be measured and averaged over a period of 24 h or multiple of 24 h. Since MRT Purple Line is of open formation type (the running rails are laid above the surrounding surface), its conductance per unit length and average rail potential must not exceed 0.5 S/km and +5 V per track, respectively.

The traction return current flowing in the running rails causes changes in the rail potential leading to stray current flow into the earth via the track insulation. The amount of corrosion (metal loss) as a result of stray current depends on the current level. The calculation method of the stray currents passing from the running rails to the earth is based on EN 50122-2, Appendix C1. The change in rail potential is calculated as follows:

$$U_{RE} = 0.5 \times I \times L \times R_C \times \left(1 - e^{-(L/L_C)}\right) \quad (5)$$

$$R_C = \sqrt{R'_R / G'_{RE}} \quad (6)$$

$$L_C = 1 / \sqrt{R'_R / G'_{RE}} \quad (7)$$

where U_{RE} is the rail potential, I is the average value of the traction return current in the considered section in the hour of the highest load, R_C is the characteristic resistance of the system running rails/structure, L_C is the characteristic length of the system running rails/structure, L is the length of the considered line section, R'_R is the longitudinal resistance per unit length of the running rails including parallel return conductors, and G'_{RE} is the conductance per unit length of the running rails versus earth.

3 Computer modelling of stray current

Earthing system modelling of a single viaduct electrified railway is based on a civil structure shown in Fig. 3a. On top of a viaduct, there is a track plinth on which running

Fig. 3 Cases of study for the viaduct structures

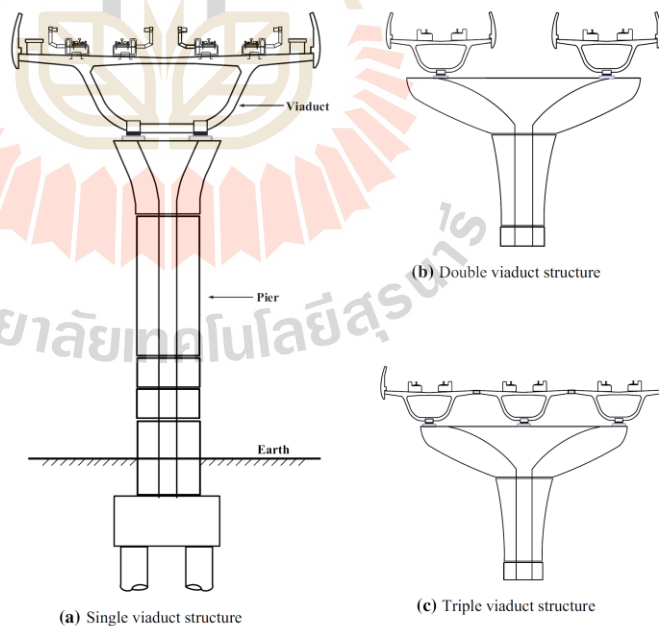
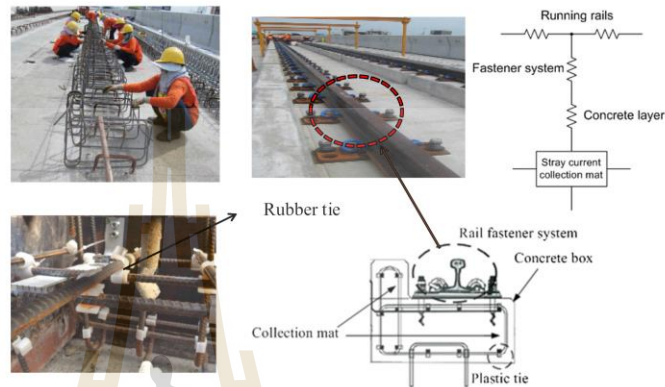


Fig. 4 Rail fastening system and track plinths



rail is installed as shown in Fig. 4. Stray current collector is embedded in the plinth as shown in Fig. 4, and at each end of the plinth terminals of the stray current collector are exposed for cable connection.

Resistance model of the earthing system comprises resistances of track composite materials [13, 14] such as iron (In), concrete, copper (Cu) and rebar (DB25). Resistance of a particular composite material is calculated using Eq. 8 [15]. And composite materials are showed in Table 4.

$$R = \rho l / A \quad (8)$$

where ρ is electrical conductivity, l is length, and A is cross-sectional area of the material.

Circuit model for a section of the single viaduct under study is illustrated in Fig. 5 through Fig. 8 [13, 14]. The circuit model of the single viaduct structure under studied is illustrated in Figs. 5 and 6. This structure is a section of the single viaduct supported by one column.

A simple circuit model of a track plinth equipped with stray current collecting mat is illustrated in Fig. 7. Steel rods in the track plinth are tied to one another using plastic clips. A longitudinal view of steel rods embedded in the plinth, laid in parallel underneath the running rail, is shown in Fig. 8. The steel rods are used to collect stray currents and enforce them to flow back to the negative DC bus bar at the substation. However, in the MRT Purple Line, each longitudinal steel of the two consecutive plinth blocks is not bonded (Fig. 7).

Each track plinth consists of eight fasteners attached to the running rails. A simplified stray current-resistive model for a track plinth is created as shown in Fig. 8.

According to Fig. 7, the stray current-resistive model of one track plinth is created as shown in Fig. 8.

Figure 8 shows one track plinth resistive model comprising 8 pins in longitudinal direction. The described resistive models for plinth, viaduct and pier are connected to

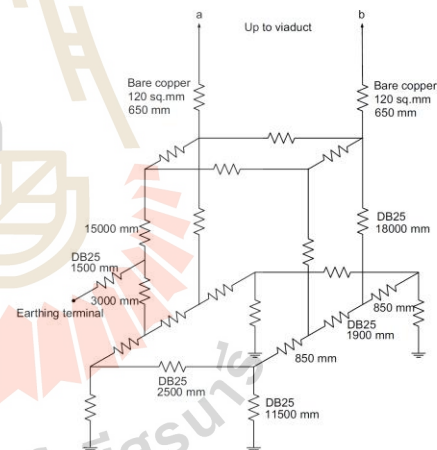


Fig. 5 Resistive model of a pier in single viaduct structure

form a complete earthing and bonding resistive model of a double-track viaduct, i.e. points a and b of the pier model in Fig. 5 connect to points c and d of the viaduct model in Fig. 6, respectively. Also, four of the track plinth models in Fig. 8 connect to the viaduct model at point e, f, g, and h in Fig. 6. The model for MATLAB/Simulink software is shown in Fig. 9. It is the model for rail-to-earth conductance test of the single viaduct structure. The same model is used for stray current assessment with parameter setting as shown in Appendices.

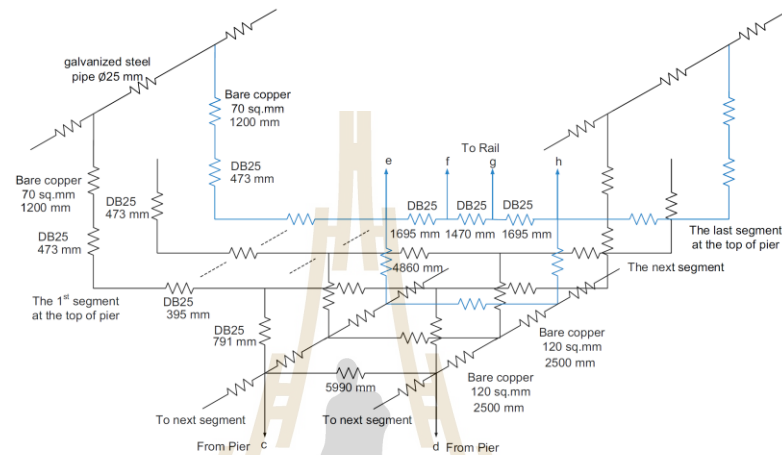


Fig. 6 Resistive model of a viaduct in the single viaduct structure

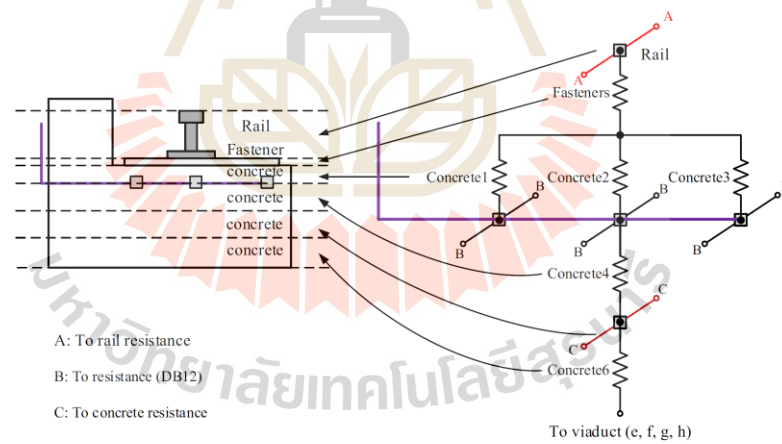


Fig. 7 Resistive model of a track plinth section

4 Measurement of the rail-to-earth resistance

The rail-to-earth resistance in the MRT purple line, Thailand, was measured four test points on the single viaduct structure, see Fig. 10.

The rail-to-earth conductance per length can be calculated from the rail-to-earth resistance as in Eq. 9.

$$G'_{RE} = \frac{1}{L} \times \frac{1}{2R_{RE}} = \frac{1}{1 \times 10^{-3}} \times \frac{1}{2 \times \left(\frac{0.67+0.74+0.69+0.68}{4} \right)} = 0.00287 \text{ S/km} \quad (9)$$

Fig. 8 Resistive model of one track plinth

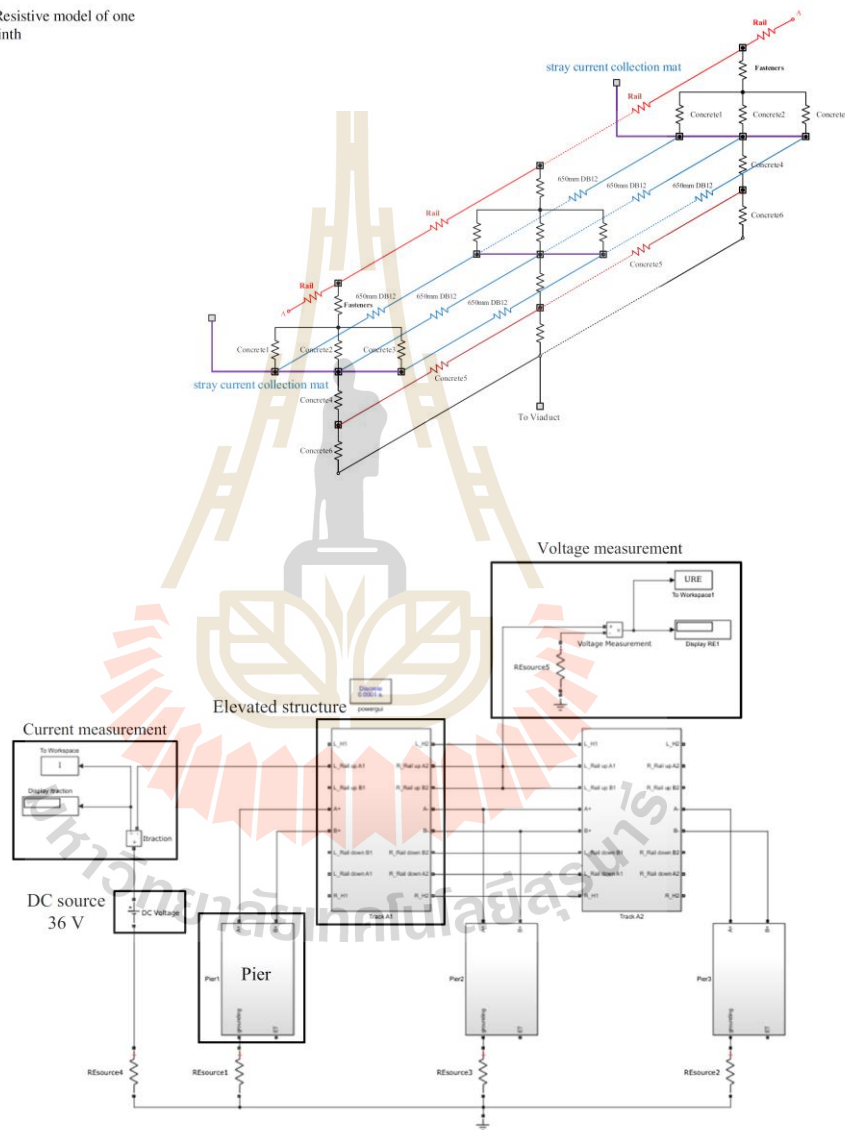
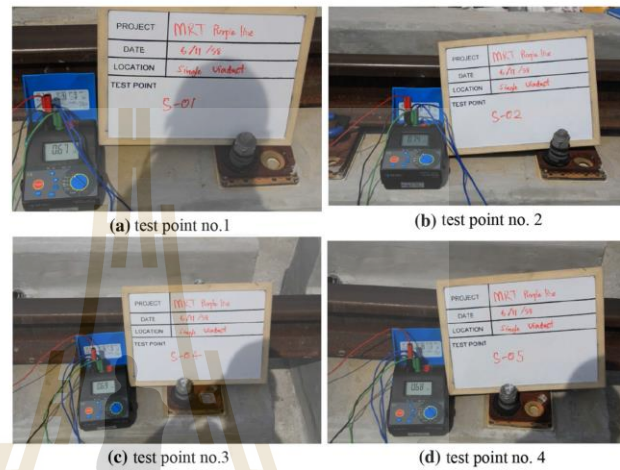


Fig. 9 Model in MATLAB/Simulink for the rail-to-earth conductance test for the single viaduct structure

Fig. 10 Measurement of the rail-to-earth resistance one rail



5 Simulation and results

Effect of not having stray current collection mats connected to each other is studied. Parameters of interest for the study are rail-to-earth conductance per unit length and rail potential.

5.1 Rail-to-earth conductance per unit length

According to the EN 50122-2: 2010, rail-to-earth conductance of running rails can be obtained by injecting current from a DC source to a rail section with both ends open or perfectly insulated from the adjacent rail sections as shown in Fig. 11.

The conductance per unit length is then calculated as follows.

$$G'_{RE} = \frac{1}{L} \times \frac{I}{U_{RE}} \quad (10)$$

where L is the length of the considered line section, U_{RE} is the voltage between the rail and earth, I is the injected current, and parameter settings are shown in Table 4.

MATLAB/Simulink block model of the rail-to-earth conductance per unit length test circuit is shown in Fig. 9, consisting of track and pier's blocks, 36 V DC source, and measurement sections (current and voltage measurement).

As seen in Fig. 9 and Eq. 10, the results show that $U_{RE} = 36.9995$ V, $I = 0.9215$ mA, $L = 80$ m and fasteners resistances are 10 M Ω . Therefore, conductance per unit length is 0.32 mS/km.

To summarize the results of the conductance per unit length as per EN 50122-2: 2010, the criteria for the

Fig. 11 Measurement of the rail-to-earth conductance

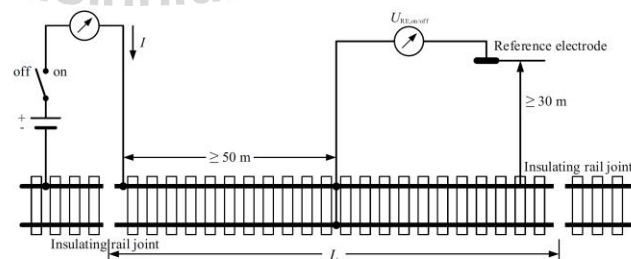


Table 1 Rail-to-earth conductance per unit length

No.	Fasteners (Ω)	G'_{RE} (S/km)		
		Single	Double	Triple
1	100	13.341	14.992	14.994
2	300	7.275	7.740	7.740
3	500	5.001	5.216	5.217
4	700	3.810	3.934	3.934
5	900	3.077	3.158	3.158
6	1000	2.807	2.874	2.874
7	2000	1.495	1.514	1.514
8	3000	1.019	1.028	1.028
9	4000	0.773	0.778	0.778
10	5000	0.623	0.626	0.626
11	6000	0.521	0.523	0.523
12	7000	0.448	0.450	0.450
13	8000	0.393	0.394	0.394
14	9000	0.350	0.351	0.351
15	10,000	0.316	0.316	0.316
16	100,000	0.032	0.032	0.032
17	1,000,000	0.0032	0.0032	0.0032
18	10,000,000	0.00032	0.00032	0.00032

maximum conductance per unit length must not be greater than 0.5 S/km/track for the single viaduct structure. With rail fasteners' resistance varied from 100 Ω to 10 M Ω , results for rail-to-earth conductance per unit length are presented in Table 1 and in Fig. 12, for the single, double and triple viaduct structures.

Rail-to-earth conductance per unit length exceeds the standard limit when rail fastener resistance varies from 100 Ω to 6 k Ω . Considering the results in Table 1 and

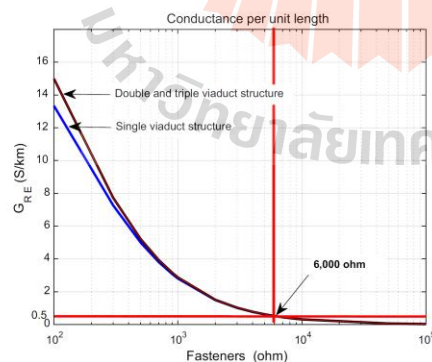
**Fig. 12** Rail-to-earth conductance per unit length versus the resistance of the fastener

Fig. 12, the rail fasteners resistances are varied from 100 Ω to 10 M Ω to see the critical value of the rail-to-earth conductance per unit length that conforms to the standard. As a result, the conductance per unit length at the rail fastener of 6000 Ω exceeds 0.5 S/km per track (EN 50122-2:2010) for the single, double and triple viaduct structures. It is recommended that the resistance of the rail fastener should not be less than 6000 Ω to ensure that the rail-to-earth conductance per unit length is less than 0.5 S/km per track for the single, double and triple viaduct structures.

From the results in Eq. 9, the fastener resistance is in the range of 1–10 M Ω at the time of measurement. So, the simulator program with the proposed model can be used to determine the critical point of fastener resistance.

5.2 Calculation of rail potential

The MRT Chalong Ratchadham Line (MRT Purple line) of Bangkok's Metropolitan Rapid Transit system in Table 2 is used [12]. It consists of 16 passenger platforms and 10 rectifier substations. The trains receive electrical power from third conductor at 750 V.

Parameters used in rail potential calculation are as follows: the average value of the traction return current in the considered section is 4000 A, resistance of running rails is 18.08 m Ω /km for two rails at 40 $^{\circ}$ C (Appendices) and rail-to-earth conductance per unit length is 0.0032 S/km (at 1 M Ω rail fastener resistance, a value corresponding to wet conditions).

Calculated rail potentials between traction substations are presented in Table 3 showing that the maximum rail potential between the substation-Sai Ma and Yaek Nonthaburi 1 (PP07-PP09) is 110.77 V. The rail potential is lower than the maximum permissible body voltage in DC traction systems which is 120 V (for time duration greater than 300 s) in accordance with EN 50 122-1.

6 Conclusion

This study on double-track section of single, double and triple viaduct structures was carried out by computer simulation to analyse rail-to-earth conductance and the structure-to-earth voltage shift according to the EN 50122-2: 2010.

As per EN 50122-2: 2010, maximum conductance per unit length and average stray current per unit length must not be greater than 0.5 S/km per track and 2.5 mA/m per track, respectively.

From the simulation results, the conductance of the MRT Purple line per unit length is within the EN standard limit for a single, double and triple viaduct structures when rail fastener's resistance is not less than 6000 Ω . In addition, rail potential between traction substations of the MRT Purple

Table 2 MRT Purple line data, Bangkok, Thailand

Station code	Station Name	Distance (km)	Route map
PP01	Khlong Bang Phai	0.00	
PP02	Talad Bang Yai	1.27	
PP03	Sam Yaek Bang Yai	1.56	
PP04	Bang Phlu	1.57	
PP05	Bang Rak Yai	1.20	
PP06	Bang Rak Noi - Tha It	1.25	
PP07	Sai Ma	1.25	
PP08	Phra Nangklao Bridge	1.47	
PP09	Yaek Nonthaburi 1	1.63	
PP10	Bang Krasor	1.26	
PP11	Nonthaburi Civic Centre	0.90	
PP12	Ministry of Public Health	1.79	
PP13	Yaek Tiwanon	1.20	
PP14	Wong Sawang	1.72	
PP15	Bang Son	1.29	
PP16	Tao Poon	1.58	

Table 3 Rail potential for MRT Purple line

Subsection	Distance (km)	U_{RE} (V)
PP01-PP02	1.27	45.70
PP02-PP03	1.56	56.07
PP03-PP05	2.77	99.10
PP05-PP07	2.50	89.54
PP07-PP09	3.10	110.77
PP09-PP11	2.16	77.46
PP11-PP13	2.99	106.89
PP13-PP14	1.72	61.78
PP14-PP15	1.29	46.41
PP15-PP16	1.58	56.78

50122-1. Therefore, both conductance per unit length and rail potential are within the EN standard limit for all viaduct structure and track configurations.

This stray current assessment study demonstrates that the proposed absence of a traditional stray current collector system delivers the desired system performance, in accordance with the European Standard EN 50122.

Acknowledgements This work is partially supported by the Thailand Research Fund through the Research and Researchers for Industries-RRI Ph.D. Program for supporting this research.

Appendix: parameter setting

Table 4 shows parameter setting of simulation of model in MATLAB/Simulink for the single, double and triple viaduct structures.

line is calculated according to EN 50122-2 in wet conditions (at 1 M Ω rail fastener resistance). It is found that the maximum rail potential is not exceeding the maximum permissible body voltage in DC traction systems which is 120 V (for a touch period greater than 300 s) in accordance with EN

Table 4 Parameter setting

Parameter	Value
Human resistance for touch voltage calculation	1000 Ω [16]
Contents of DB25 (SD50) [17]	Mn (1.8%) + P (0.05%) + S (0.05%)
Resistivity/resistance of DB25 ($A = 490.9$ sq mm) [17]	0.2385 $\mu\Omega$ m (0.486 m Ω /m)
Resistivity/resistance of bare copper ($A = 70$ sq mm and 120 sq mm)	0.0168 $\mu\Omega$ m [15]
Resistivity of galvanized steel pipe ($\varnothing 25$ mm, 4 mm thickness) ($A = 263.9$ sq mm)	0.1 $\mu\Omega$ m [15]
Resistivity of concrete resistance (320 ksc.)	100 $\mu\Omega$ m [18]
Resistivity of ground rod ($\varnothing 16$ mm \times 3000 mm) ($A = 201.1$ sq mm)	0.0168 $\mu\Omega$ m [15] (83.5 m Ω /m)
Resistivity of 1 \times 6 THW ($A = 6$ sq mm)	0.0168 $\mu\Omega$ m [15] (2.8 m Ω /m)
Resistivity of 1 \times 16 THW ($A = 16$ sq mm)	0.0168 $\mu\Omega$ m [15] (1.05 m Ω /m)
Resistivity of 1 \times 95 THW ($A = 95$ sq mm)	0.0168 $\mu\Omega$ m [15] (0.177 m Ω /m)
Resistivity of roof (metal sheet), 4 mm thickness	0.1 $\mu\Omega$ m [15]
Resistivity of roof column ($\varnothing 406.4$ mm, 9 mm thickness) ($A = 11,236$ sq mm)	0.1 $\mu\Omega$ m [15]
Resistivity of lightning air terminal ($\varnothing 16 \times 1000$ mm) ($A = 201.1$ sq mm)	0.0168 $\mu\Omega$ m [15] (83.5 m Ω /m)
Resistivity of copper tape (25 \times 3 mm, $A = 75$ sq mm)	0.0168 $\mu\Omega$ m [15] (0.224 m Ω /m)
Earthing resistance	0.2 Ω
Rail fasteners	10 M Ω (dry condition) 1 M Ω (wet condition)
Running rails (60E1)	$34 \times [1 + 0.00317 \times (T - 20)] \mu\Omega$ where $T = 80$ $^{\circ}\text{C}$

References

- Kiessling F, Puschmann R, Schmieder A, Schneider E (2009) Direct-current traction system. In: Kiessling F, Puschmann R, Schmieder A, Schneider E (eds) Current return circuit and earthing. Contact lines for electric railways: planning, design, implementation, maintenance, 2nd edn. Publicis Publishing, Germany, pp 803–824
- EN 50122-2 (2010) Railway applications—fixed installations—electrical safety, earthing and return circuit part 2: provisions against the effects of stray currents caused by DC traction systems
- EN 50122-1 (2011) Railway applications: fixed installations—electrical safety, earthing and the return circuit—part 1—protective provisions against electric shock
- Rodríguez JV, Feito JS (2013) Calculation of remote effects of stray currents on rail voltages in dc railways systems. IET Electr Syst Transp 3(2):31–40
- Fichera F, Mariscotti A, Ogunsola A, Sandrolini L (2013) Comparison of distributed and lumped parameters stray current models. In: AFRICON 2013. IEEE, Africa, pp 1–5
- Fichera F, Mariscotti A, Ogunsola A, Sandrolini L (2013) Evaluating stray current from DC electrified transit systems with lumped parameter and multi-layer soil models. In: IEEE EUROCON 2013. IEEE, Croatia, pp 1187–1192
- Ramos G, Leal AF, Rios MA, Roa LF (2014) Grounding model in multi-train DC traction systems. IEEE Lat Am Trans 12(2):169–175
- Alamuti MM, Zare A, Savaghebi M (2008) Reversed diode earthing scheme in DC traction power system. In: Universities power engineering conference, 2008. IEEE, Italy, pp 1–5
- Ogunsola A, Sandrolini L, Mariscotti A (2015) Evaluation of stray current from a DC-electrified railway with integrated electric-electromechanical modeling and traffic simulation. IEEE Trans Ind Appl 51(6):5431–5441
- Charalambous CA, Cotton I, Aylott P (2008) A simulation tool to predict the impact of soil topologies on coupling between a light rail system and buried third-party infrastructure. IEEE Trans Veh Technol 57(3):1404–1416
- Mariscotti A, Reggiani U, Ogunsola A, Sandrolini L (2012) Mitigation of electromagnetic interference generated by stray current from a dc rail traction system. In: International symposium on electromagnetic compatibility. IEEE, Italy, pp 1–6
- MRT Purple Line. https://en.wikipedia.org/wiki/MRT_Purple_Line. Accessed 20 Feb 2018
- Sandrolini L (2013) Analysis of the insulation resistances of a high-speed rail transit system viaduct for the assessment of stray current interference. Part 1: Measurement. Orig Res Article Electr Power Syst Res 103:248–254
- Sandrolini L (2013) Analysis of the insulation resistances of a high-speed rail transit system viaduct for the assessment of stray current interference. Part 2: Modelling. Orig Res Article Electr Power Syst Res 103:214–247
- Alexander KC, Sadiku NOM (eds) (2009) Ohm's law. In: Basic laws. Fundamentals of electric circuits, 4th edn. McGraw-Hill, New York City, pp 30–31
- IEC60479-1 (2005) Effects of current on human beings and livestock: Part 1—General aspects
- TIS 24-2548 Steel bars for reinforced concrete: deformed bars (2548)
- Electrical resistivity measurement of concrete. https://wikivisualy.com/wiki/Electrical_resistivity_measurement_of_concrete. Accessed 20 Feb 2018

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

SIMULATION OF STRAY CURRENT IN DC RAILWAYS SYSTEM WITH RAIL POTENTIAL AND STRUCTURE VOLTAGE

¹TAWAT CHUCHIT, ²TOSAPHOL RATNIYOMCHAI, ³THANATCHAI KULWORAWANICHPONG

^{1,2,3}School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue,
Muang District, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand
E-mail: ¹c.tawat@hotmail.com, ²tosaphol@sut.ac.th, ³thanatchai@gmail.com

Abstract - In general, the train's stray current study starts with the estimated rail potential with EN 50122-2, which is calculated at the time to be more realistic and complete while rail potential with the train moving calculation is determined, which main function to be railway service designing. A single-train simulator model was developed to collect and evaluate stray currents using multi conductor systems and the calculation of power flow was used in this study using the current injections methods (CIM). Furthermore, this model also calculates the voltage in the metal structure. The algorithm of the train movement is applied in power flow calculation with MATLAB/M-file applied to Bangkok Transit System (BTS) Sky Train Silom Line as a case study. It is expected to show the efficiency of the single-train movement modelling to calculate the rail potential, the structure voltage and energy demand at substations and the voltage profile of the train during the train movement.

Index Terms - Stray Current, Rail Potential, Dc Railways System, Structure Voltage, Single-Train Movement

I. INTRODUCTION

DC railways system is widely used for metropolitan areas around the world. It was developed to reduce the crowded traffic and facilitate in mass transit system. The electric power is supplied to the train by using a third rail and running rails are used as a return conductor for traction current. Most of the supply currents drawn by the traction system while some electric currents can flow through the underground, which is the metallic structure. Due to insufficient insulation between the tracks and the earth, some electric currents are able to flow through the earth back to the traction substation. This situation causes electrical corrosion and damage to nearby structures and infrastructures [1-4], which are known as leakage currents or stray currents. Generally, the directed measurement of stray currents is difficult; hence, it is able to measure the voltage between the running rail and earth instead. The difference in this voltage is called the rail potential. In addition, the rail potential may jeopardise the safety of persons with a permissible touch voltage not over than 120 V of a period which more than 300 secs for DC railway systems with EN 50122-1 standard. However, the rail potential should not exceed +5 V within 24-hour with EN 50122-2 standard [5-7]. To avoid or reduce these defects, the rail potential must be evaluated and controlled. Therefore, it is necessary to modelling for considering the rail potential and preliminary study and evaluation.

In recent years, some research has been carried out on the simulations of train movements with different models and methods of observing rail potential and stray currents [8-10]. A study of the train movement

model developed a model of a single-train by pivoting a metal structure under tracks. This article focuses on a construction of a single-train movement model, considering the rail potential and voltage in structures using multi-conductor systems. A power flow calculation is applied in this study using the current injection methods (CIM), which is widely adopted as a technique for power network solution in the DC railway power supply study to calculate the rail potential, the structure voltage, energy demand at substations and the voltage profile of the train during the train movement. The algorithm of the train movement and power flow calculation are calculated in the MATLAB/M-file.

Bangkok Transit System (BTS) Sky Train as the Silom Line is a case study, which has a distance of 13.512-km, 12 passenger stations and 750 VDC power supply through the third rail. The simulation program simulates the single-train movement in normal condition, which all the traction substations are ungrounded.

II. TRAIN MOVEMENT CALCULATION

The traction energy is supplied to the train to accelerate the linear motion of the train along the track. The linear motion of the train is the result of the electricity supplied to the traction motor used to drive the wheel. If the power supply is sufficient to overcome several of the friction forces, the remaining force will be applied to the train to accelerate the train to move with the acceleration. In this section, the calculation of the train dynamic is considered. To start with the free body diagram of the electric locomotive movement shown in Fig. 1, with the trajectory of the

electric train on the running rail in order to analysis in general, a running rail is raised to the horizontal angle affecting to the movement with the gravity which is support or nonsupport the movement. Therefore, the train movement is simply followed by the Newton's second law of motion shown in (1) [11]:

$$F = TE - F_{grad} - T_R = M_{eff}\alpha \quad (1)$$

where M_{eff} is the effective mass (kg),

TE is the tractive force (N),

T_R is train resistance (N),

F_{grad} is gradient force (N),

α is train acceleration (m/s²),

F is the total force (N).

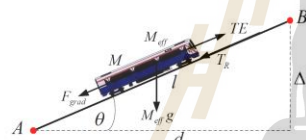


Fig. 1 Free body diagram of the train

A. Gradient force

Gradient force is a range of slope or range of horizontal plane from point A to point B, as shown in Fig. 1. Gradient force or force due to slope of motion [11] is obtained as in (2):

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

where g is the acceleration due to gravity, 9.8 m/s²,

Δh is rise of the slope,

l is the slope length,

θ is the slope's angle with respect to the horizontal line.

B. Train resistance

The train resistance can be calculated from Davis's equation as shown in (3), where v is the speed of the train in km/h, A (kN), B (kNh/km) and C (kNh²/km²) are constant called Davis coefficients [12]. Only Davis equations are considered as a resistance force of the train motion in this article.

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

C. Electric power of the train

The power consumed by a train corresponding to the tractive effort (TE) and instantaneous speed v is given by the following equation [13]:

$$P = \frac{TE \times v}{\eta} \quad (4)$$

where η denotes the efficiency of the power conversion in terms of electrical input power to the mechanical output power at the wheels.

D. Train of motion

The movement of the train between two stations is typically characterized by the trajectory of the train's time-speed curve. The basic operation of the train movement is generally characterised under 4 operating modes including accelerating mode, cruising or constant-speed mode, coasting mode, and braking mode, as shown in Fig. 2. [14]

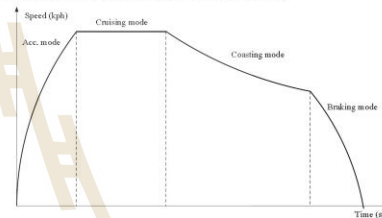


Fig. 2 Train's speed profile

In this article, the modelling of the train motion is based on a motion of the train running along a speed profile using a proportional control principle. The proportional control is shown in Fig. 3. The train modelling is divided into three modes: running mode, braking mode and stop mode.

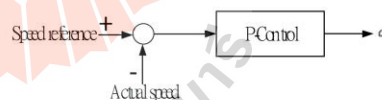


Fig. 3 proportional control

E. An updated train speed and position

An updated sampling of the train speed and position can be calculated in (5) and (6), respectively, where v_{i+1} and v_i are the speed after and before updated, Δt is the time step, s_{i+1} and s_i are the position after and before updated and a is a train acceleration.

$$v_{i+1} = v_i + a\Delta t \quad (5)$$

$$s_{i+1} = s_i + v_i\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 \quad (6)$$

III. SINGLE-TRAIN SIMULATION

A. Rail potential

The rail potential is the voltage difference between the running rail and remote earth (or a zero-potential reference). The current output from the train flows through the running rail as the resistor effecting to

voltage drop during the train running. The maximum rail-to-earth voltage normally occurs at the train's location [4] and it is higher than remote earth. This voltage depends on the magnitude of the traction current, the resistance of the tracks and the resistance of the insulation between the running rails and earth. In addition, the rail potential might be affected by the short circuit current at the DC supply line to the tracks [13].

B. Single-train model

- Traction substation model

The traction substation receives electricity from the AC power network and it's rectified to be a DC system to supply the DC railway system. In this paper, the traction substation is considered as the Norton equivalent circuit, a current source (I_s) in parallel with the substation resistance (R_s), connected to the suitable diode and the earthing resistance (R_{se}), as shown in Fig. 4 as a traction substation (TSS) block, where C refers to the conductor rail/third rail, R refers to the running rails. In the simulation, the earthing resistance is given to be infinite since the traction substation is not directly grounded or floated through the protective devices [14].

- Transmission line model

The transmission line in this context is considered to be a distance-based distribution model, separated by distance d , as shown in Fig. 4 as the transmission line block between bus p and q. The conductor rail is represented by third rail's resistor (R'_C). In the same manner, the running rail is represented by running rail's resistor (R'_R) and the rail-to-structure resistance along the tracks is represented by the rail-to-structure conductance per unit length (G'_{RS}). The metal structure under the rails along the tracks is represented by structure's resistor (R'_S) and the structure-to-earth resistance along the tracks is represented by the structure-to-earth conductance per unit length (G'_{SE}). Therefore, the rail potential is the voltage distributed across the rails, and this article also introduces the voltage in the structure.

- Train model

The CIM has been used in the power flow calculation. The train should be modelled as the current source (I_T) between the conductor rail (third rail) and running rail.

C. Power flow calculation

To obtain the traction substation voltages, train voltage, consumed power for each substation, rail potential, and power losses in the system, it is important to perceive all power flow solutions in the network. In this paper, the current injections method is applied in the power flow calculation with the multi-conductor system due to having three conductors per bus. Power network is based on nodal analysis including rectifier substations and single-train using the proposed model, illustrated on Fig. 4. The solution can be obtained by solving the nodal equations in (7) and giving all bus voltages are initially zero. The conductance matrices $[G]$ are formed by the conductance submatrices for each bus as shown in (8)-(10), where $[G_s]$ denotes the substation conductance submatrix considered only the substation buses, $[G_{pq}]$ denotes the transmission conductance submatrix between bus p and q including the conductor rail conductance and the running rail conductance, and $[G_{pp}]$, $[G_{qq}]$ denote the rail-to-earth conductance matrix. Therefore, the nodal equation for the whole N_{bus} system is obtained in (11) [14].

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

$$[G_s] = \begin{bmatrix} G_s^{(C,C)} & G_s^{(C,R)} & G_s^{(C,S)} \\ G_s^{(R,C)} & G_s^{(R,R)} & G_s^{(R,S)} \\ G_s^{(S,C)} & G_s^{(S,R)} & G_s^{(S,S)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} & -\frac{1}{R_s} & 0 \\ -\frac{1}{R_s} & \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_{se}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_{se}} & \frac{1}{R_{se}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[G_{pq}] = \begin{bmatrix} G_{pq}^{(C,C)} & G_{pq}^{(C,R)} & G_{pq}^{(C,S)} \\ G_{pq}^{(R,C)} & G_{pq}^{(R,R)} & G_{pq}^{(R,S)} \\ G_{pq}^{(S,C)} & G_{pq}^{(S,R)} & G_{pq}^{(S,S)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dR'_C} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{dR'_R} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{dR'_S} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[G_{pp}]_{SE} = [G_{qq}]_{SE} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & dG'_{RS} & -dG'_{RS} \\ 0 & -dG'_{RS} & dG'_{RS} + dG'_{SE} \end{bmatrix} \quad (10)$$

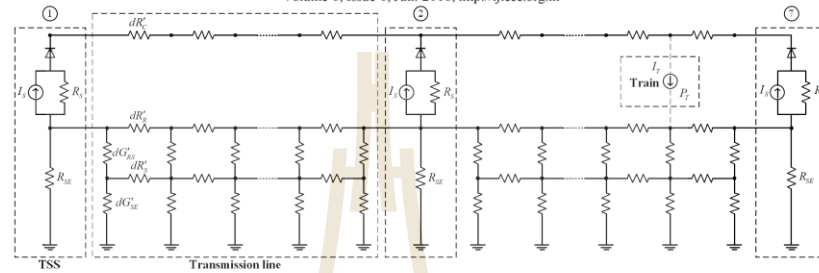


Fig. 4 The proposed DC railway single-train system model with ten traction substations



where $G_{pq}^{(C,C)}$ is the third rail's conductance between bus p and q, $G_{pq}^{(C,R)}$ and $G_{pq}^{(R,C)}$ are the conductance between the third rail and running rail and in between bus p and q, $G_{pq}^{(C,S)}$ and $G_{pq}^{(S,C)}$ are the conductance between the third rail and structure and in between bus p and q, $G_{pq}^{(R,R)}$ is the running rail's conductance between p and q, $G_{pq}^{(R,S)}$ and $G_{pq}^{(S,R)}$ are the conductance between the running rail and structure and in between bus p and q, and $G_{pq}^{(S,S)}$ is the structure's conductance between p and q. The current matrix [I] in (7) would be formed by taking into account the substation current (I_s) and the train current (I_T) in (12), where P_T and V_T are the required power and voltage of the train, according to the bus being considered. Ultimately, the bus voltages matrix [V] can be obtained by solving in (7). This process has been conducted iteratively until the maximum approximate error of each bus voltage mismatch is less than the pre-defined value or the iteration time reaches the final time [11, 14].

$$I_T = \frac{P_T}{V_T} \quad (12)$$

D. Simulation scheme

According to the flowchart in Fig. 5, the simulation is initialised with setting up the relevant parameters and the variables needed in the process. Then, it goes to the main loop starting with the train movement calculation to determine the motion characteristic of the train such as the speed, position, and the consumed power. If the train arrives at the last station, it terminates the calculation. Next, the network capture is performed to configure the power network: bus number arrangement, bus data, and line data. After that, the power flow calculation is carried out to find the bus voltages, power and energy consumption at each substation, and power losses. Increment the time step and return to the main loop, iterates the calculation until the iteration time reaches the pre-defined final time [14].

IV. UNITS SIMULATION AND RESULTS

The Bangkok Transit System (BTS), Sky Train Silom Line, is the DC railway line providing the service in Bangkok, Thailand and is the case study for the single-train movement simulation. It consists of 12 passenger stations and 7 rectifier substations. The passenger station's and traction substation's position,

train and system data of the Silom line are applied in this study. The nominal voltage of the train operation is 750 VDC supplied from the traction substations via the third rail. The line route and stations are illustrated in Fig. 6.

The single-train movement simulation program has been implemented in MATLAB/M-file using the proposed model, train movement calculation, and power flow calculation described above. The program simulates the BTS sky train operation, Silom line, running between stations STY and S1 with 20 seconds dwell time for stopping at every station.

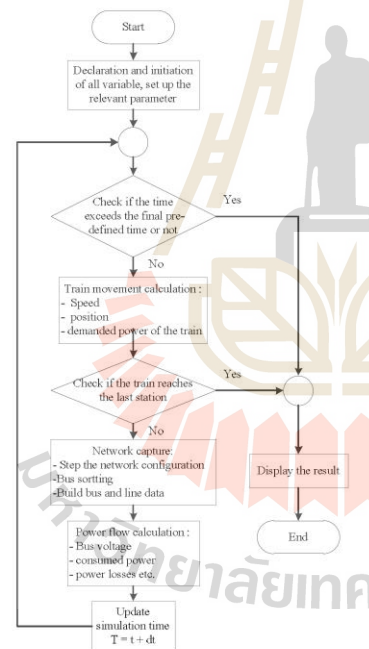


Fig. 5 The flowchart of the programmed sequence [14]

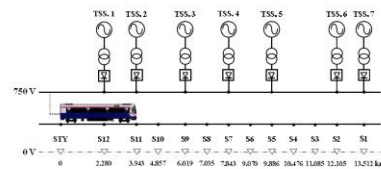


Fig. 6 BTS Sky Train Silom Line

The train speed is controlled by a proportional control shown in Fig. 3. The results are expected to obtain the rail potential, the structure voltage, power and voltages at each TSS, the train's consumed power,

energy demand at substations and the voltage profile of the train, see Fig.7-12.

Fig. 7 shows the train speed along the distance as a blue line with the red line depicted as the arbitrarily specified speed command. The train draws power during its acceleration and operating modes for tractive purpose and consumes only the auxiliary power during its stopping at the station as shown in Fig. 8. Figure 9-10 shows the power and voltage at traction substations 1-7 and the train with the running time. When the train runs near the traction substation, the traction substations provide power to the train and even the train position overlaps the half distance between substations. In the same way, the voltage at the TSS close to the train may tend to drop below the nominal voltage.

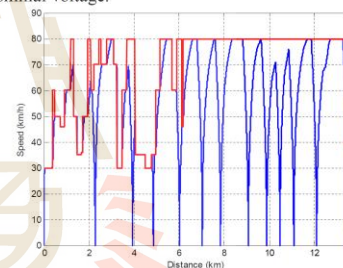


Fig. 7 The train's speed profile

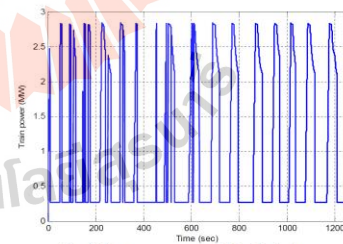


Fig. 8 The power consumed by the train

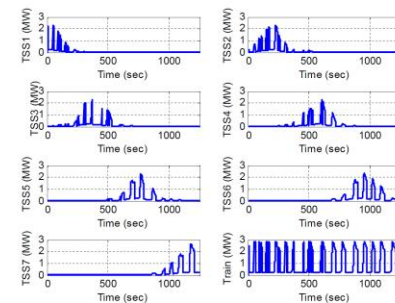


Fig. 9 The power at TSS 1-7 and the train's position

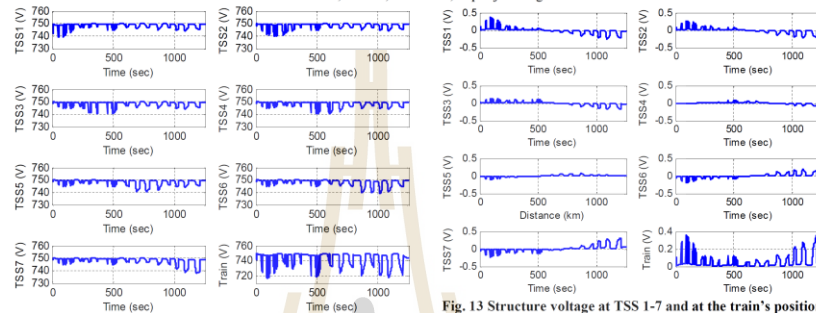


Fig. 10 The voltage at TSS 1-7 and at the train's position

The rail voltage refers to the earth of the substations and the train running position can be shown in Fig. 11-12. It is found that the maximum of rail voltage is 10.36 V at TSS7 and 42.36 V at the train position. This is because the train draws the large current at that time due to the acceleration mode and the long spacing of the propulsion stations. According to the European standards, the maximum trajectory that occurs is less than the maximum permissible voltage in less than 300 seconds and the voltage does not exceed 120 VDC [5]. Therefore, for this case, it is assumed that this system is conformable the standard.

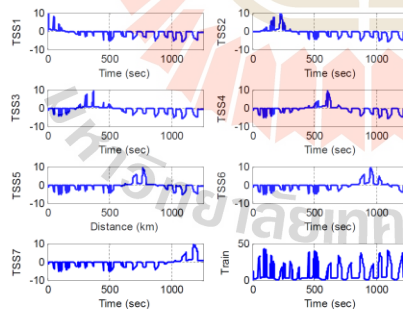


Fig. 11 Rail potential at TSS 1-7 and the train's position

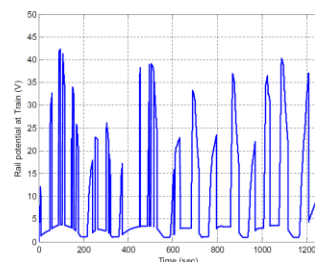


Fig. 12 Rail potential at the train's position

Fig. 13 Structure voltage at TSS 1-7 and at the train's position

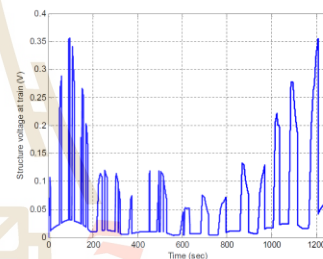


Fig. 14 Structure voltage at the train's position

The structure voltage at the traction substations 1-7 and at the train's position shown in Fig. 13-14. It shows that the maximum voltage is 0.37 V at TSS1 and 0.36 V at the train position.

CONCLUSION

The proposed single-train movement model was developed and successfully implemented in the simulation. According to the results, it could evaluate the rail potential, structure voltage, energy demand at substation and the voltage profile of the train during the train movement. Moreover, it is capable of the simulation of studying the performance of the railway systems with thorough consideration of rail potential based on the permissible European standard and the structure voltage. For the further study, this paper could apply to study the stray current in the structure of the DC railway systems.

REFERENCES

- [1] Friedrich K, Rainer P, Axel S and Egid S, "Direct-current traction system, In: Current return circuit and earthing Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance", 2nd edn, Publicis Publishing, pp 803-23, 2009.
- [2] H.L. Chien, "Evaluation of the Maximum Potential Rise in Taipei Rail Transit Systems", IEEE Transactions on power delivery, 20(2), pp.1379-1384, April 2005.
- [3] H.L. Chien and J.L. Chien, "Assessment of Grounding Schemes on Rail Potential and Stray Currents in a DC Transit System",

International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering, ISSN(p): 2347-6982, ISSN(e): 2349-204X
Volume-6, Issue-6, Jun.-2018, <http://ijiee.org.in>

- IEEE Transactions on power delivery, 21(4), pp. 1941-1947, October 2006.
- [4] Y.C. Liu and J.F. Chen, "Control scheme for reducing rail potential and stray current in MRT systems", In IEE Proc.-Electr. Power Appl. 152(3), pp. 612-618, May 2005.
- [5] EN 50122-1, "Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 1: Protective provisions against electric shock", 2011.
- [6] M. Niasati and A. Gholami, "Evaluation of Rail Potential Control Devices Performance for Control of Rail Potential of DC Electrified Railway Systems", Railway Engineering-Challenges for Railway Transportation in Information Age, pp. 1-7, May 2005.
- [7] EN 50122-2 "Railway applications-Fixed installations-Electrical safety, earthing and return circuit Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by DC traction systems", 2010.
- [8] J.G. Yu and C.J. Goodman, "Modelling of Rail Potential Rise and Leakage Current in DC Rail Transit Systems", Stray Current Effects of DC Railways and Tramways, IEE Colloquium, 2/2/1 - 2/2/6, May 2005.
- [9] S.L. Chen, S.C. Hsu, C.T. Tseng, K.H. Yan, H.Y. Chou, and T.M. Too, "Analysis of Rail Potential and Stray current for Taipei Metro", IEEE Transactions on vehicular technology. 55(1), pp. 67-75, January 2006.
- [10] Y.S. Tzeng and C.H. Lee, "Analysis of Rail Potential and Stray currents in a Direct-Current Transit System", IEEE Transactions on power delivery. 25(3), pp. 1516-1525, July 2010.
- [11] T. Kulworawanichpong, "Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method", Journal of Modern Transportation, pp 1-11. doi:10.1007/s40534-015-0086-y, September 2015.
- [12] B. P. Rochard and F. Schmid, "A review of methods to measure and calculate train resistances", In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 214, No. 4, p. 185-199, 2000.
- [13] R.W.B. Stell, "Maximum permissible rail potential, DC Traction Power Systems", Vehicular Technology Magazine, IEEE, 6(3), pp. 99-105, September 2011.
- [14] K. Mongkoldee, U. Leeton and T. Kulworawanichpong "Single train movement modeling and simulation with rail potential consideration" Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, December 13-15, 2016.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายรัช ชูจิต เกิดเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน พ.ศ. 2527 เกิดที่อำเภอรับฉะ จังหวัดตรัง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2553 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเมื่อ พ.ศ. 2557 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาเอกได้เป็นผู้ช่วยสอนในวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับทุนผู้ช่วยนักวิจัยโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาเอก

