

การลดค่าศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วด้วยระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ
ในรถไฟฟ้ากระแสดตรง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

REDUCTION OF RAIL POTENTIAL AND STRAY CURRENT WITH
NEG-TPS IN A DC ELECTRIFIED RAILWAY



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การลดค่าศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วด้วยระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ
ในรถไฟฟ้ากระแสตรง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์)

ประธานกรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตนนิยมชัย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลรวานิชพงษ์)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.กীরติ ชยะกุลศิริ)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปณิดา หาญรบ : การลดค่าศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วด้วยระบบตัวแปลงความต้านทาน
เชิงลบในรถไฟฟ้ากระแสตรง (REDUCTION OF RAIL POTENTIAL AND STRAY
CURRENT WITH NEG-TPS IN A DC ELECTRIFIED RAILWAY)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตนนิมิตชัย, 167 หน้า

คำสำคัญ: ตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ/ ศักย์ไฟฟ้าที่ราง/ ตัวนำไฟฟ้าหลายระดับ/ รถไฟฟ้าขบวน
เดียว/ กระแสไฟฟ้ารั่ว

ในระบบไฟฟ้ากระแสตรง เช่น รถไฟฟ้า รถราง และระบบรถไฟใต้ดิน กระแสหลุดจาก
ขั้วเคลื่อนไหลผ่านสายสัมผัส โดยพื้นฐานแล้วกระแสไฟฟ้าที่ขั้วเคลื่อนของยานพาหนะจะไหลกลับไป
ยังสถานีไฟฟ้าผ่านรางรถไฟที่เป็นตัวนำสำหรับกระแสไฟย้อนกลับ ส่วนหนึ่งของกระแสย้อนกลับจะ
ไหลไปยังโครงสร้างเสริมแรงและไหลลงสู่พื้นดินและไหลกลับไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยผ่านดิน ซึ่งมีโอกาส
สูงที่จะเกิดปัญหาด้านศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว ซึ่งเป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ส่งผลให้เกิด
ความเสียหายต่อโครงสร้างใต้ดินและความปลอดภัยของบุคคลที่สาม ในด้านการลดอายุการใช้งาน
ของรางวิ่งและอุปกรณ์ระบบการต่อลงดิน

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการติดตั้งที่เป็นไปได้เพื่อใช้ในการลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้า
รั่ว ด้วยวิธีการติดตั้งตัวนำย้อนกลับขนานกับรางวิ่ง โดยเลือกใช้สายเคเบิลที่มีความต้านทานน้อยกว่า
ความต้านทานของรางวิ่งที่ตามหลักแล้วกระแสไฟฟ้าย้อนกลับจะเลือกเส้นทางที่มีความต้านทานมีค่า
น้อยที่สุด และวิธีการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบที่ช่วยลดความต้านทานในวงจรเป็นศูนย์ เพื่อ
ลดเส้นทางย้อนกลับของกระแสไฟฟ้าที่รางบนรางวิ่ง โดยระบบนี้สร้างขึ้นโดยการติดตั้งอุปกรณ์
อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติมในระบบขั้วเคลื่อนรถไฟฟ้าทั่วไป โดยไม่ต้องดัดแปลงรถไฟ รางรถไฟ หรือ
โครงสร้างอุโมงค์ การใช้โปรแกรม MATLAB ผ่านโมเดลรถไฟฟ้าสายสัมผัส (เหนือ) ในกรณีความเร็ว
คงที่และการเดินรถขบวนเดียวแบบไป-กลับ ตามลักษณะกายภาพทั่วไปของระบบรถไฟฟ้าขนส่ง
มวลชนสายฉลองรัชธรรม

ผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับและระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทาน
เชิงลบสามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วได้จริง ตามกรณีศึกษาในรูปแบบต่าง ๆ ใน
งานวิจัยนี้ เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วอยู่ในช่วง 0.11-43.73% เมื่อ
เทียบกับระบบขั้วเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษาปณิดา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาดร.ทศพล รัตนนิมิตชัย

PANIDA HANROB : REDUCTION OF RAIL POTENTIAL AND STRAY CURRENT WITH
NEG-TPS IN A DC ELECTRIFIED RAILWAY

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. DR.TOSAPHOL RATNIYOMCHAI, 167 PP.

Keyword: Negative resistance converter/ Rail potential/ Multi-conductor/ Single train/
Stray current

In DC power systems, such as rail vehicles and subway systems, traction current flows through contact lines. Basically, the traction current of vehicles flows back to the power station through the rail track for reverse current, and some of the return current flows into the reinforced structure, flows to the ground. There is a high probability of rail potential and stray current, which inevitably leads to the damage of underground structures and the evacuation of third parties, shortening the service life of rail guidance and grounding system equipment.

In this thesis, a feasible installation method for reducing the rail potential and stray current is studied. The return conductor is installed in parallel with the rail track, and the cable with a resistance less than the rail resistance is selected. According to this method, the path with the least resistance is selected for the return current, and the negative resistance converter traction power system with a zero-circuit resistance loop is adopted to reduce the return path of the rail current. The system is built by installing additional electronic equipment in the traditional traction power system. Without modifying the structure of a railway, track, or tunnel, it is realized by using a MATLAB program and an MRT purple line (North) power line model under constant speed and driving conditions.

The results show that the rail potential and stray current can actually be reduced by installing a return conduction system and a negative resistance converter traction power system. Taking different models as examples, compared with the traditional traction power system without auxiliary equipment, the percentage reduction of rail potential and stray current is in the range of 0.11 - 43.73%.

School of Electrical Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature Panida
Advisor's Signature Tosaphol Ratniyomchai

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งทางด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัยที่ให้คำปรึกษาและแนะนำ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตนนิมิตต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และแนะแนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมไปถึงช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ศาสตราจารย์ ดร.ณัฏชัย กุลวรรณิพงษ์ กับรองศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และเป็นผู้ตรวจทานวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณคุณอาจารย์ บุคลากรประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา การดำเนินงานโดยอย่างสมบูรณ์ และให้กำลังใจอย่างดีมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มเพื่อน ๆ และรุ่นพี่ของผู้ทำวิจัยที่ให้กำลังใจ อีกทั้งยังช่วยเหลือให้คำปรึกษาทั้งในด้านวิชาการ และด้านการใช้ชีวิตของผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดี ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ปณิดา หาญรบ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ

บทที่

1 บทนำ

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

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ.....	6
2.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง	6
2.3 ข้อกำหนด ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่ว	7
2.4 การติดตั้งเพื่อลดศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว.....	14
2.5 วงจรรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง.....	21
2.6 สรุป.....	24

3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ.....	25
3.2 กระแสรั่วกีดกร่อน.....	25
3.2.1 การเกิดกระแสรั่ว.....	26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 ผลกระทบกระแสรั่ว	27
3.3 การประเมินกระแสรั่ว	30
3.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง	31
3.5 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง	36
3.6 แบบจำลองการติดตั้งระบบเพื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว.....	39
3.6.1 ผลการจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติ.....	39
3.6.2 ผลการจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ	44
3.6.3 ผลการจำลองการติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ	48
3.7 ศักยภาพการลดลงในระบบ.....	55
3.8 สรุป	56
4 ผลการจำลองและอภิปรายผล	
4.1 บทนำ.....	58
4.2 กรณีศึกษาที่ 1 (ความเร็วคงที่).....	58
4.3 กรณีศึกษาที่ 2 (รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วงเหนือ).....	62
4.3.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติ.....	62
4.3.2 แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ.....	77
4.3.3 แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ.....	89
4.3.4 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าย่อย	96
4.4 ผลการประเมินการลดลงของระบบการติดตั้งเพิ่มจุดเชื่อมต่อกับรางวิ่ง	104
4.5 สรุป	105
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	106
5.2 ข้อเสนอแนะ	106
รายการอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก ก ระบบ Negative Resistance Converter Traction Power System	111
ภาคผนวก ข ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2 (รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วงเหนือ)	
ระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ	114

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2 (รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วงเหนือ)	
ระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ.....	134
ภาคผนวก ง บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	152
ประวัติผู้เขียน	167



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับอนุญาต ระบุไว้ในมาตรฐาน BS EN 50163 และ IEC 60850	7
2.2	วิธีการที่มีการใช้งานของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว	14
3.1	แรงดันที่ยอมให้ผ่านได้ U_t ตามมาตรฐาน EN 50122-1	30
3.2	อุปกรณ์เสริมติดตั้งของระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ	49
4.1	พารามิเตอร์ของกรณีศึกษาที่ 1	59
4.2	ร้อยละการลดลงของค่าสูงสุดศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว	61
4.3	ข้อมูลพารามิเตอร์ของรถไฟไฟฟ้าสายสีม่วง	63
4.4	ตำแหน่งสถานีระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	64
4.5	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และศักย์ไฟฟ้าที่รางของแบบจำลอง กรณีศึกษา รถไฟฟ้า MRT สายสีม่วง ผ่านแบบจำลองระบบปกติผ่านการต่อลงดินสองชั้น ..	73
4.6	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร ระบบปกติ	75
4.7	เปรียบเทียบผลการประเมินกระแสรั่วระหว่างการจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟขบวน เดียวกับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางที่ได้จากแบบจำลองการต่อลงดินตามมาตรฐาน EN 50122-2	77
4.8	พารามิเตอร์ของสายเคเบิล	78
4.9	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ	80
4.10	ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อ	81
4.11	ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ	82
4.12	ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ	84
4.13	ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ	85
4.14	ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ ($R_{RT} = 0.0175 \Omega/\text{km}$)	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ ($R_{RT} = 0.047 \Omega/\text{km}$).....	88
4.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ	90
4.17 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อ.....	92
4.18 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ.....	93
4.19 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ.....	94
4.20 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ.....	95
4.21 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ.....	99
4.22 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ	99
4.23 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ.....	103
4.24 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ	103
4.25 ศักยภาพการลดลงของระบบการติดตั้ง.....	104
ข.1 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 3 จุดเชื่อมต่อ	115
ข.2 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 4 จุดเชื่อมต่อ	117
ข.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัว 4 จุดเชื่อมต่อ.....	118
ข.4 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 5 จุดเชื่อมต่อ	120
ข.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ	121
ข.6 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 8 จุดเชื่อมต่อ	123
ข.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ	124
ข.8 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 21 จุดเชื่อมต่อ	126

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.9 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ..	127
ข.10 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง กรณีใช้ $R_{RT} = 0.0175 \Omega/\text{km}$	128
ข.11 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง กรณีใช้ $= 0.047 \Omega/\text{km}$	129
ข.12 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ	130
ข.13 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ	131
ข.14 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ	132
ข.15 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย ของสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ	133
ค.1 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 3 จุดเชื่อมต่อ	135
ค.2 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 4 จุดเชื่อมต่อ	137
ค.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้ง 4 จุดเชื่อมต่อ	138
ค.4 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 5 จุดเชื่อมต่อ	140
ค.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ.....	141
ค.6 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 8 จุดเชื่อมต่อ	143
ค.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ.....	144
ค.8 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 21 จุดเชื่อมต่อ	146
ค.9 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ.....	147
ค.10 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ	148
ค.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย ของสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ	149
ค.12 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ	150
ค.13 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ	151

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสไฟฟ้ารั่วในระบบขนส่งรถไฟฟ้า.....2
2.1	รถไฟฟ้าขบวนเดียวของระบบรางกระแสตรงพร้อมระบบต่ายรวบรวมกระแสรั่ว.....8
2.2	วิธีการไม่ต่อลงดิน
2.3	วิธีการต่อลงดินโดยตรง
2.4	วิธีการต่อลงดินผ่านไดโอด
2.5	ระบบการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าราง
2.6	ตารางระบบควบคุมการกักกร่อนสำหรับกระแสไฟฟ้ารั่ว..... 13
2.7	วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง..... 15
2.8	วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ
2.9	รูปแบบการติดตั้งตัวนำย้อนกลับในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ
2.10	วงจรทั่วไประบบ NRC-TPS ระหว่างสองสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าในขบวนเดียว
2.11	วงจรทั่วไประบบ NRC-TPS ระหว่างสองสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าในหลายขบวน..... 19
2.12	รูปแบบการทดลองระบบ TRA-TPS และ NRC-TPS ในห้องปฏิบัติการ
2.13	การต่อลงดินโดยใช้ไดโอด
2.14	Floating negative return current system
2.15	ระบบ SCCN ที่ใช้ drainage diode..... 23
2.16	ระบบจ่ายไฟผ่านรางที่สี่ของ LUL..... 24
3.1	เส้นทางการกักกร่อนสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง..... 25
3.2	กระบวนการกักกร่อนของกระแสไฟฟ้ารั่ว
3.3	การกักกร่อนที่เกิดขึ้นกับท่อโลหะที่อยู่ใต้ดิน
3.4	การกักกร่อนที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟ
3.5	การเกิดสนิมในบริเวณเอวรางและฐานราง
3.6	แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ U_t ตามมาตรฐาน EN 50122-1 และมาตรฐาน HD637S1 .. 29
3.7	การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าบนรางลาดเอียง
3.8	กราฟลักษณะสมบัติแรงดูดและแรงเบรกของรถไฟฟ้าสายสีม่วง (เหนือ)
3.9	โหมดการทำงานของรถไฟฟ้ากระแสตรง..... 35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10	รูปแบบสถานีจ่ายไฟฟ้า..... 37
3.11	สายส่งสถานีจ่ายไฟฟ้า 37
3.12	โหลดหรือรถไฟฟ้า 37
3.13	การสร้าง $[G]_{bus}$ 38
3.14	การสร้าง $[I]_{bus}$ 39
3.15	แบบจำลองพื้นฐานของการเคลื่อนที่รถไฟในระบบปกติ 40
3.16	แบบจำลองกรณีที่มีสายส่งและรางของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น..... 40
3.17	การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบสามระดับ 42
3.18	ระบบ TPS-TPS..... 44
3.19	แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ 44
3.20	แบบจำลอง เมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อของตัวนำย้อนกลับ 45
3.21	การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 46
3.22	ระบบ RET-TPS..... 47
3.23	ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่รางของระบบตัวนำย้อนกลับ..... 48
3.24	ระบบ NEG-TPS..... 49
3.25	แบบจำลองเมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อของตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 50
3.26	การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบติดตั้งตัวแปลงเชิงลบ..... 51
3.27	แบบจำลองระบบ NEG-TPS..... 52
3.28	รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 1 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 52
3.29	รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 2 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 53
3.30	รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 3 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 54
3.31	รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 4 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 55
4.1	แบบจำลองทั่วไปของกรณีศึกษาที่ 1..... 59
4.2	ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของกรณีศึกษาที่ 1..... 60
4.3	เส้นทางการเดินรถไฟผ่านนคร สายสีม่วง (เหนือ)..... 62
4.4	แบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟขบวนเดียว MRT สายสีม่วง 65
4.5	แผนผังการจำลองผล 66
4.6	ความเร็วจำกัดของ MRT สายสีม่วง 67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	กระเดียนต์ของรถไฟฟ้า MRT สายสีม่วง (เหนือ) 67
4.8	กำลังไฟฟ้ารถไฟเทียบกับเวลา 68
4.9	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-10 69
4.10	แรงดันไฟฟ้าที่สถานีขับเคลื่อน 1-10..... 70
4.11	ศักย์ไฟฟ้าที่รางที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-10..... 71
4.12	แรงดันไฟฟ้าตามตำแหน่งของรถไฟ 72
4.13	แรงดันรางตามตำแหน่งของรถไฟ 74
4.14	เคเบิล XLPE Single core แรงดัน 0.6/1kV 77
4.15	แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ..... 79
4.16	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ..... 79
4.17	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อ..... 81
4.18	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ..... 82
4.19	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ..... 83
4.20	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ 84
4.21	ศักย์ไฟฟ้าที่ราง ใช้สายเคเบิลค่าความต้านทานเท่ากับรางวิ่ง..... 86
4.22	ศักย์ไฟฟ้าที่ราง ใช้สายเคเบิลค่าความต้านทานมากกว่ารางวิ่ง 86
4.23	แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ 90
4.24	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ..... 90
4.25	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อ..... 92
4.26	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ..... 93
4.27	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ..... 94
4.28	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ 95
4.29	แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ..... 97
4.30	แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุด เชื่อมต่อ 98
4.31	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ 98

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ..... 99
4.33	แบบจำลองการติดตั้งตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ 101
4.34	แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุด เชื่อมต่อ 101
4.35	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ 102
4.36	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ..... 102
ก.1	อุปกรณ์ของระบบ NEG-TPS 112
ก.2	โหมดการทำงานของ NRC 113
ก.3	โหมดการทำงานของ SU 113
ข.1	แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อ..... 116
ข.2	แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ..... 119
ข.3	แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ..... 122
ข.4	แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ 125
ค.1	แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อ 136
ค.2	แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ 139
ค.3	แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ 142
ค.4	แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ 145

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

TRA-TPS	=	Traditional traction power system
RET-TPS	=	Return conductor traction power system
NEG-TPS	=	Negative resistance converter traction power system
TPS	=	Traction power system
SCCN	=	Stray current collector mats solution
SCDD	=	Stray current drainage diode
OVPDs	=	Over-voltage protection devices
AT	=	Auto-transformer
RR	=	Rail-return system
BT	=	Booster transformer
NRC	=	Negative resistance converter
FCA	=	Feeder cable
SU	=	Switch unit
CBC	=	Cross-bonding-cables
CBN	=	cross-bonding-nodes
RIS	=	Rail insulation system
DES	=	Diode earthing system
FNRCs	=	Floating negative return current system
SCCNS	=	Stray current collecting net system
FRS	=	Fourth rail system
Fe	=	Iron
O ₂	=	Oxygen
H ₂ O	=	Hydrogen Oxide

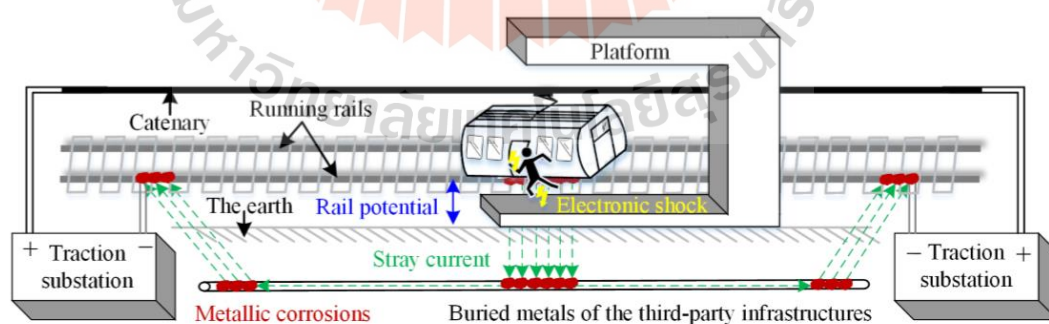
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีประวัติยาวนานกว่า 200 ปี นับตั้งแต่รถไฟใต้ดินสายแรกถูกสร้างขึ้นในกรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ.1863 ทำให้ระบบขนส่งทางรางในเขตเมืองได้พัฒนาอย่างรวดเร็วทั่วโลก เนื่องจากมีข้อดีในการขนส่งผู้โดยสารที่รวดเร็ว ลดมลพิษทางอากาศ และสามารถนำพลังงานจากแหล่งพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จากสถิติในปี ค.ศ.2018 ใน 72 ประเทศ 493 เมืองและภูมิภาคได้เปิดระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทางรางในเขตเมือง รวมระยะทางกว่า 26,100 กิโลเมตร เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับระยะทางรวมของการขนส่งทางรถไฟในเขตเมืองของปี ค.ศ. 2014 พบว่ามีระยะทางรวมมากกว่าสองเท่า และจะยังคงเพิ่มขึ้นต่อไปในอนาคต โดยระบบไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถไฟมี 2 ระบบ ได้แก่ ระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ส่วนระบบการจ่ายไฟในการขับเคลื่อนไฟฟ้านั้นมีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบรางที่ 3 (Third rail system) และระบบตัวนำสัมผัสผาดอากาศเหนือหัว (Overhead wire system) ในระบบนี้จะมีสายไฟฟ้าอยู่เหนือศีรษะมักใช้สำหรับการเดินทางด้วยรถไฟระยะไกล สำหรับระบบรางที่สาม มีข้อดีในแง่เรื่องไม่บดบังทัศนียภาพทางสายตา เนื่องจากไม่มีโครงสร้างการจ่ายไฟที่ไม่เป็นระเบียบเหนือรางรถไฟ แต่มีข้อจำกัดในด้านการใช้งานและด้านความปลอดภัย ซึ่งระบบนี้มักใช้กับรถไฟใต้ดินหรือระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน รวมไปถึงกรุงเทพมหานครที่เป็นเมืองเดียวในประเทศไทยที่มีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนี้ด้วย ซึ่งในปัจจุบันจำแนกประเภทรถไฟฟ้าวออกเป็น 3 ประเภท โดยจำแนกจากระบบการจ่ายไฟในการขับเคลื่อนไฟฟ้า คือ 1. ระบบรางที่ 3 ได้แก่ รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน (MRT Blue line) รถไฟฟ้าสายสีม่วง (MRT Purple line) และรถไฟฟ้าสายสีเขียว (BTS Green line) 2. ระบบตัวนำสัมผัสผาดอากาศเหนือหัว ได้แก่ รถไฟฟ้าสายสีแดง (S.R.T. Red line mass transit system project) และรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ (Airport Rail Link) 3. ระบบรางเดี่ยว (Monorail system) ได้แก่ รถไฟฟ้าสายสีเหลือง (MRT Yellow line) และรถไฟฟ้าสายสีชมพู (MRT Pink line)

ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสฉุดลากขับเคลื่อนไหลผ่านสายสัมผัส (contact line) ไปยังรถไฟและผ่านวงจรย้อนกลับไปยังสถานีจ่ายกำลังขับเคลื่อน โดยพื้นฐานแล้วรางวิ่งทำหน้าที่เป็นตัวนำสำหรับกระแสไฟย้อนกลับ เนื่องจากความต้านทานระหว่างรางกับพื้นดินมีจำกัด และรางมีความต้านทานตามความยาว ส่วนหนึ่งของกระแสนอนกลับจะไหลลงสู่ดิน เรียกว่ากระแสไฟฟ้ารั่ว (Stay current) และกลับสู่สถานีจ่ายกำลังขับเคลื่อนผ่านดินใกล้กับสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนไปยังโครงสร้างเสริมแรง โครงสร้างของเสาทางยกระดับหรืออุโมงค์ในบริเวณใกล้ ๆ กับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและไหลลงสู่พื้นดิน ซึ่งมีโอกาสสูงที่จะเกิดปัญหาด้านศักย์ไฟฟ้าที่รางวิ่งและกระแสไฟฟ้ารั่ว ปัญหาเหล่านี้เป็นอันตรายต่อโครงสร้างอาคารที่สถานีและสถานีย่อยใกล้เคียงที่สร้างด้วยโลหะ ปัญหากระแสไฟฟ้ารั่วที่ไหลลงดินเป็นปัจจัยสำคัญในการกัดกร่อนของโลหะของรางวิ่ง ซึ่งส่งผลต่อการลดอายุการใช้งานของรางวิ่งและอุปกรณ์ของระบบการต่อลงดิน ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางที่เกิดจากกระแสฉุดลากไหลผ่านรางวิ่ง เป็นอันตรายต่อความปลอดภัยของมนุษย์ (Xiaofeng Yang et al., 2018) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 จากผลกระทบที่กล่าวมาข้างต้น จึงเกิดการวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับการวัดและการควบคุมของค่ากระแสไฟฟ้ารั่วและค่าศักย์ไฟฟ้าของราง โดยอยู่ภายใต้ค่ามาตรฐานแรงดันสัมผัสในระหว่างการทำงานปกติและในสถานการณ์ที่เกิดความผิดปกติจะต้องไม่เกินแรงดันไฟฟ้าที่ยอมให้ผ่านได้ตามมาตรฐาน EN 50122-1 ที่กล่าวไว้ว่า แรงดันที่ยอมให้เข้าถึงต้องมีค่าไม่เกิน 120 V และจากมาตรฐานกระแสไฟฟ้ารั่ว EN 50122-2 ค่ากระแสไฟฟ้ารั่วที่แนะนำว่าจะไม่เกิดความเสียหายในทางรถไฟในช่วง 25 ปี ต่อหน่วยความยาวมีค่าไม่เกิน 25 mA/m/track (Fichera et al., 2013)



รูปที่ 1.1 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสไฟฟ้ารั่วในระบบขนส่งรถไฟฟ้า

ที่มา : (Gu et al., 2020)

วิธีในการลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางวิ่งและกระแสไฟฟ้ารั่วที่พบเห็นได้ในปัจจุบัน จะเป็นวิธีการวางตัวนำย้อนกลับ (Return conductor traction power system: RET-TPS) นำตัวนำวางแบบขนานกับรางวิ่ง รางวิ่งเสริมพิเศษ เพื่อแบ่งกระแสไฟฟ้ารางและลดความต้านทานตามแนวยาวของรางวิ่ง อย่างไรก็ตามการติดตั้งรางเสริมและการปรับเปลี่ยนส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องในระบบรถไฟฟ้ามักจะทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง และฉนวนของรางเสริมก็อาจจะเสื่อมสภาพตามระยะเวลาการใช้งาน และข้อจำกัดในเรื่องปริมาณและราคาของสายเคเบิล หากจำนวนสายเคเบิลไม่เพียงพอ ผลการลดลงก็จะไม่ชัดเจน และมีวิธีการใหม่ตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ (Negative resistance converter traction power system: NEG-TPS) โดยการทำให้มีลูปความต้านทานเป็นศูนย์ในวงจรเพื่อลดเส้นทางกลับของกระแสไฟฟ้ารางบนรางวิ่ง นอกจากนี้ยังเป็นระบบที่สามารถใช้งานกับการขนส่งทางรางที่มีอยู่เดิมโดยไม่ต้องดัดแปลงรถไฟ ราง อุโมงค์ หรืออื่น ๆ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการขนส่งทางรางในอนาคตได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาและจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามที่มีแหล่งจ่ายสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเพื่อประเมินผลกระทบและวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วไหลในรถไฟฟ้ามขนส่งมวลชนกระแสตรง

1.2.2 เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบกับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วงเหนือ)

1.2.3 เพื่อประเมินและวิเคราะห์ผลจากการจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบในระบบการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ามขบวนเดียว ในการลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การจำลองกระแสรั่วของระบบรถไฟฟ้ามกระแสตรงโดยการคำนวณด้วย M-File ของโปรแกรม MATLAB

1.3.2 ข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ามกระแสตรง ใช้ข้อมูลของรถไฟฟ้ามหานคร ฉลองรัชธรรม (MRT) สายสีม่วง (เหนือ) โดยไม่พิจารณา Cross Bounding, Impedance Bounding, Track Circuit และ Regenerative Breaking Energy

1.3.3 จำลองระบบที่ใช้ประเมินค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วทั้ง 3 ระบบ ได้แก่ ระบบปกติ ระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ และระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ (แบบอุดมคติ)

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 จำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ามหานครที่มีแหล่งจ่ายเป็นสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน โดยใช้ข้อมูลรถไฟฟ้ามหานคร ฉลองรัชธรรมสายสีม่วง (เหนือ)

1.4.2 ประเมินผลและวิเคราะห์แบบจำลองของระบบปกติ ระบบที่มีการติดตั้งตัวนำย้อนกลับและระบบที่มีการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบให้กับรถไฟกระแสตรงขนส่งมวลชนเพื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว

1.4.3 ประเมินผลศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วในโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (เหนือ) ให้เป็นไปตามมาตรฐาน EN 50122

1.4.4 ติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance Converter) แบบหัว - ท้าย โดยไม่พิจารณากระแสไฟฟ้าขับเคลื่อน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถประเมินและวิเคราะห์กระแสไฟฟ้ารั่วในระบบรถไฟฟ้ามหานครขนส่งมวลชนกระแสตรงโดยใช้วิธีการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางและวิธีการจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ามหานคร

1.5.2 ได้แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบกับโครงการรถไฟฟ้ามหานครสายฉลองรัชธรรมสายสีม่วง (เหนือ)

1.5.3 สามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วที่รางด้วยการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการสำรวจสืบค้น จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 การนำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ ทฤษฎีเกี่ยวกับวงจรย้อนกลับและการต่อลงดิน กระแสรั่วกีดกร่อนที่กล่าวถึงด้านสาเหตุการเกิดและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระแสรั่ว การประเมินกระแสรั่วตามมาตรฐานโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน EN 50122-1 และ EN 50122-2 ทฤษฎีการคำนวณ แบบจำลองในระบบดั้งเดิมที่มานในอดีต จนไปถึงระบบที่ติดตั้งลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว โดยงานวิจัยนี้แยกเป็นการ

วิเคราะห์ 3 ระบบ คือ แบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติ แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ และแบบจำลองการติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองและอภิปรายผลในกรณีศึกษาต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 2 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีแบบจำลองรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และกรณีแบบจำลองโครงการรถไฟฟ้ามหานครฉลองรัชธรรม สายสีม่วง (เหนือ)

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะพร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ

ภาคผนวก ก ระบบ Negative Resistance Converter Traction Power System

ภาคผนวก ข ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2 (รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วงเหนือ) ระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ

ภาคผนวก ค ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2 (รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วงเหนือ) ระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

ภาคผนวก ง บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาและทำการตรวจสอบการประเมินกระแสรั่วของรถไฟฟ้าสายสีม่วงที่มีการออกแบบไว้แล้ว และมีการพัฒนาโดยเพิ่มอุปกรณ์การติดตั้งเพื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วผ่านแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การเกิดกระแสรั่วในระบบรถไฟฟ้าสายสีม่วงเหนือ ดังนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยเพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่มีการใช้งานมาก่อน เกี่ยวข้องกับการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง ข้อกำหนด ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่ว และการติดตั้งเพื่อลดศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว ไม่ว่าจะเป็นด้วยวิธีการใหม่ NEG-TPS เป็นวิธีการใหม่ที่พัฒนามาจากวิธีการเดิมในปัจจุบัน Traditional traction power system (TRA-TPS) หรือ RET-TPS โดยจะกล่าวถึงส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างต่อการดำเนินงานวิจัยนี้ เพื่อความกระชับและชัดเจนของเนื้อหา

2.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงตามมาตรฐาน EN 50122-1 มีพิกัดแรงดันจ่ายไฟฟ้าหลายค่าดังตารางที่ 2.1 ช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับอนุญาต ระบุไว้ในมาตรฐาน BS EN 50163 และ IEC 60850 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่นิยมมากที่สุด คือ 600 V และ 750 V สำหรับรถรางและรถไฟฟ้าใต้ดิน และ 600 V, 750 V และ 1500 V สำหรับระบบจ่ายไฟแบบรางที่สาม รวมทั้งระบบขนส่งมวลชนในเมือง และชานเมือง

ตารางที่ 2.1 ช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับอนุญาต ระบุไว้ในมาตรฐาน BS EN 50163 และ IEC 60850

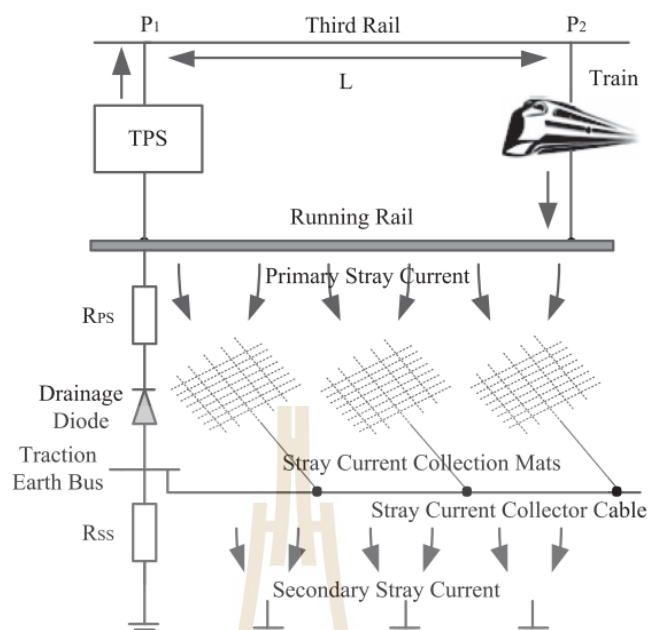
ระบบไฟฟ้า	แรงดันต่ำสุด ไม่ถาวร	แรงดันต่ำสุด ถาวร	แรงดันใช้งาน	แรงดันสูงสุด ถาวร	แรงดันสูงสุด ไม่ถาวร
600 V DC	400V	400 V	600 V	720 V	800 V
750 V DC	500 V	500 V	750 V	900 V	1000 V
1500 V DC	1000 V	1000 V	1500 V	1800 V	1950 V
3 kV DC	2 kV	2 kV	3 kV	3.6 kV	3.9 kV
15 kV AC, 16.7 Hz	11 kV	12 kV	15 kV	17.25 kV	18 kV
25 kV AC, 50 Hz	17.5 kV	19 kV	25 kV	27.5 kV	29 kV

2.3 ข้อกำหนด ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่ว

ปัญหากระแสรั่วและศักย์ไฟฟ้าที่รางเกิดขึ้นในการขนส่งทางรถไฟในเขตเมืองตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ.1930 และได้รับความสนใจตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา โดยทั่วไปแล้วมีวิธีแก้ปัญหา 3 วิธีในการลดค่า ศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว คือ วิธีการรวบรวมกระแสรั่ว วิธีการตรวจสอบ และวิธีการควบคุมการ ป้องกัน

1) ระบบตาข่ายรวบรวมกระแสรั่ว

การวิเคราะห์การรั่วของกระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปจะพิจารณาในส่วนของสถานีจ่าย กำลังไฟฟ้าระหว่างสองสถานีไฟฟ้าจุดลาก (TPS) ดังรูปที่ 2.1 รถไฟฟ้าขบวนเดียวของระบบราง กระแสตรงพร้อมระบบตาข่ายรวบรวมกระแสรั่ว ผ่านแนวยาวของรางวิ่ง กระแสรั่วสามารถเกิดขึ้นที่ ไตก็ได้ของรางวิ่ง (Running Rail) ตาข่ายรวบรวมกระแสรั่ว (Stray current collector mats solution: SCCN) และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องได้รับการติดตั้งระหว่างการก่อสร้างระบบขนส่งทางรถไฟใน เขตเมือง

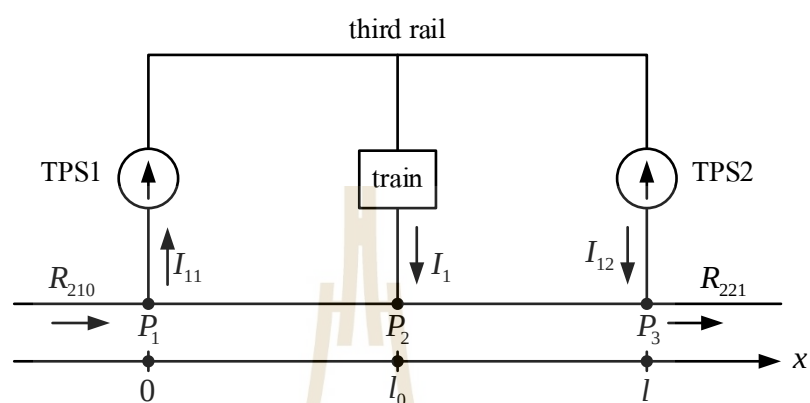


รูปที่ 2.1 รถไฟฟ้าขบวนเดียวของระบบรางกระแสตรงพร้อมระบบตาข่ายรวบรวมกระแสรั่ว
ที่มาภาพ : (Zaboli et al., 2017)

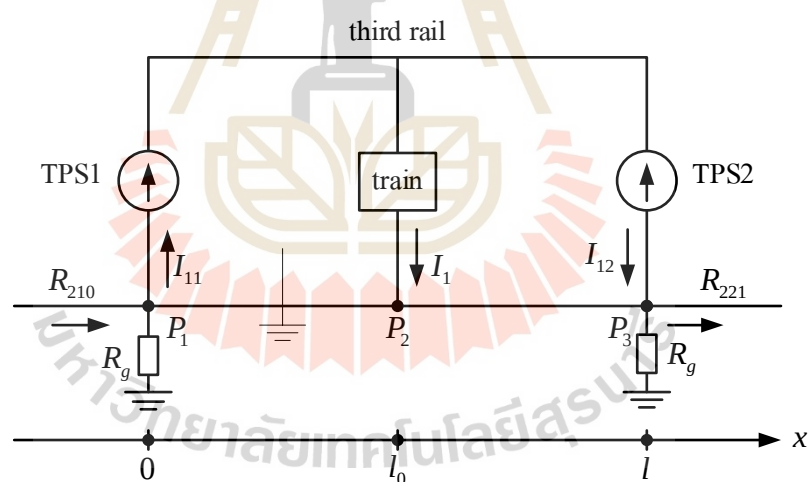
เนื่องจากความต้านทานของตาข่ายรวบรวมมีขนาดเล็กกว่าโครงสร้างพื้นฐานของระบบรถไฟฟ้า การติดตั้งระบบ SCCN จะไม่สามารถลดกระแสรั่วในชั้นปฐมภูมิได้ (Primary stray current) แต่จะลดกระแสรั่วในชั้นทุติยภูมิ (Secondary stray current) กระแสไฟฟ้าในส่วนน้อยที่มีการรั่วไหลจึงถูกรวบรวมและส่งกลับไปยังสถานีไฟฟ้าฉุดลาก ผ่านระบบ SCCN จากนั้นกระแสไฟของรางจะลงสู่พื้นโลกน้อยลงและศักย์ไฟฟ้าที่รางก็ลดลงเช่นกัน

ประสิทธิภาพการรวบรวมกระแสรั่วของระบบ SCCN คือ 86.32% ผ่านการสร้างแบบจำลองและการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อความต้านทานของคอนกรีตเท่ากับ $1,000 \Omega \cdot m$ และความต้านทานของดิน คือ $300 \Omega \cdot m$ นอกจากนี้ไดโอด (Drainage diode) ยังได้รับการติดตั้งใน TPS ซึ่งทำงานร่วมกันกับตาข่ายเพื่อรวบรวมกระแสไฟรั่วไหลให้กลับสู่สถานีและปกป้องโครงสร้างพื้นฐานอื่น ๆ ในประเทศจีนมีการใช้ระบบตาข่ายคู่กับไดโอด (Stray current drainage diode : SCDD) อย่างกว้างขวาง ในขณะที่จะไม่ค่อยพบในประเทศแถบยุโรป ต้นทุนของระบบ SCDD อยู่ในระดับต่ำ อย่างไรก็ตามการลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟรั่วไม่ชัดเจน และจะส่งผลกระทบมากเมื่อเวลาผ่านไป มีการศึกษาค่อนข้างน้อยเกี่ยวกับผลกระทบของ SCDD จากผลการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าระบบ SCDD ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าที่รางเพิ่มขึ้นเป็น 2-4 เท่าของระบบที่ไม่มีการติดตั้งตาข่ายรวบรวมกระแสไฟรั่ว (Zaboli et al., 2017)

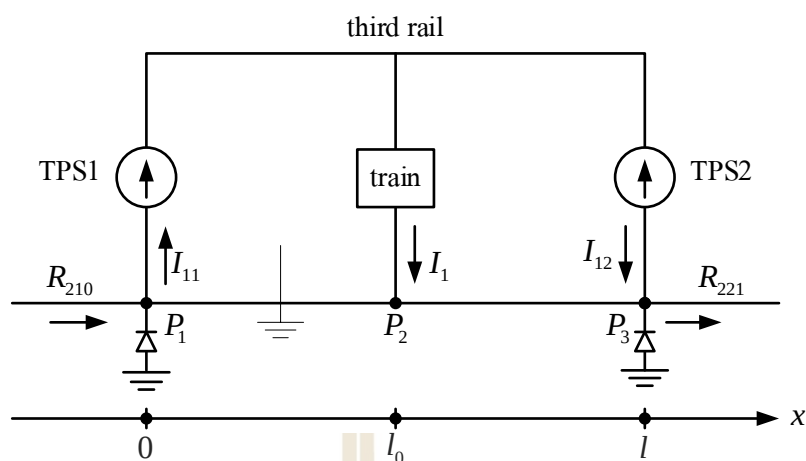
ต่อมาได้มีการพัฒนาแบบจำลองการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสสำหรับการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า โดยวิธีการไม่ต่อลงดิน (Ungrounded) วิธีการต่อลงดินโดยตรง (Solidly grounded) และวิธีการต่อลงดินด้วยไดโอด (Diode-grounded) ดังรูปที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 วิธีการไม่ต่อลงดิน



รูปที่ 2.3 วิธีการต่อลงดินโดยตรง

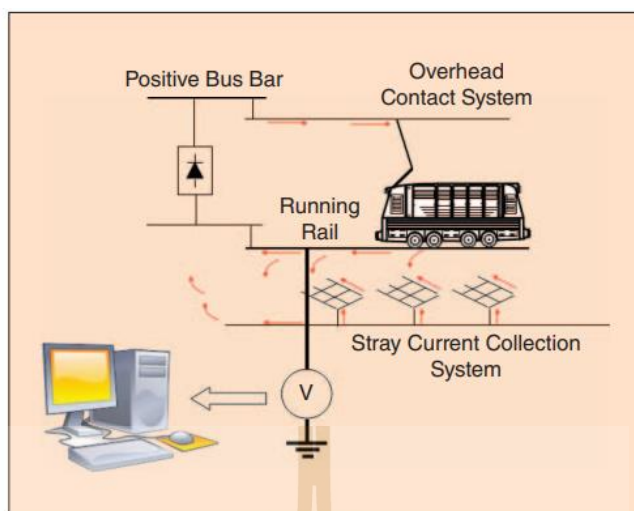


รูปที่ 2.4 วิธีการต่อลงดินผ่านไดโอด

โดยใช้แบบจำลองวงจรสมมูลของสายส่ง พบว่าวิธีการไม่ต่อลงดินส่งผลเสียทำให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูง เพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดความเสียหาย จึงคิดค้นวิธีการต่อลงดินด้วยไดโอดขึ้น ซึ่งวิธีการนี้สามารถช่วยลดค่ากระแสไฟฟ้าที่รั่วได้ แต่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เสริม (Lee., 2001) หรือมีการพัฒนาต่อวิธีการลงดินด้วยไดโอด เป็นการต่อไดโอดกลับทิศทางไดโอดจะทำหน้าที่บล็อกเส้นทางของการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่ว ซึ่งเป็นสาเหตุในการเกิดการกัดกร่อนของโครงสร้างโลหะในระบบไฟฟ้ากระแสตรงได้ มีกรณีศึกษาลดการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วในโครงการรถไฟฟ้า Tehran Metro Line 3 (Iran) โดยระบบมีวิธีการต่อลงดินผ่านไดโอดแบบกลับทิศทางและการจำลองผลของรถไฟหลายขบวน โดยใช้โปรแกรม MTS และโปรแกรม MATLAB (Alamuti et al., 2006)

2) ระบบการตรวจสอบ วัดกระแสรั่ว

ระบบการป้องกันการตรวจสอบวัดกระแสรั่ว ประสิทธิภาพของโลหะที่สัมผัสกับโครงสร้างอ้างอิงจะถูกวัดแบบเรียลไทม์ (Monitoring-protect solution) รวมถึงของรางวิ่ง โลหะฝัง และตาข่ายรวบรวมกระแสรั่ว ดังรูปที่ 2.5 ระบบการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าราง วิธีการตรวจสอบศักย์ไฟฟ้าของรางด้วยข้อกำหนดพื้นฐานสำหรับการตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.5 ระบบการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าราง

ที่มาภาพ : (Charalambous., 2016)

ในมาตรฐาน EN50122-2 ปริมาณกระแสรั่วที่กำหนดเป็นค่าอ้างอิงสำหรับรถไฟฟ้ามหานคร มีค่าไม่เกิน 2.5 mA/m/track แต่ปัญหา คือ การวัดกระแสรั่วจากทางวิ่งเพียงอย่างเดียวเป็นไปไม่ได้ ในทางปฏิบัติจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางที่วัดได้ด้วย เมื่อศักย์ไฟฟ้าของโลหะอยู่เกินค่าเกณฑ์ตาม มาตรฐาน IEC62128-1-2013 อุปกรณ์ป้องกันแรงดันไฟเกิน (Over-voltage protection devices: OVPDs) จะทำงาน จากนั้นศักย์ไฟฟ้าของโลหะจะลดลง การวัดศักย์ไฟฟ้าของรางเหล่านี้ ข้อมูลที่ได้ จากการวัดจะส่งไปยังผู้ปฏิบัติงานและผู้ควบคุมระบบเพื่อนำค่าเปรียบเทียบกับข้อมูลสภาพอ้างอิง ดังนั้นความพยายามดังกล่าวไม่ได้วัดค่าผลกระทบของกระแสไฟฟ้ารั่ว แต่ก็มุ่งความสนใจไปที่ที่มาของ กระแสไฟฟ้ารั่ว ข้อเสียของระบบนี้อยู่ที่การระบุเงื่อนไขอ้างอิงที่เหมาะสมที่จะทำหน้าที่เป็นตัวชี้วัด สภาพแวดล้อม สำหรับองค์ประกอบที่เป็นกึ่งตัวกำหนด ไม่ว่าจะเป็นแนวโน้มกำหนดการรายวันหรือตาม ฤดูกาลสำหรับการตรวจสอบและป้องกัน สภาพอากาศ/สภาพแวดล้อม สภาพถนนราง และมลพิษ ทางรางที่สำคัญที่สุด คือ ความปลอดภัย ภาวะสุขภาพของผู้โดยสาร อุปกรณ์ตาข่ายรวบรวมกระแส รั่วที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้สามารถทำงานร่วมกับระบบตรวจสอบ-ป้องกัน ซึ่งเหมาะสำหรับการเฝ้า ติดตามและป้องกันโลหะตามเวลาจริง อย่างไรก็ตาม กระแสไฟรั่วทั้งหมดอาจมีขนาดใหญ่กว่าแม้ว่า รางวิ่งจะลัดวงจรกับพื้นโลก โดย OVPDs ในบางพื้นที่ เพื่อให้สามารถตีความสัญญาณเตือนภัยใด ๆ ที่ เกิดขึ้นภายใต้ค่าศักย์ไฟฟ้าของรางจะต้องอาศัยการผสมผสานของวิจารณ์ทางวิศวกรรมและต้อง ใช้ประสบการณ์ร่วมด้วย

บางพื้นที่จะตรวจสอบกระแสไฟฟ้าด้วย Virtual Instrument หรือการตรวจสอบกระแส รั่วอัตโนมัติ และตรวจสอบศักยภาพของอุปกรณ์ของท่อส่งก๊าซที่อยู่ใกล้เคียง หรือที่ถูกขนาบกับรางที่

ใช้ในการเคลื่อนที่ โดยนำเสนอแบบจำลองพารามิเตอร์แบบกระจายเพื่อคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว โดยคำนึงถึงด้านข้างของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและรถไฟ แบบจำลองสามารถแจกแจงกระแสรั่วและแรงดันไฟฟ้าที่รางในจุดที่รถไฟอยู่หรือในจุดที่ลัดวงจรที่ตำแหน่งใด ๆ พบว่ากระแสไฟฟ้ารั่วในระบบไฟฟ้ากระแสตรงจะสร้างความเสียหายอย่างมากให้กับท่อส่งก๊าซที่ฝังอยู่และยังเน้นให้เห็นว่าปัญหาการเกิดกระแสรั่วควรมีวิธีการป้องกันให้สอดคล้องกับการทำงานของรถไฟได้ดินได้ (Valero and Sanz., 2013) อีกทั้งยังมีการพัฒนารูปแบบการตรวจวัดสำหรับใช้กับระบบรถไฟหลายขบวน เพื่อจำลองผลของแรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วในระบบการต่อลงดินโดยใช้แบบจำลองวงจรสมมูลของสายส่ง (SPAT-DC) เป็นแบบจำลองที่สามารถใช้งานได้หลายขบวน ขึ้นอยู่กับการตั้งค่า ข้อมูลที่ป้อนให้กับระบบและรูปแบบการต่อลงดิน ไม่ว่าจะเป็นระบบการต่อสายดินแบบยกลอยหรือการต่อลงดินด้วยไดโอด จากผลการจำลองพบว่าพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด จะเกิดขึ้นระหว่างรางและพื้นดินที่ระยะไกลจากพื้นที่ของระบบการติดตั้ง พบว่า ไดโอดสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและช่วยปิดกั้นกระแสไหลย้อนกลับได้ (Ramos et al., 2014)

3) ระบบควบคุม-ป้องกัน

เนื่องจากวิธีแก้ปัญหาสองวิธีข้างต้นมุ่งเน้นไปที่การปกป้องโครงสร้างพื้นฐานเป็นหลักมากกว่าการลดการรั่วของกระแสราง จึงมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการลดค่ากระแสไฟฟ้ารั่วและศักย์ไฟฟ้าที่ราง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการลดการเกิดผลกระทบ จึงมีการศึกษาระบบควบคุม (Generation-controlled solution) และเสนอให้ลดกระแสไฟฟ้ารั่วและศักย์ไฟฟ้าที่รางจากแหล่งกำเนิด

จากงานวิจัยในอดีตที่มีการเสนอปัญหาของกระแสไฟฟ้ารั่วของระบบรถไฟในปัจจุบันซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นโดยไม่คาดคิดผ่านทางระบบต่อลงดินและโครงสร้างที่เป็นโลหะ กระแสไฟฟ้ารั่วนี้สามารถเกิดจากระบบรถไฟกระแสตรงและระบบรถไฟกระแสสลับได้ พบว่ากระแสไฟฟ้ารั่วจากไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดขึ้นเพียงร้อยละ 1-5 ของการกักร่อนเมื่อเทียบกับปริมาณการกักร่อนที่เกิดขึ้นจากระบบไฟฟ้ากระแสตรง การป้องกันแคโทดิก (CP) เป็นเทคนิคที่ใช้ควบคุมการสักร่อนของผิวโลหะโดยการทำให้เป็นแคโทดทางไฟฟ้าเคมี และมีวิธีการในการลดกระแสไฟฟ้ารั่วที่เกิดจากระบบไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังนี้ 1) จัดให้มีจำนวนรางให้เพียงพอ 2) ลดระยะห่างระหว่างสถานี 3) หุ้มฉนวนให้กับรางวิ่ง 4) ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบ 3 สาย ซึ่งในวิธีการที่ 1 เป็นวิธีการที่ถูกนำมาใช้กับระบบขนส่งมวลชนหลายระบบทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่วลดลง ในส่วนวิธีการที่ 4 ไม่ได้ถูกนำมาใช้เนื่องจากเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการสร้างและการติดตั้งที่เพิ่มขึ้น (Paul., 2016) และกรณีศึกษาของรถไฟฟ้ามหานครสายสีแดงที่ประเทศไต้หวัน จากสถานี Tamshui (R33) ไปยัง สถานี Chuwei (R31) พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใต้ดินมีค่าเกิน 0.1 V จึงได้นำเสนอวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่รั่วขึ้น คือ การดัดแปลงระบบขนส่ง และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบริเวณรอบ ๆ ทั้งนี้สามารถเลือก

หรือทำพร้อมกันได้ทั้ง 2 วิธีการ สรุปได้ว่าช่วยลดความต้านทานของวงจรย้อนกลับ เพิ่มความต้านทานระหว่างโครงสร้างของโลหะทั้งบนดิน/ใต้ดิน และเพิ่มความต้านทานของเส้นทางการไหลกลับกระแส (Chien., 2005)

Description	Corrosion Committee (1921)	Currently Used
Decreasing the resistance of the rail return path		
Rail size (cross-sectional area)	X	X
Rail bonds	X	X
Cross-bonding	X	X
Parallel conductors	X	X (with modification)
Traction power substation	X	X
Drainage bonds (case-by-case basis)	X	X
Increasing resistance of the earth-to-rail leakage path		
Track-to-earth resistance	X	X
Ungrounded traction power substation	X	X
Storage yard/mainline isolation	X	X

รูปที่ 2.6 ตารางระบบควบคุมการกัดกร่อนสำหรับกระแสไฟฟ้ารั่ว

ที่มา : (Memon and Fromme., 2014)

จากรูปที่ 2.6 ตารางระบบควบคุมการกัดกร่อนสำหรับกระแสไฟฟ้ารั่ว แสดงวิธีการลดกระแสไฟฟ้ารั่วที่ใช้สำหรับการควบคุมการกัดกร่อนตั้งแต่ปี ค.ศ.1921 จนถึงปัจจุบัน โดยแยกเป็น 2 จุดประสงค์ คือ 1) ลดความต้านทานของรางวิ่ง จะประกอบไปด้วยวิธีการฉนวนรางวิ่ง วิธีการวัสดุเคลือบถูกนำไปใช้กับฉนวนรางวิ่งจากพื้นดินเพื่อให้เส้นทางการรั่วของกระแสรางถูกปิดกั้น คอนกรีตผสมที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนสูงมากก็สามารถนำมาใช้เพื่อลดศักย์ไฟฟ้าของรางและกระแสไฟรั่ว พันธะของรถไฟ พันธะแบบตรงข้าม ขนานตัวนำกับรางวิ่ง มีการติดตั้งรางฉนวนเพื่อเป็นรางกลับพิเศษ ทำให้ตัวนำที่วางขนานกับรางวิ่งแบ่งกระแสรางและลดความต้านทานตามแนวยาวของรางได้ อีกทั้งยังทำให้ระยะของเส้นทางการกลับสั้นลงก็ช่วยให้เส้นทางการรั่วไหลของกระแสรางสั้นลงเช่นเดียวกัน ขนานและเชื่อมต่อกับรางในระยะประมาณ 5-6 กิโลเมตร สามารถช่วยลดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณแบบขนานได้ถึงร้อยละ 30 (Kulworawanichpong., 2003), ควบคุมที่สถานีไฟฟ้าจุดลาก การเพิ่มแรงดันของแหล่งจ่ายไฟมีส่วนทำให้กระแสรางลดลง และวิธีการแบบเดิมการวางตาข่ายรวบรวมกระแสรั่วไฟ และ2) เพิ่มความต้านทานของเส้นทางการรั่วของรางสู่ดิน จะประกอบไปด้วยวิธีการเพิ่มความต้านทานจากรางสู่ดิน เพิ่มความต้านทานใต้ดินที่สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนและวิธีการแยกโซนหรือแยกการจ่าย

เมื่อเทียบกับวิธีการรวบรวมกระแสรั่ว และวิธีการตรวจสอบกระแสไฟรั่วของรางน้อยลง
จากรางวิ่ง ด้วยวิธีการควบคุม-การป้องกัน ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าของรางและกระแสไฟรั่วจะลดลงอย่างเห็น
ได้ชัด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2 วิธีการที่มีการใช้งานของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟรั่ว

ตารางที่ 2.2 วิธีการที่มีการใช้งานลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟรั่ว

ระบบ	วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบตาข่ายรวบรวม กระแสรั่ว	ตาข่าย ตาข่ายคู่กับไดโอด	ราคาถูก	เสื่อมสภาพตาม กาลเวลา
ระบบการตรวจวัด	วัดค่าศักย์ไฟฟ้าโลหะ อุปกรณ์ป้องกันแรงดันไฟเกิน	ป้องกัน ตลอดเวลา	ค่ากระแสไฟรั่ว อาจจะสูงเกินไป
ระบบควบคุม	ฉนวนราง ผสมคอนกรีต การติดตั้งรางเสริม ลดระยะของแหล่งจ่ายไฟ การเพิ่มแรงดันไฟของแหล่งจ่ายไฟ ขนานตัวนำ	ลดต้นเหตุของ ศักย์ไฟฟ้าราง และกระแสไฟรั่ว	ค่าใช้จ่ายสูง มีข้อจำกัด

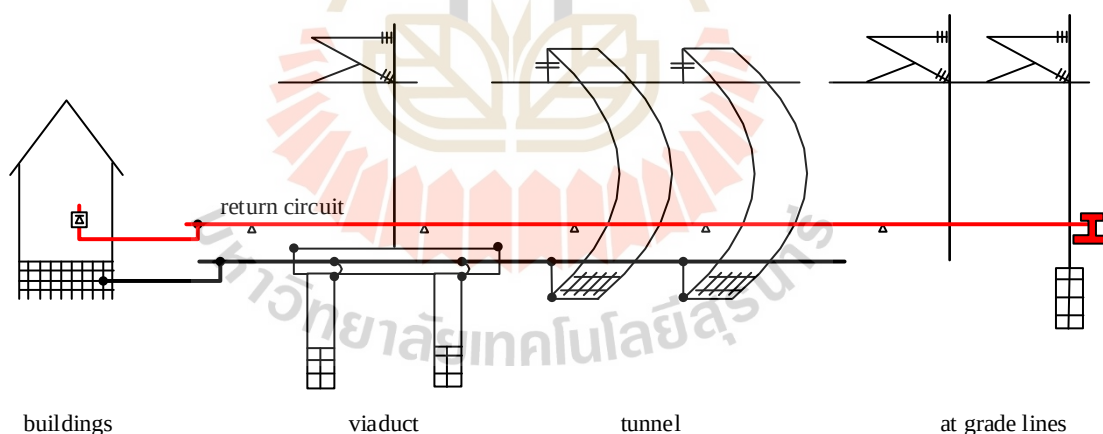
อย่างไรก็ตาม มีข้อบกพร่องบางประการในวิธีการควบคุมการป้องกัน โดยรุ่นที่มีฉนวน
ของวัสดุเคลือบและคอนกรีตผสมจะเสื่อมสภาพตามกาลเวลา การติดตั้งรางเสริมและการปรับเปลี่ยน
ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องในรถไฟมักจะทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง และฉนวนของรางเสริมก็จะแยลงเมื่อเวลา
ผ่านไป ความต้านทานของสายเคเบิลมักจะสูงกว่ารางวิ่งมาก หากจำนวนสายเคเบิลไม่เพียงพอ ผล
การลดลงไม่ชัดเจน ปริมาณและราคาของสายเคเบิลจำกัดการใช้งานด้านวิศวกรรม การปรับระยะห่าง
ของแหล่งจ่ายไฟหรือแรงดันไฟฟ้าถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการขนส่งทางรถไฟในเขตเมืองใหม่
แต่ไม่เหมาะสำหรับการขนส่งทางรถไฟในเขตเมืองที่มีอยู่

2.4 การติดตั้งเพื่อลดศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว

วิธีการติดตั้งตัวนำย้อนกลับ RET-TPS และวิธีการใหม่ในการลดศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่ว
ด้วยระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ NEG-TPS หลักการของรถไฟฟ้ามหานครและกระแสตรง
กระแสสูงดูถูกไหลกลับไปยังสถานีย่อย ผ่านวงจรย้อนกลับ สายสัมผัส และวงจรย้อนกลับบางส่วน

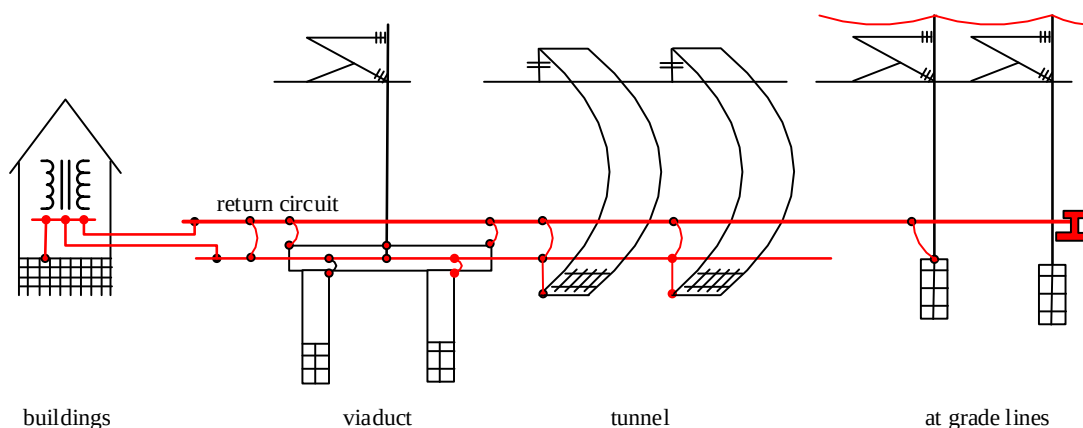
การใช้รางวิ่งเป็นวงจรรย้อนกลับเป็นลักษณะทั่วไปของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง มาตรการสำหรับการต่อสายดินและการเชื่อมต่อที่ใช้กับวงจรรย้อนกลับนั้นแตกต่างกันโดยพื้นฐานในระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสตรง รางวิ่งมีความทนทานต่อดินและระบบกราวด์สูง เพื่อหลีกเลี่ยงกระแสย้อนกลับทำให้กระแสรางวิ่ง สาเหตุเกิดการกัดกร่อนของกระแสไฟฟ้ารั่วของส่วนประกอบที่เป็นโลหะเมื่อสัมผัสกับพื้นดิน มีความเสี่ยงที่จะเกิดการแยกวงจรรย้อนกลับจากระบบกราวด์อย่างสมบูรณ์ ในรางวิ่งจะสร้างแรงดันไฟฟ้าระหว่างทางและดินระหว่างการทำงานปกติและในกรณีที่ไฟฟ้าลัดวงจรเนื่องจากขาดการต่อสายดิน มีความเสี่ยงที่แรงดันไฟฟ้าสัมผัสจะเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดในกรณีที่เกิดกระแสสูงเป็นเวลานาน นอกจากแรงดันไฟตกที่เกิดขึ้นในระบบรางรถไฟไฟฟ้ากระแสตรงแล้ว ระบบกระแสสลับยังทำให้ตัวเหนี่ยวนำแรงดันตกซึ่งมีขนาดเกือบเท่ากัน ความถี่ในการทำงาน 16.7 Hz มากกว่าสองเท่าของค่าความถี่ที่ 50/60 Hz เมื่อรวมกับการจ่ายไฟฟ้าที่ยาวขึ้น จะนำไปสู่ศักย์ไฟฟ้าของรางที่สูงกว่าระบบกระแสตรง สำคัญแม้ว่าจะมีกระแสไฟทำงานน้อยกว่าเพื่อจำกัดศักย์ไฟฟ้าของรางให้เป็นค่าที่ยอมรับได้

จึงจำเป็นต้องเชื่อมต่อวงจรรกับระบบกราวด์ กล่าวคือ เชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับตามราง รูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 วงจรรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง แสดงการเชื่อมต่อที่จำเป็นระหว่างวงจรรย้อนกลับและระบบสายดินสำหรับระบบกระแสตรงและกระแสสลับ ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 วงจรรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มาภาพ : (Chuchit., 2018)

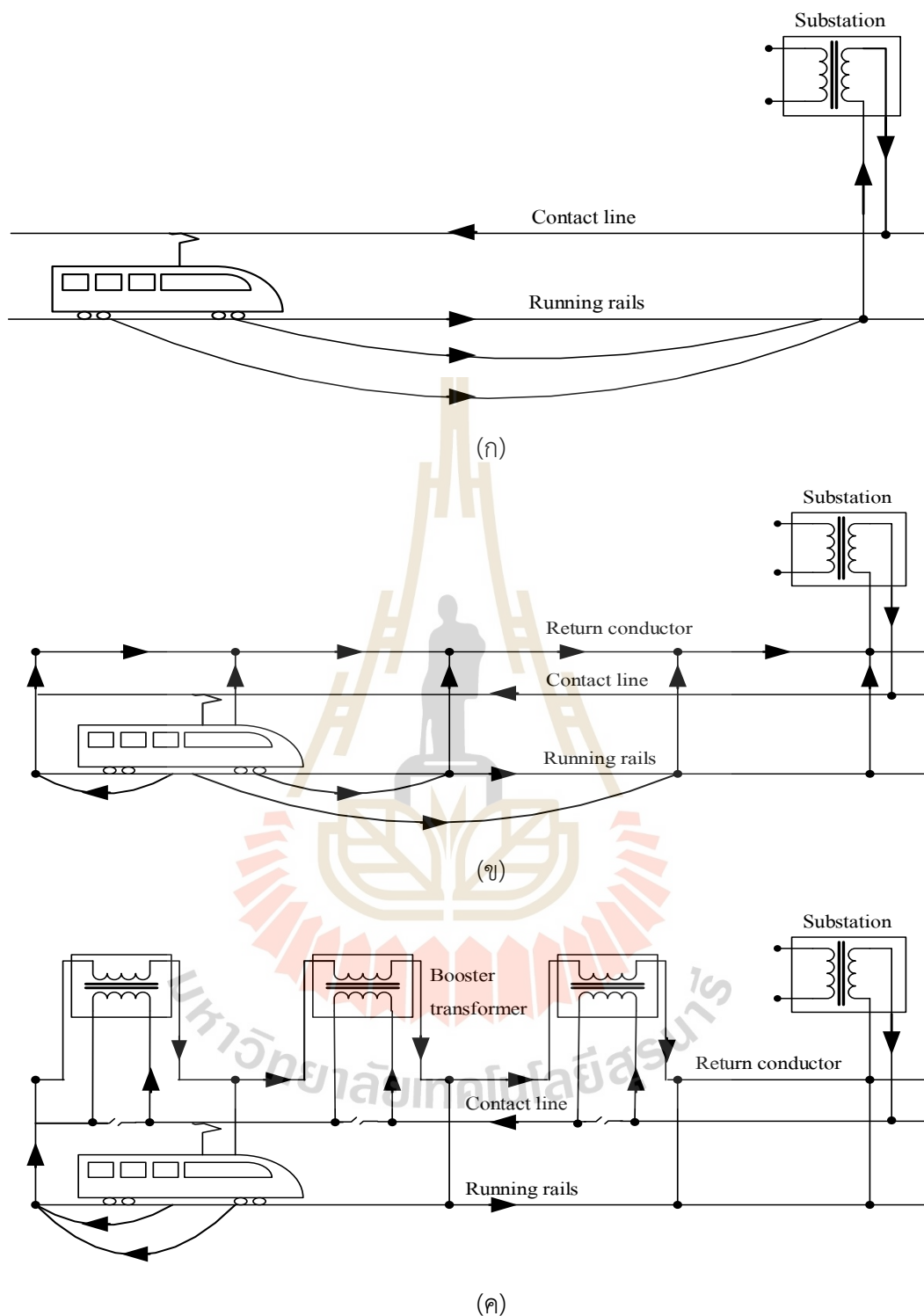


รูปที่ 2.8 วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ
ที่มาภาพ : (Chuchit., 2018)

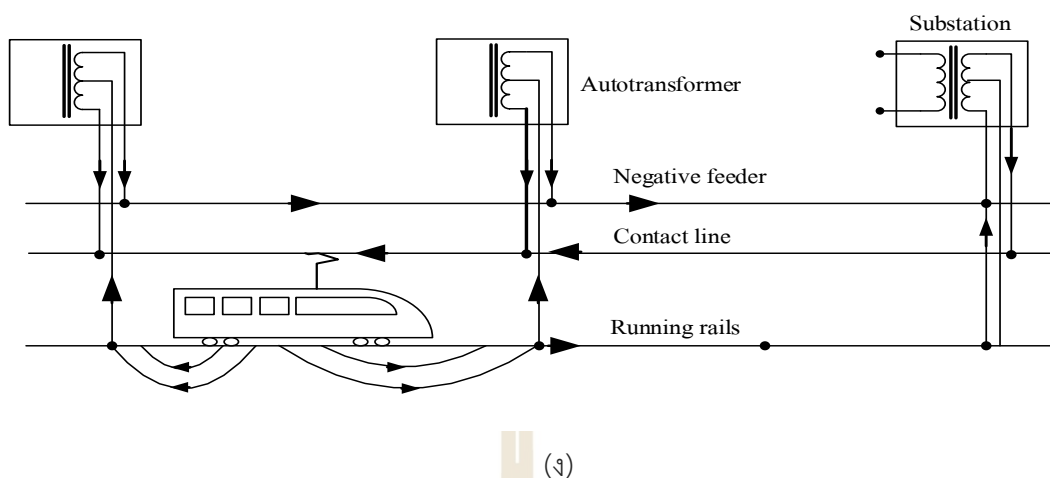
นอกจากกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านวงจรย้อนกลับแล้ว กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านระบบกราวด์ของอาคารอีกด้วย เนื่องจากการต่อลงกราวด์ของวงจรกระแสย้อนกลับทำให้เกิดการรบกวนกับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็กที่ไม่ต้องการบนอุปกรณ์ของรถไฟ และอาจทำให้เกิดการรบกวนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่งคลื่นของรถไฟกระแสตรง การแยกวงจรย้อนกลับและระบบสายดินอย่างสมบูรณ์เป็นหลักการระบบกระแสตรง การใช้งานจริงอาจแตกต่างกันไป

1) ระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ

จะกล่าวถึงการติดตั้งตัวนำย้อนกลับในระบบรถไฟกระแสสลับ ดังที่ 2.9 ก)-ง) ระบบรางกลับ (Rail-return system: RR) มักใช้กับสายทั่วไป หม้อแปลงบูสเตอร์ (Booster transformer: BT) และระบบหม้อแปลงไฟอัตโนมัติ (Auto-transformer: AT) ใช้เพื่อลดกระแสย้อนกลับผ่านรางและกราวด์ ซึ่งสภาพการลงกราวด์ที่มีกระแสสูงและยาก อาจนำไปสู่การรบกวนและค่าศักย์ไฟฟ้ารางที่ยอมรับไม่ได้



รูปที่ 2.9 รูปแบบการติดตั้งตัวนำย้อนกลับในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 2.9 รูปแบบการติดตั้งตัวนำย้อนกลับในระบบรถไฟกระแสสลับ (ต่อ)

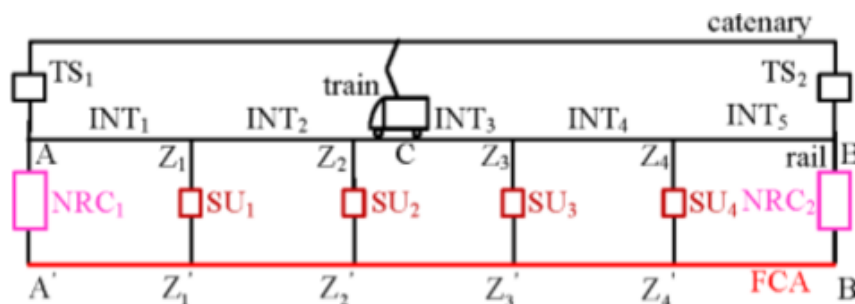
(ก) ระบบรางกลับ (ข) ระบบตัวนำย้อนกลับ

(ค) ระบบหม้อแปลงบูสเตอร์ (ง) ระบบหม้อแปลงไฟต์โนมิตี

ในระบบ BT ตัวนำย้อนกลับจะเชื่อมต่อกับรางวิ่งที่จุดกึ่งกลางระหว่างตำแหน่ง BT ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสย้อนกลับที่มาก ส่วนระบบ AT ใช้ระบบเหนือศีรษะแบบแรงดันคู่หรือหลายระบบ แบบจำลองนี้ใช้วงจรย้อนกลับที่ซึ่งเรียกว่าตัวป้อนค่าลบ (Negative Feeder) อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาภาคปฏิบัติได้แสดงให้เห็นว่ากระแสไหลจะมีค่ามากถึง 10% ยังใช้รางวิ่งเพื่อป้องกันหน้าสัมผัสไฟฟ้า (in-direct) เพื่อจุดประสงค์นี้ อุปกรณ์ชิ้นส่วนเสริมที่จะเลือกให้เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับรางวิ่งขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าของวงจรย้อนกลับและจุดการเชื่อมต่อกระแสย้อนกลับผ่านดินคิดเป็นร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 40 ของกระแสชุดลาก (Friedrich et al., 2009)

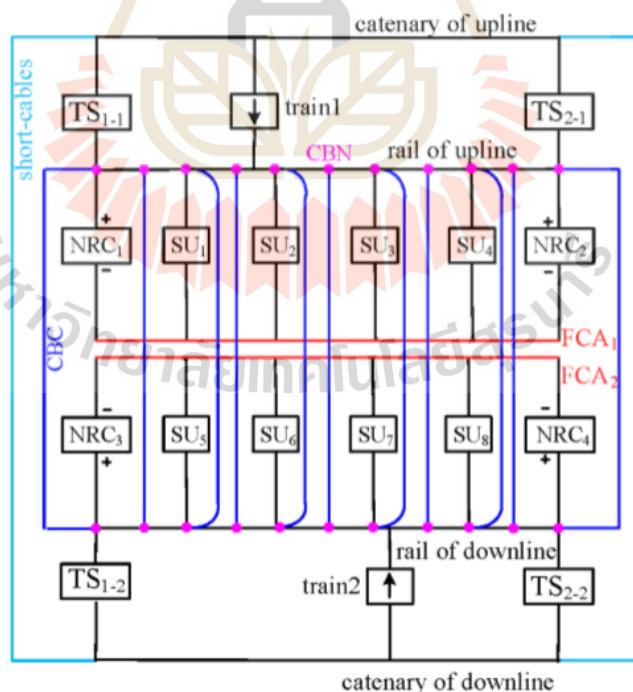
2) ระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

เพื่อลดศักย์ไฟฟ้าของรางและกระแสไฟฟ้ารั่ว ได้มีการเสนอระบบพลังงานจุดแปลงความต้านทานเชิงลบ (NEG-TPS) และกลายเป็นระบบที่มีแนวโน้มสำหรับการขนส่งทางรถไฟในเมือง การสร้างแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพจะเป็นประโยชน์สำหรับการทำความเข้าใจประสิทธิภาพแบบไดนามิกของ NRC-TPS ดังรูปที่ 2.10 อย่างไรก็ตามระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบมีเงื่อนไขบางอย่าง เช่น สภาพการทำงานของรถไฟ ความต้านทานระหว่างรางกับดินที่มองข้ามไม่ได้ การกำหนดค่าที่ซับซ้อน และหลักการทำงานของ NEG-TPS และอื่น ๆ ดังนั้น จึงเสนอแบบจำลองโครงข่ายไฟฟ้า NEG-TPS ที่เหมาะสมกับสภาวะไดนามิกต่าง ๆ ไว้ ดังรูปที่ 2.10 วงจรทั่วไประบบ NEG-TPS ระหว่างสองสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าขบวนเดียว



รูปที่ 2.10 วงจรทั่วไประบบ NEG-TPS ระหว่างสองสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าในขบวนเดียว
ที่มาภาพ : (Shang et al., 2020)

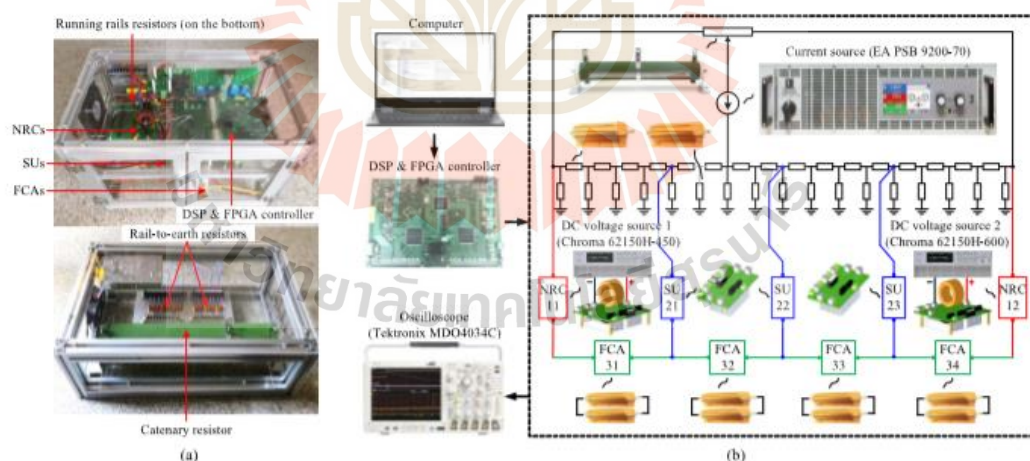
ในระบบ double-line ระหว่างสองสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 2.11 วงจรทั่วไประบบ NEG-TPS ระหว่างสองสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าหลายขบวน สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็นสถานีย่อยสองสถานี ตัวอย่างเช่น TS₁₋₁ และ TS₁₋₂ สำหรับการวิเคราะห์ในระบบ double-line จำนวนอุปกรณ์ NEG และ SU จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า และการทำงานของ SU มีหน้าที่ในการเชื่อมต่อในแนวขวาง (cross-bonding-cables: CBC) ซึ่งใช้งานกันอย่างแพร่หลายในแบบดั้งเดิม ส่วนระบบไฟฟ้าดูดแลก จะเป็นการเชื่อมต่อแบบไขว้ (cross-bonding-nodes: CBN) ตามแนวรางวิ่ง



รูปที่ 2.11 วงจรทั่วไประบบ NRC-TPS ระหว่างสองสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าหลายขบวน
ที่มาภาพ : (Shang et al., 2020)

Shang et. al ได้นำเสนอวิธีการลดศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสไฟฟ้ารั่วด้วยระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ (NEG-TPS) ที่มีแนวโน้มในการใช้งานกับการขนส่งทางรถไฟในเขตเมือง มีการสร้างแบบจำลองแบบไดนามิก การจำลองโครงสร้างเครือข่ายของ NEG-TPS ในการทำงานแบบการเคลื่อนที่ของรถไฟขบวนเดียวที่ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ 1600 A ในระยะระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน 4 กิโลเมตร พบว่า การนำเสนอวิธีการลดศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วด้วยระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ (NEG-TPS) มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งานได้จริงอีกทั้งยังสามารถพัฒนาการประเมินการลดลงของศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสไฟฟ้ารั่วในระบบรถไฟฟ้ามหานครได้ (Shang et al., 2020)

นอกจากนี้ระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ มีการจัดรูปความต้านทานให้เป็นศูนย์เพื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วที่เป็นปัญหอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ในระบบรถไฟฟ้ามหานคร อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อความปลอดภัยของมนุษย์รวมถึงก่อให้เกิดความเสียหายของการกักร้อนในโครงสร้างโลหะ ระบบ NEG-TPS สร้างขึ้นด้วยการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มในระบบรถไฟฟ้ามหานครแบบเดิม โดยไม่ต้องดัดแปลงรถไฟ รางวิ่ง หรือโครงสร้างอุโมงค์ต่าง ๆ โดยบทความนี้ได้มีการนำเสนอผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 2.12 รูปแบบการทดลองระบบ TRA-TPS และ NEG-TPS ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2.12 รูปแบบการทดลองระบบ TRA-TPS และ NEG-TPS ในห้องปฏิบัติการ
ที่มา : (Gu et al., 2020)

พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดลงของศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วในระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบกับระบบปกติ พบว่าประสิทธิภาพการลดลงมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 54-100 ในแบบจำลองและการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ อีกทั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิง

ลบนีเป็นวิธีการที่เป็นไปได้และใช้งานได้จริงสำหรับปัญหาศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วในการขนส่งทางรถไฟในเขตเมือง (Gu et al., 2020)

2.5 วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง มีใช้งานอยู่ 5 รูปแบบ (กุลวรรานิชพงษ์., 2014) ได้แก่ 1) rail insulation system: RIS 2) diode earthing system: DES 3) floating negative return current system: FN RCS 4) stray current collecting net system: SCCNS และ 5) fourth rail system: FRS มีรายละเอียดดังนี้

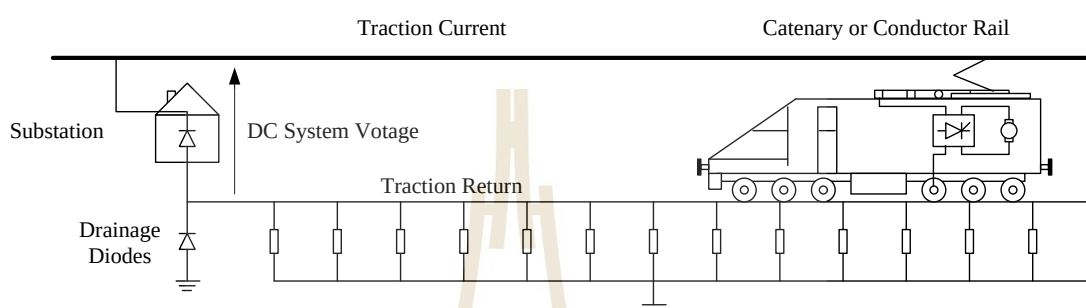
1) rail insulation system: RIS

ระบบ RIS เป็นระบบการต่อลงดินของแหล่งจ่ายไฟสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ล้อรถไฟฟ้าและรางวิ่งเป็นเส้นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปที่สถานีไฟฟ้า เนื่องจากระบบรถไฟฟ้าเดิมไม่มีการทำฉนวนไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับไม้หมอนรถไฟหรือส่วนที่รองรับรางวิ่งทำให้เกิดกระแสรั่ว (stray current) ไปยังส่วนอื่น ๆ ของโครงสร้างเกิดเส้นทางกระแสย้อนกลับอื่น ๆ ที่ซับซ้อนและสืบทายาก ทำให้รางวิ่งของรถไฟฟ้าที่สร้างใหม่จะมีการทำฉนวนไฟฟ้าในส่วนดังกล่าวทำให้ลดการเกิดกระแสรั่วและการกัดกร่อนของโครงสร้างที่เป็นโลหะ จากข้อกำหนดของมาตรฐาน EN 50122-2 ค่าความนำต่อหน่วยความยาว (conductance per unit length) ระหว่างรางวิ่งกับดิน (track-to-earth) ควรมีค่าไม่เกิน 500 mS/km สำหรับโครงสร้างระบบแบบเปิด (open formation) และไม่เกิน 2500 mS/km สำหรับโครงสร้างระบบแบบปิด (closed formation) นอกจากนี้ยังเพิ่มการต่อเชื่อมลงดิน (earthing and bonding) ของส่วนโครงสร้างโลหะต่าง ๆ หรือโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กของระบบเข้าด้วยกันและต่อลงดินตามมาตรฐาน EN 50122-2 รูปแบบนี้จะต้องมีการต่อเชื่อมรางวิ่งด้วยความต้านทานค่าต่ำ (low-resistance rail joint bonds) ตลอดความยาวของรางเพื่อลดแรงดันตกในราง โดยผลจากความต้านทานที่ต่อเชื่อมระหว่างรางวิ่งต้องทำให้ความต้านทานรางเพิ่มขึ้นไม่เกิน 5% (Friedrich et al., 2009) จากนั้นจะต้องต่อเชื่อมรางวิ่งของทั้งสองทางเข้าด้วยกันด้วยกรณีของรถไฟฟ้าทางคู่ (double-track railway) รูปแบบนี้นิยมใช้งานกับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงของ Network Rail สหราชอาณาจักร

2) diode earthing system: DES

ระบบ DES จะใช้ไดโอด (drainage diode) ติดตั้งร่วมกับตัวนำลงดินที่สถานีไฟฟ้างดรูปที่ 2.13 นอกจากนี้ในการติดตั้งจะมีอุปกรณ์อื่น ๆ ติดตั้งร่วมด้วย เช่น ตัวต้านทานจำกัดกระแส (current limiting resistor) และกับดักเสิร์จ (surge arrestor) เป็นต้น ถ้าไดโอดนำกระแสจะส่งผลให้แรงดันของรางวิ่งมีค่าเป็นศูนย์ ในกรณีไดโอดไม่นำกระแสหมายความว่าแรงดันที่รางจะมีค่าเป็นบวก รูปแบบที่ใช้ไดโอดนี้จะทำให้กระแสรั่วมีค่าน้อย และถ้าหากเกิดกระแสรั่วอันเนื่องมาจากความ

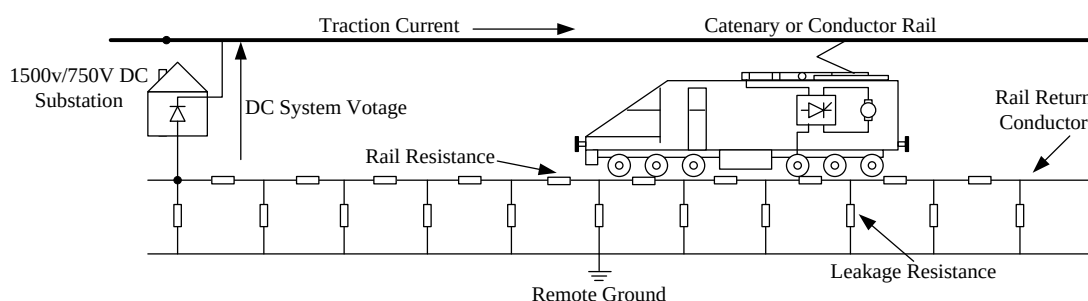
เสื่อมสภาพของการทำฉนวน ไดโอดจะทำหน้าที่นำกระแสกลับสู่สถานีจ่ายไฟโดยตรง อย่างไรก็ตาม การใช้ไดโอดต่อลงดินนี้จะเกิดปัญหาในกรณีที่รถไฟบางส่วนที่ทำการคืนพลังงานจากการเบรกเข้าสู่ระบบ (regenerative braking) จะเหนี่ยวนำให้รางวิ่งมีศักย์ไฟฟ้าติดลบไดโอดจะนำกระแสได้ในสถานการณ์นี้ ตัวอย่างระบบรถไฟที่ติดตั้งการต่อลงดินด้วยรูปแบบนี้ ได้แก่ Hong Kong MTRC และ Sheffield Super Tram



รูปที่ 2.13 การต่อลงดินโดยใช้ไดโอด

3) floating negative return current system: FNRCs

ระบบ FNRCs จะไม่ต่อขั้วลบกับรางจากเอาต์พุตของสถานีเรียงกระแสลงดิน จะทำให้ที่สถานีไฟฟ้าไม่มีการต่อลงดิน ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วลบจะลอยอยู่และไม่จำเป็นต้องเท่ากับศูนย์ ทำให้รูปแบบนี้มีความเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันสัมผัสสูง (high touch voltage) ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานหรือต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยไม่ตั้งใจ ทำให้ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันที่รางวิ่ง (rail potential control device) เพิ่มเติม การติดตั้งรูปแบบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 ตัวอย่างของระบบรถไฟที่ใช้การต่อลงดินด้วยวิธีนี้ ได้แก่ Singapore MRT และ Hong Kong LRT

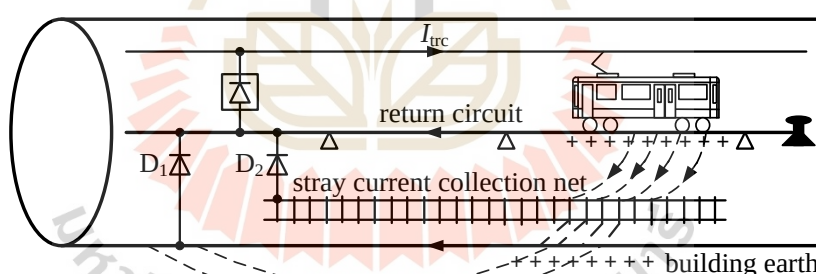


รูปที่ 2.14 Floating negative return current system

4) stray current collecting net system: SCCNS

ระบบ SCCNS เป็นระบบที่นำมาใช้กับรถไฟฟ้าที่วิ่งในอุโมงค์หรือโครงสร้างยกระดับ โดยการติดตั้งตาข่ายรวบรวมกระแสรั่ว (stray current collecting net) ภายในโครงสร้างของอุโมงค์หรือทางยกระดับดังกล่าว เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของส่วนที่เป็นโลหะ ตาข่ายจะถูกติดตั้งระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างของอุโมงค์หรือทางยกระดับนั้น พร้อมทั้งใช้ไดโอดเพื่อช่วยทำให้กระแสรั่วไหลกลับสู่สถานี ดังรูปที่ 2.15 จากผลการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าการใช้งานตาข่ายรวบรวมกระแสรั่วนี้จะทำให้แรงดันสัมผัสเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าของระบบที่ไม่ติดตั้งตาข่าย (Friedrich et al., 2009)

ระบบบีทีเอส (Bangkok Transit System: BTS) ได้รับการออกแบบและก่อสร้างโดย SIEMENS ในขั้นตอนการออกแบบได้คำนึงถึงผลกระทบต่าง ๆ ดังกล่าวไว้โดยใช้โครงสร้างระบบแบบยกระดับ การคำนวณได้เปรียบเทียบการเชื่อมต่อส่วนของโลหะในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเข้าด้วยกัน และในกรณีที่ติดตั้งระบบ SCCNS พบว่าการติดตั้งตาข่ายรวบรวมกระแสรั่วไหลทำให้กระแสรั่วเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่า ทำให้การก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าบีทีเอสใช้การต่อเชื่อมกันของส่วนที่เป็นโลหะของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลงดินเท่า่นั้นโดยไม่มีการใช้ตาข่ายรวบรวมกระแสรั่วไหลและไดโอดแต่อย่างใด จากการศึกษาครั้งนี้ SIEMENS ได้ให้ข้อสังเกตเพิ่มเติมว่าไม่แนะนำให้ใช้ drainage diode เพื่อวัตถุประสงค์ในการป้องกันกระแสรั่ว

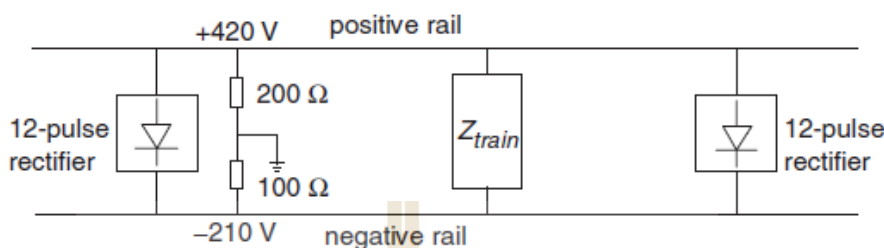


รูปที่ 2.15 ระบบ SCCN ที่ใช้ drainage diode

5) fourth rail system: FRS

ระบบ FRS เป็นการนำตัวนำที่สี่ (The 4th rail) มาใช้งาน เริ่มต้นจากในช่วง ค.ศ. 1903 – 1907 มีความกังวลถึงการกัดกร่อนของท่อโลหะที่ฝังในดินของมหานครใหญ่ในสมัยนั้น ไม่ว่าจะเป็นท่อน้ำประปาหรือท่อแก๊ส เพื่อป้องกันการกัดกร่อนดังกล่าวรางที่สี่จึงได้รับการออกแบบใช้งานจนถึงปัจจุบัน ลอนดอนและมิลาน คือ ตัวอย่างของมหานครที่นำระบบรางที่สี่มาใช้ ในกรณีของระบบรถไฟฟ้าใต้ดินลอนดอน (London Underground Ltd.: LUL) การจ่ายไฟจะใช้แรงดัน 630 V pole-to-pole จ่ายเข้าที่ขั้วระหว่างบัสบาร์บวกและบัสบาร์ลบ มีการต่อลงดินผ่านระบบตัวต้านทานแบ่ง

แรงดันในอัตราส่วน 2:1 ทำให้แรงดันพิกัดที่บัสบาร์บวกและลบมีค่าเป็น +420 V และ -210 V ตามลำดับ วางสถานีเรียงกระแสที่ระยะห่างประมาณ 3 – 5 กิโลเมตร โดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างของระบบตัวนำกระแสย้อนกลับที่ใช้รางที่สี่



รูปที่ 2.16 ระบบจ่ายไฟผ่านรางที่สี่ของ LUL

การต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงควรเป็นไปตาม EN 50122 ซึ่งมีรูปแบบการออกแบบการติดตั้งไฟฟ้ากระแสตรงที่เกี่ยวข้องกับวงจรย้อนกลับและการต่อลงดิน โดยหลักการของรถไฟฟ้ากระแสตรงระบบต่อลงดินของวงจรย้อนกลับจะแยกจากกันโดยสมบูรณ์ การประยุกต์ใช้งานในภาคปฏิบัติอาจจะแตกต่างเนื่องจากการติดตั้งตัวนำป้อนย้อนกลับที่เพิ่มเข้ามาจนนำไปกับรางโครงข่ายเก็บรวบรวมกระแสหรือการออกแบบที่แตกต่างกันของระบบการต่อลงดิน

2.6 สรุป

จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งที่เคยและไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา ประเมินผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้ทราบถึงแนวทางการพัฒนาการวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง มาตรฐาน EN 50122 ข้อกำหนด ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว การติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบเพื่อลดศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว และวงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีวิธีการลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นวิธีระบบต่ายรวบรวมกระแสไหล ระบบการตรวจสอบ วัดกระแสรั่ว และระบบควบคุม-ป้องกัน ซึ่งทางผู้แต่งเลือกใช้วิธีการประยุกต์กับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ คือ ระบบควบคุม-ป้องกัน ด้วยวิธีการขนานตัวนำกับรางวิ่งและวิธีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมที่เรียกว่าระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ เป็นวิธีที่ช่วยลดระยะทางสำหรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วได้ ส่งผลให้ลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามวัตถุประสงค์ที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยได้กล่าวถึงอย่างละเอียดเฉพาะส่วนที่นำมาใช้ศึกษาต่อหรือส่วนที่ถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อ ๆ ไป

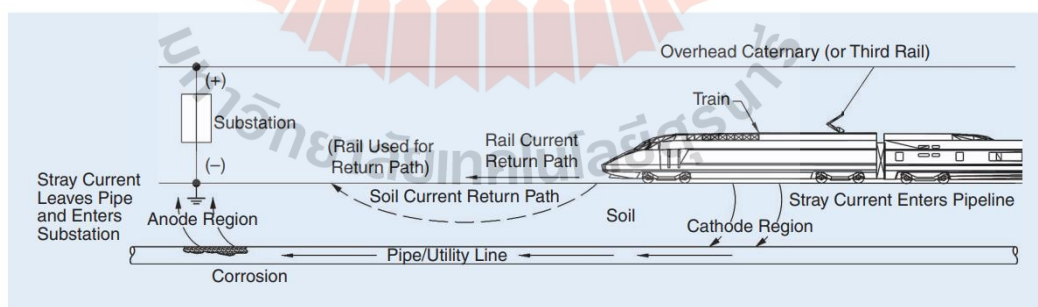
บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ปัญหาการกัดกร่อนเป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับรถไฟกระแสตรง เนื่องจากกระแสไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟจะไหลกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนผ่านรางวิ่ง ส่วนหนึ่งของกระแสย้อนกลับจะไหลลงสู่พื้นดินไปยังโครงสร้างเสริมแรง โครงสร้างของเสากระดุมหรืออุโมงค์ในบริเวณใกล้เคียงกับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ในกระแสย้อนกลับในส่วนนี้ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกัดกร่อนของโลหะ ส่งผลต่อการลดอายุการใช้งานของรางวิ่งและอุปกรณ์ของระบบการต่อลงดิน อีกทั้งก่อให้เกิดปัญหาด้านศักย์ไฟฟ้าที่รางซึ่งเป็นอันตรายในเรื่องความปลอดภัยของผู้โดยสาร ดังนั้นจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางวิ่งและกระแสไฟฟ้ารั่วเพื่อสร้างความปลอดภัยให้กับบุคคลและโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นโลหะผ่านทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ถูกกล่าวอ้างในบทนี้

3.2 กระแสรั่วกัดกร่อน



รูปที่ 3.1 เส้นทางการกัดกร่อนสำหรับระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มาภาพ : (Memon and Fromme., 2014)

ในระบบขนส่งมวลชนกระแสตรงผ่านตัวนำต่าง ๆ ที่วิ่งตามเส้นทางของระบบขนส่งมวลชนตามหลักการแล้วกระแสย้อนกลับควรกลับไปสู่สถานีย่อยผ่านรางวิ่ง อย่างไรก็ตามเนื่องจากไม่มีฉนวนที่สมบูรณ์แบบและเพราะรางมีความต้านทานจำกัด เพอร์เซ็นต์ของกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับที่รั่วลงสู่

พื้นโลก และใช้เส้นทางที่มีความต้านทานน้อยที่สุดระหว่างทางไปยังสถานีย่อย เส้นทางที่มีความต้านทานน้อยที่สุดที่กระแสไฟฟ้าย้อนกลับนี้อาจรวมถึงอุปกรณ์โลหะ การเสริมแรงในโครงสร้างโลหะอื่นๆ และดิน กระแสไฟฟ้านี้ที่รั่วและพบเส้นทางที่มีความต้านทานน้อยที่สุดเรียกว่า กระแสไฟฟ้ารั่ว และการกักร่อนที่เกิดขึ้นระหว่างทางไปยังสถานีย่อยเรียกว่าการกักร่อนของกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้ารั่วนั้นตรวจจับได้ยากเพราะไม่ปกติ เนื่องจากรางมีการจราจรแบบไดนามิก ดังนั้น วิธีการทั่วไป คือ การบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าในท่อพื้นที่ที่น่าสงสัยเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง รูปที่ 3.1 แสดงเส้นทางของกระแสไฟฟ้าย้อนกลับในระบบขนส่งกระแสตรง เป็นแบบจำลองวงจรอย่างง่ายแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบพื้นฐานที่มีผลต่อระดับของกระแสไฟฟ้ารั่วที่เกิดจากระบบไฟฟ้าแรงฉุดลากกระแสตรง การกักร่อนมักถูกกำหนดเป็นการเสื่อมสภาพของวัสดุที่เรียกกันทั่วไปว่าชั้นสนิม เพราะว่าปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็น อากาศ น้ำ หรือดิน ในเงื่อนไขทั่วไป กระบวนการกักร่อนเป็นสารเคมีธรรมชาติปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับสิ่งรอบข้างซึ่งโลหะถูกออกซิไดซ์ (สูญเสียอิเล็กตรอน) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถึงคุณสมบัติของโลหะ แนวโน้มการกักร่อนจะแตกต่างกันไปตามโลหะต่าง ๆ และขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมโดยรอบ

กระบวนการกักร่อนต้องใช้องค์ประกอบ 4 อย่าง ได้แก่ อิเล็กโทรไลต์ แอโนด แคโทด และเส้นทางนำไฟฟ้า การเกิดออกซิเดชัน (การสูญเสียอิเล็กตรอน) เกิดขึ้นที่ขั้วบวก เกิดเป็นไอออนในขณะทีลดลง (ได้รับอิเล็กตรอนหรือลดลงในสถานะออกซิเดชัน) เกิดขึ้นที่แคโทดซึ่งทำให้แอโนดละลายในขณะที่แคโทดยังคงไม่บุบสลาย อิเล็กโทรไลต์ถูกกำหนดให้เป็นสารละลายของกรด เบส หรือเกลือที่มีไอออนอิสระผ่านซึ่งกระแสไฟฟ้าไหล ในกรณีของอิเล็กโทรไลต์ของโครงสร้างใต้ดิน ความชื้นในดินพร้อมกับกรดที่ละลาย เกลือ และด่างทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ในขณะที่ที่อยู่ที่ดีโลหะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด

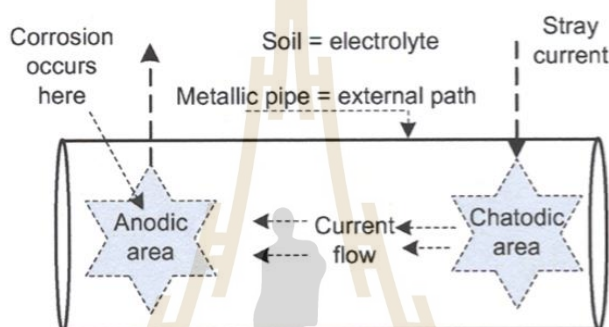
3.2.1 การเกิดกระแสรั่ว

ในกรณีส่วนใหญ่ความต้านทานของรางต่อพื้นดิน (track-to-earth) นั้นเป็นส่วนหนึ่งของกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับที่จะไหลผ่านพื้นดิน จึงทำให้ดินทำหน้าที่เหมือนอิเล็กโทรไลต์ เมื่อโลหะที่สัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ ไม่ว่าจะเป็นดินที่มีความชื้น จะแสดงปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งปกติจะอยู่ในภาวะสมดุล และกระแสไฟฟ้านำไปสู่การรบกวนของภาวะสมดุลนี้ กล่าวคือกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากรางสู่พื้นดินก่อให้เกิดการกักร่อนทางไฟฟ้าเคมี ในกรณีนี้ใช้โลหะที่เป็นเหล็ก ดังนั้นปฏิกิริยาทางเคมีและปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ทำให้กระบวนการที่เกิดขึ้น เกิดขึ้น 2 กระบวนการพร้อมกัน ดังรูปที่ 3.2 และสมการที่ (3.1), (3.2) ตามลำดับ

1. เกิดปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction) หรือ ออกซิเดชัน (oxidation) คือ ปฏิกิริยาการให้อิเล็กตรอน



2. เกิดปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic Reaction) หรือ รีดักชัน (reduction) คือ ปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอน



รูปที่ 3.2 กระบวนการกัดกร่อนของกระแสไฟฟ้ารั่ว

ที่มาภาพ : (Niasati and Gholami., 2009)

เมื่อกระแสรั่วทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น การกัดกร่อนแบบนี้เป็นไปตามกฎข้อที่หนึ่งของ ฟาราเดย์ ที่ว่า การกัดกร่อนจะเป็นไปตามปริมาณกระแสที่ไหล โดยกระแส 1 A ในเวลา 1 ปี สามารถกัดกร่อนเหล็ก 9.1 กิโลกรัม, ตะกั่ว 33.4 กิโลกรัม หรือทองแดง 10.4 กิโลกรัมได้ และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับความเสียหายของกระแสรั่วในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่าในความถี่ 60 Hz โลหะที่เป็นเหล็กทำให้เกิดความเสียหายน้อยกว่า 1% เมื่อเทียบกับปริมาณกระแสรั่วไหลที่เท่ากัน (Friedrich et al., 2009)

3.2.2 ผลกระทบกระแสรั่ว

ผลกระทบของกระแสรั่ว ส่งผลกระทบหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านความเสียหายของ อุปกรณ์หรือโครงสร้าง และด้านความปลอดภัยของบุคคล

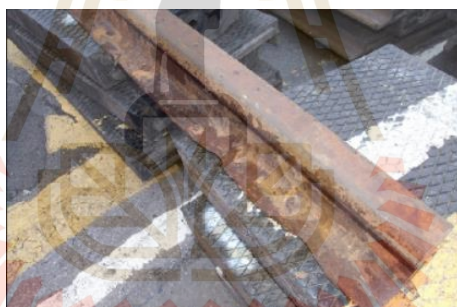
(1) ความเสียหายการกัดกร่อนของกระแสรั่ว

ความเสียหายนี้สามารถมองเห็นได้เมื่อเวลาผ่านไป โดยทั่วไปแล้วกระแสรั่วสามารถกัดกร่อนได้หลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นสายโทรศัพท์ สายไฟ หรือท่อส่งแก๊สทั้งหมด และที่สำคัญสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง นั่นคือการกัดกร่อนโครงสร้างเสริมแรง โครงสร้างของเสาทาง

ยกระดืบ โครงสร้างอื่นของรถไฟ และส่วนประกอบที่มีการสัมผัสกับดินที่เป็นโลหะ เช่น สายเคเบิล ท่อลำเลียง เป็นต้น ดังรูปที่ 3.3 แสดงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับท่อโลหะที่อยู่ใต้ดินและรูปที่ 3.4 แสดงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟ และรูปที่ 3.5 การเกิดสนิมในบริเวณเอวรางและฐานราง



รูปที่ 3.3 แสดงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับท่อโลหะที่อยู่ใต้ดิน
ที่มาภาพ : (Niasati and Gholami., 2009)



รูปที่ 3.4 แสดงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟ
ที่มาภาพ : (Chuchit., 2018)

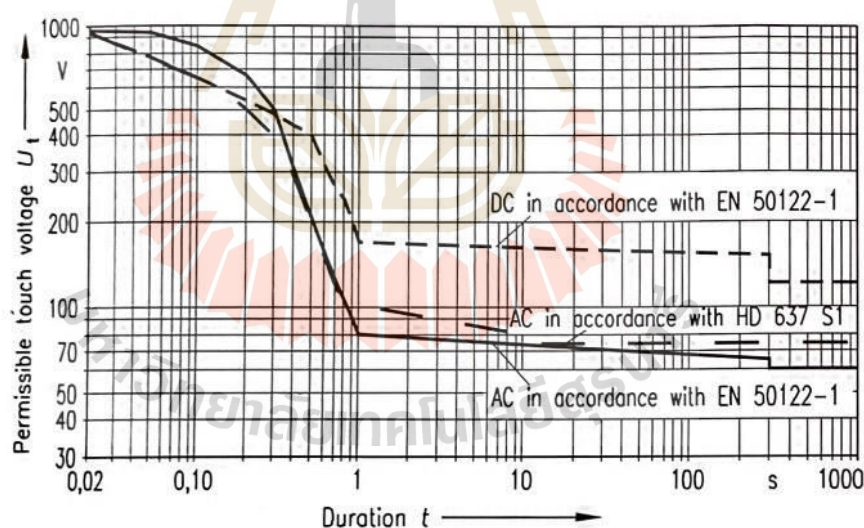


รูปที่ 3.5 การเกิดสนิมในบริเวณเอวรางและฐานราง
ที่มาภาพ : (D. Paul., 2016)

(2) ความปลอดภัยของบุคคล

ความปลอดภัยทางไฟฟ้าไม่ได้ถูกกำหนดขึ้นเฉพาะการป้องกันอุปกรณ์หรือบริเวณที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบไฟฟ้าเท่านั้น ด้านความปลอดภัยด้านบุคคลของประชาชนที่มาใช้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่อาจจะส่งผลกระทบต่อความเสี่ยงของการได้รับอันตรายจากแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch voltage) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ยอมให้ผ่านได้ที่ระบุไว้ในมาตรฐาน EN 50122-1 และ HD 637 S1 สำหรับอันตรายจากไฟฟ้าช็อตต่อมนุษย์นั้นขึ้นอยู่กับ การตรวจวัด การตรวจสอบความต้านทานของร่างกายอย่างละเอียดและผลกระทบของกระแสที่มีผลต่อร่างกาย (IEC 60 479-1) ซึ่งมีค่ามาตรฐานที่ระบุไว้แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.1

เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า และผู้โดยสารทุกคนไม่ได้ทราบถึงความรู้ด้านไฟฟ้า การป้องกันอันตรายทางไฟฟ้าด้านความปลอดภัยของบุคคลจึงต้องได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษ ดังนั้นวิธีที่ง่ายที่สุด คือ ต้องมีระยะห่างขั้นต่ำระหว่างตำแหน่งของผู้โดยสารกับตัวนำที่ใกล้ที่สุดของระบบรถไฟฟ้า กรณีหากไม่สามารถเว้นระยะห่างได้ สามารถมีเพิ่มอุปกรณ์เสริมได้ ไม่ว่าจะเป็นเส้นรั้ว ประตูหรือฉากกั้น เป็นต้น (กุลรวานิชพงษ์., 2557)



รูปที่ 3.6 แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ U_t ตามมาตรฐาน EN 50122-1 และมาตรฐาน HD 637 S1

ที่มาภาพ : (Friedrich et al., 2009)

ตารางที่ 3.1 แรงดันที่ยอมให้ผ่านได้ 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
ค่าถาวร (permanent)	60	30

3.3 การประเมินกระแสไฟฟ้ารั่ว

ตามมาตรฐาน EN 50122-2 ปริมาณกระแสรั่วที่กำหนดเป็นค่าอ้างอิงสำหรับรถไฟฟ้าควรมีค่าไม่เกิน 2.5 mA/m/track (EN50122-1, 2011), (EN50122-2, 2010) แต่ปัญหาที่พบ คือ การวัดกระแสรั่วจากทางวิ่งเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ทำได้เพียงวัดผลที่เกิดจากกระแสรั่วเท่านั้น ซึ่งจะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทางวิ่งนั่นเอง ตามมาตรฐาน EN 50122-2 สามารถคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางได้ จะขึ้นอยู่กับค่าต่าง ๆ ดังสมการที่ (3.3), (3.4) และ (3.5) ตามลำดับ

$$U_{RE} = 0.5 \times I_{tr} \times R_c \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_c}\right)} \right) \quad (3.3)$$

$$R_c = \sqrt{\frac{R'_R}{G'_{RE}}} \quad (3.4)$$

$$L_C = \frac{1}{\sqrt{R'_R \times G'_{RE}}} \quad (3.5)$$

โดย	U_{RE}	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง (V)
	G'_{RE}	คือ ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางกับดิน (S/km)
	I_{ir}	คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าวงจรไหลกลับของส่วนที่พิจารณาสนใจในช่วงที่มีโหลดสูงสุด (A)
	L	คือ ค่าความยาวที่สนใจพิจารณาของเส้นทาง (km)
	R'_R	คือ ค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาว (Ω/km)

การใช้ศักย์ไฟฟ้าที่รางและค่าความนำของรางวิ่งเทียบกับดินเพื่อคำนวณหาค่ากระแสรั่วต่อหน่วยความยาวสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.6) เมื่อ I'_S คือ กระแสไฟฟ้ารั่วไหลที่จากรางวิ่งเมื่อเทียบกับความยาว

$$I'_S = U_{RE} \times G'_{RE} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.3) และ (3.6) สามารถคำนวณใหม่ได้ดังสมการที่ (3.7)

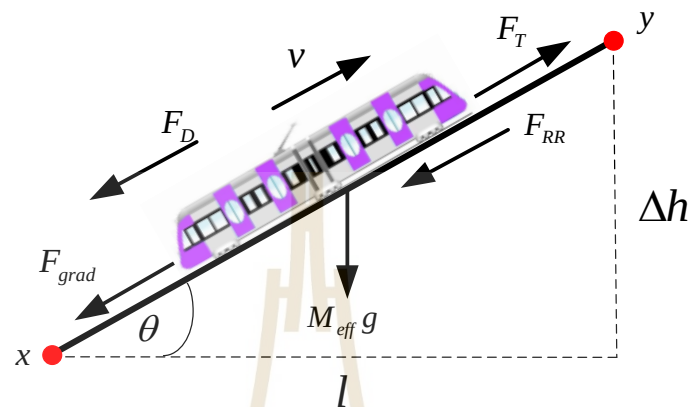
$$I'_S = 0.5 \times \frac{R_C}{L_C} \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_C}\right)} \right) \quad (3.7)$$

สำหรับการประเมินกระแสรั่วมีความจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ของความต้านทานของรางวิ่ง และค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับดินเป็นสำคัญเพื่อใช้ในการประมาณค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง กระแสรั่วลงดินและค่าแรงดันตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรง สำหรับการทดสอบแบบระบบเปิด สมมุติฐานว่ามีค่าอนันต์ตามความยาวของอุโมงค์ในแต่ละส่วนที่สนใจพิจารณา นอกจากนี้จะไม่ลดผลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถไฟที่อยู่ติดกันและค่าความนำต่อหน่วยความยาวของโครงสร้างอุโมงค์กับดิน ค่าจากการคำนวณอาจมีค่าสูงมากกว่าความเป็นจริงได้

3.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าปัจจัยสำคัญ คือ ตำแหน่ง ความเร็ว และอัตราเร่งในระหว่างการเคลื่อนที่เชิงเส้นของรถไฟฟ้าขบวนเดียว การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจะถูกต้านด้วยปัจจัยอื่น ๆ เช่น แรง

ด้านของราง ความลาดชันของราง แรงโน้มถ่วง และแรงต้านทางอากาศ เป็นต้น ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้จะอยู่ภายใต้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) (กุลวรรานิชพงษ์, 2558) (Steimel A., 2008) เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.7 แสดงรถไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่บนพื้นผิวรางที่ลาดเอียง สมการที่ใช้อธิบายของแรงกระทำทั้งหมดที่กระทำต่อรถไฟฟ้าดังสมการที่ (3.8)



รูปที่ 3.7 การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าบนรางลาดเอียง

$$\begin{aligned}
 F_T - F_R - F_G &= M_{eff} a = (M_t(1 + \lambda_w) + M_l) a \\
 F_R &= F_{RR} + F_D \\
 F_G &= M_{eff} g \sin \theta
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

- โดย F_T คือ แรงชุดของหัวรถจักร (N)
- F_R คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า (N)
- F_G คือ แรงต้านทานเกรเดียนต์ (N)
- F_D คือ แรงต้านอากาศ (N)
- g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, 9.8 m/s^2
- θ คือ องศาเอียงเทียบกับเส้นในระนาบ
- a คือ อัตราเร่ง (m/s^2)
- M_t คือ น้ำหนักรถเปล่า (kg)
- λ_w คือ ตัวประกอบน้ำหนักผู้โดยสาร
- M_l คือ น้ำหนักของผู้โดยสาร (kg)

1) แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟ

นอกเหนือจากแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟ แรงต้านทานเกรเดียนต์ และแรงต้านอากาศที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว แรงต้านทั้งหมดสามารถกำหนดได้โดยสมการเดวี (Davis's equation) ดังสมการที่ (3.9)

$$F_R = A + Bv + Cv^2 \quad (3.9)$$

โดย F_R คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ (N)
 v คือ ความเร็วของรถไฟ (km/h)
 A, B, C คือ สัมประสิทธิ์เดวี (kN, kNh/km, kNh²/km²)

ผู้ผลิตรถไฟต่าง ๆ ทั่วโลกได้มีการพัฒนาสมการเดวีเพื่อนำมาใช้คำนวณแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมกับการให้บริการเดินรถของประเทศนั้น ๆ ดังสมการที่ (3.10) นำเสนอสมการเดวีของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ตามมาตรฐาน JIS E 6002 (มาตรฐานทางอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น)

$$F_R = (1.65 + 0.0247v)W_m + (0.78 + 0.0028v)W_t + \{0.78 + 0.0078(n-1)\}v^2 \quad (3.10)$$

โดย F_R คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถ (kgf)
 v คือ ความเร็วของรถไฟ (km/h)
 W_m คือ น้ำหนักทั้งหมดของตู้มอเตอร์ในรถไฟ (ton)
 W_t คือ น้ำหนักทั้งหมดของตู้รถไฟ (ton)
 n คือ จำนวนตู้ในขบวนรถไฟ

2) แรงต้านทานเกรเดียนต์

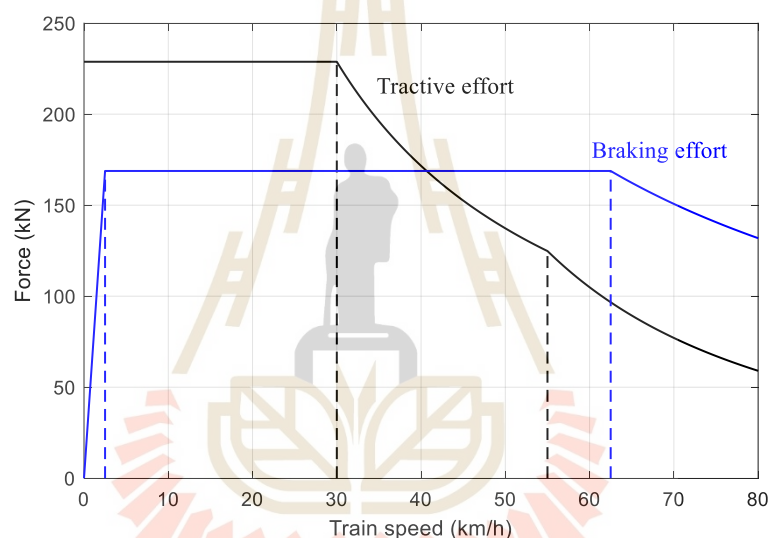
โดยทั่วไประดับความชันหรือเกรเดียนต์ของเส้นทางเดินรถไฟจะมีน้อย และมีการเปลี่ยนแปลงระดับความชันบ่อย ดังรูปที่ 3.7 แรงต้านทานเกรเดียนต์หรือแรงที่เกิดจากความลาดเอียงของการเคลื่อนที่ สามารถหาได้ดังสมการที่ (3.11)

$$F_G = M_{eff} a \sin \theta = \frac{M_{eff} g \Delta h}{l} \quad (3.11)$$

โดย F_G คือ แรงเกรเดียนต์ (N)
 Δh คือ ระยะในแนวดิ่ง (m)
 l คือ ระยะในแนวระนาบ (m)

3) แรงฉุดและแรงเบรกของขบวนรถไฟฟ้า

แรงฉุดขบวนรถไฟฟ้าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยโดยเฉพาะน้ำหนักและความเร็วของรถไฟฟ้า ผู้ผลิตรถไฟฟ้าจะทำการทดสอบและนำเสนอในรูปของแรงฉุดขบวนรถไฟฟ้าเทียบกับความเร็วของรถไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.8 แสดงกราฟลักษณะสมบัติแรงฉุดและแรงเบรกของโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง (เหนือ)

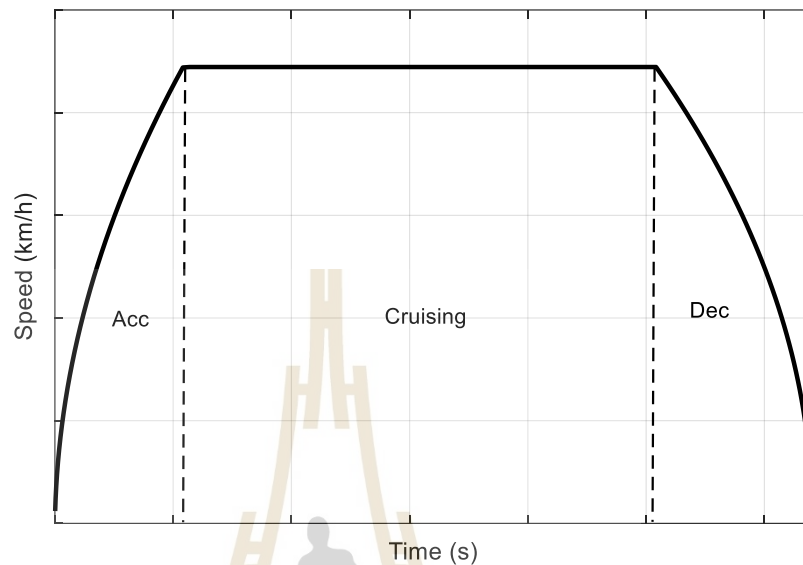


รูปที่ 3.8 กราฟลักษณะสมบัติแรงฉุดและแรงเบรกของรถไฟฟ้าสายสีม่วง (เหนือ)

4) การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเพื่อรับส่งผู้โดยสารระหว่างสถานีผู้โดยสารนั้น จะมีรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้โหมดการทำงาน 5 โหมด ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว (Acceleration mode) ทำหน้าที่เริ่มต้นในการคำนวณและใช้สำหรับการควบคุมความเร็วขณะรถเคลื่อนที่ โดยมีการควบคุมความเร็วในโหมดนี้แบ่งเป็น 2 เงื่อนไข คือ เมื่อความเร็วต่ำกว่าความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ให้รถไฟฟ้าเข้าสู่โหมดเร่งความเร็ว แต่ถ้าความเร็วสูงกว่าความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ให้รถไฟฟ้าเข้าสู่โหมดควบคุมความเร็วคงที่ (Cruising mode) โหมดแล่นด้วยแรงเฉื่อยของรถไฟฟ้า (Coasting mode) โหมดการเบรก (Deceleration mode) ทำหน้าที่ลดความเร็วของรถไฟฟ้าเพื่อเข้าจอดที่สถานี และโหมดหยุดที่สถานี ทำหน้าที่นับเวลาหยุดที่สถานีให้ครบตาม dwell time โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาเพียง

3 โหมดการทำงานเท่านั้น ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว โหมดความเร็วคงที่ และโหมดการเบรก ดังรูปที่ 3.9 แสดงโหมดการทำงานของรถไฟฟ้ากระแสดตรง



รูปที่ 3.9 โหมดการทำงานของรถไฟฟ้ากระแสดตรง

5) การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่

โดยพื้นฐานแล้ว ระยะทางและความเร็วของรถไฟฟ้าในเวลาชั่วขณะนั้นจะต้องมีการวนซ้ำในรอบถัดไปของโปรแกรมการจำลองผล ดังสมการที่ (3.12)

$$\begin{aligned} v_{i+1} &= v_i + a\Delta t \\ s_{i+1} &= s_i + v_i\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

โดย v_{t+1}, v_t คือ ความเร็วของรถไฟฟ้าหลังและก่อนปรับปรุง (m/s)

s_{t+1}, s_t คือ ตำแหน่งของรถไฟฟ้าหลังและก่อนปรับปรุง (m/s)

Δt คือ time step (s)

a คือ อัตราเร่ง (m/s²)

6) กำลังไฟฟ้าของรถไฟ

กำลังไฟฟ้าจริงที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าเสริมที่เกิดจาก

ระบบแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับแรงฉุดของรถไฟฟ้า ความเร็วรถไฟฟ้า และประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังสมการที่ (3.13)

$$P_{tr} = \frac{TEv_{t+1}}{\eta} + P_{aux} \quad (3.13)$$

โดย	TE	คือ แรงฉุดของรถไฟฟ้า	(N)
	v_{t+1}	คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า	(m/s)
	η	คือ ประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า	
	P_{aux}	คือ กำลังไฟฟ้าเสริม	(W)

3.5 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง

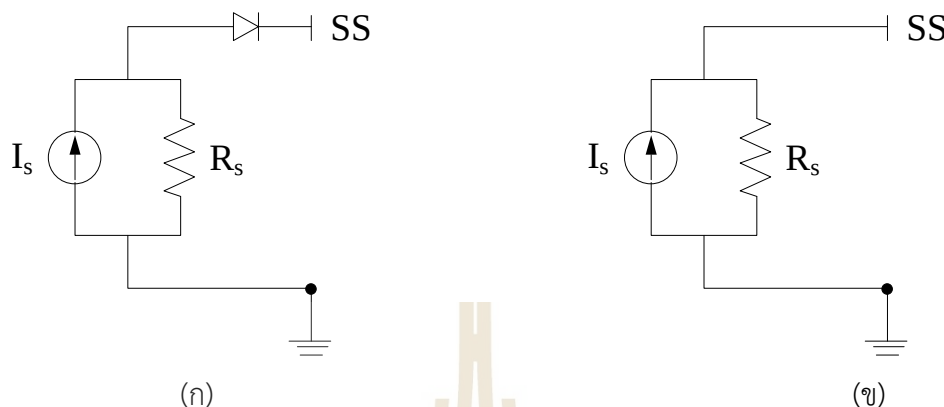
วิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า (Current Injection Method: CIM) ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง ใช้หลักการคำนวณด้วยวิธีโนดจากสมการที่ได้จากการใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ ดังสมการที่ (3.14) หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ เมื่อใช้วิธีการคำนวณรอบ จะได้สมการที่ (3.15) อยู่ในสมการเมตริกซ์ $[G][V]=[I]$

$$\sum_{i=1}^N G_{k,i} V_i = I_{SS,k} - \frac{P_{T,k}}{V_k} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} & \cdots & G_{1,N} \\ G_{2,1} & G_{2,2} & \cdots & G_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N,1} & G_{N,2} & \cdots & G_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{SS,1} - \frac{P_{T,1}}{V_1} \\ I_{SS,2} - \frac{P_{T,2}}{V_2} \\ \vdots \\ I_{SS,N} - \frac{P_{T,N}}{V_N} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

1) สถานีจ่ายไฟฟ้า สามารถคำนวณการไหลได้ 2 รูปแบบ คือ สถานีจ่ายไฟฟ้าวงจรเรียงกระแส (Rectifier substation) ไหลได้ทางเดียวและสถานีจ่ายไฟฟ้าแบบสองทิศทาง (Inverting

substation) โหลดได้ 2 ทาง ดังรูปที่ 3.10 โดยในแบบจำลองที่นำไปสร้างแบบจำลอง เพื่อวิเคราะห์ ประเมินใช้รูปแบบสถานีจ่ายไฟฟ้าวงจรเรียงกระแส (Rectifier substation) ดังรูปที่ 3.10 (ก)



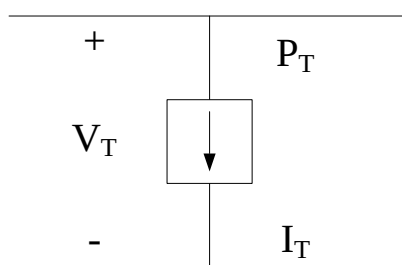
รูปที่ 3.10 รูปแบบสถานีจ่ายไฟฟ้า (ก) Rectifier substation (ข) Inverting substation

2) สายส่งสถานีจ่ายไฟฟ้า ประกอบด้วย ความต้านทานสายส่งต่อหน่วยความยาวและความต้านทานรางต่อหน่วยความยาว ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 สายส่งสถานีจ่ายไฟฟ้า

3) โหลดหรือรถไฟฟ้า (Train Movement) ดังรูปที่ 3.12 โดยที่ V_T คือ แรงดันตกคร่อม รถไฟฟ้า (V) P_T คือ กำลังไฟฟ้าของรถไฟ (W) และ I_T คือ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวรถไฟ (A)



รูปที่ 3.12 โหลดหรือรถไฟฟ้า

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง โดยวิธี Interactive method เริ่มจากการกำหนดจุด (Fixed point Interaction) ดังสมการที่ (3.16)

$$V_T^{(0)} \Rightarrow I_T^{(0)} = \frac{P_T}{V_T^{(0)}}, V_T^{(0)} \neq 0 \quad (3.16)$$

กำหนดให้ $V_T^{(1)}$ และ $\varepsilon \geq \varepsilon_{\max}$ จะได้สมการที่ (3.17) และ (3.18) ตามลำดับ สามารถแก้สมการโดยใช้วิธีโนด (Node) โดยการสร้างบัสต่าง ๆ

$$\varepsilon = |V_T^{(1)} - V_T^{(2)}| \quad (3.17)$$

$$V_T^{(1)} \Rightarrow I_T^{(1)} = \frac{P_T}{V_T^{(1)}} \quad (3.18)$$

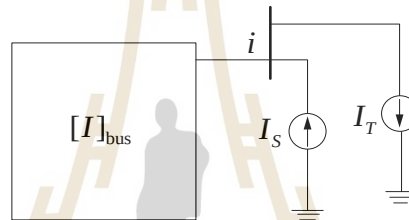
จากสมการเมตริกซ์ $[G][V]=[I]$ สามารถสร้าง $[G]_{bus}$ กรณีต่อกับโนด ดังสมการที่ (3.19) และกรณีต่อลงดิน ดังสมการที่ (3.20) ที่ตำแหน่ง i และ j ดังรูปที่ 3.13 และการสร้าง $[I]_{bus}$ สามารถสร้างได้ดังสมการที่ (3.21) ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 การสร้าง $[G]_{bus}$ (ก) กรณีต่อกับโนด (ข) กรณีต่อลงดิน

$$\begin{aligned}
 G_{ii}^{(new)} &= G_{ii}^{(old)} + \frac{1}{R_x} \\
 G_{jj}^{(new)} &= G_{jj}^{(old)} + \frac{1}{R_x} \\
 G_{ij}^{(new)} &= G_{ij}^{(old)} - \frac{1}{R_x}
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned}
 G_{ji}^{(new)} &= G_{ij}^{(new)} = G_{ji}^{(old)} - \frac{1}{R_x} \\
 G_{ii}^{(new)} &= G_{ii}^{(old)} + \frac{1}{R_x}
 \end{aligned} \tag{3.20}$$



รูปที่ 3.14 การสร้าง $[I]_{bus}$

$$I_i^{(new)} = I_i^{(old)} + I_S - I_T \tag{3.21}$$

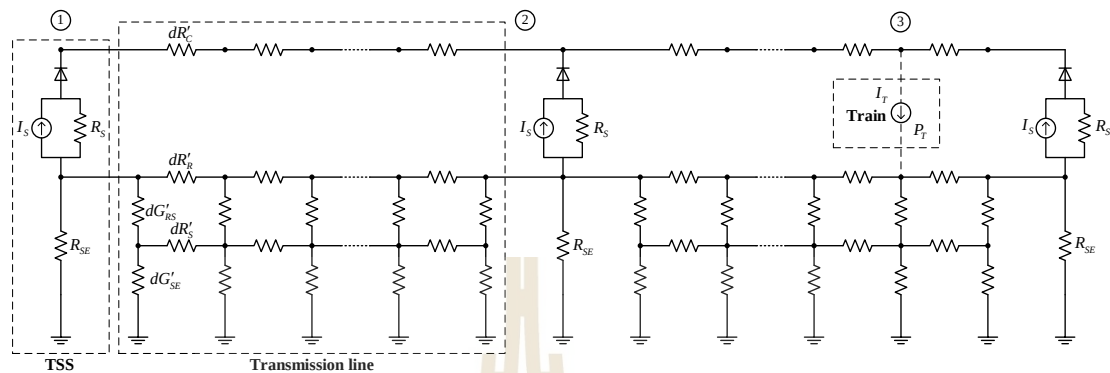
3.6 แบบจำลองการติดตั้งระบบเพื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟในระบบปกติ และแบบจำลองการติดตั้งระบบเพื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว โดยใช้ระบบการติดตั้ง 2 ประเภท คือ แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ และแบบจำลองการติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

3.6.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟในระบบปกติ

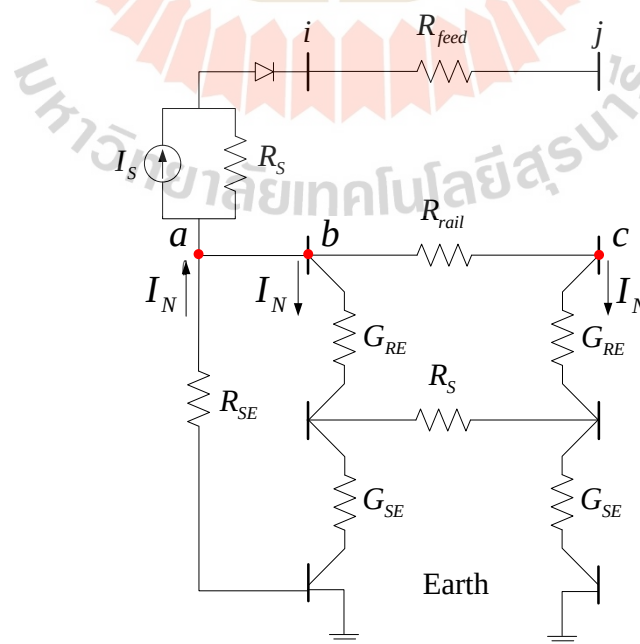
แบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟในระบบปกติ กล่าวคือระบบการเคลื่อนที่ของรถไฟแบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริม โดยใช้แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น (Two-layer grounding model: TGM) สำหรับแบบจำลองพื้นฐานของการเคลื่อนที่รถไฟในระบบปกติ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อยู่บนพื้นฐานตามมาตรฐาน EN 50122-2 เป็นแบบจำลองที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับการพิจารณาศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินโดยการพิจารณาโครงสร้างทางยกระดับได้ดังรูปที่

3.15 ซึ่งประกอบไปด้วยรางวิ่งจะแสดงด้วยการใช้ตัวต้านทานของราง ความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวรางวิ่งไปยังดิน



รูปที่ 3.15 แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น สำหรับแบบจำลองพื้นฐานของการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติ

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าระบบตัวนำไฟฟ้าสามระดับต่อหนึ่งบัสเป็นระบบที่ใช้กับแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นในแบบจำลองพื้นฐานของการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติสามารถหาเมตริกซ์ย่อยของความนำไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยเมตริกซ์ย่อยที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและสายส่ง ดังนั้นการหาเมตริกซ์ย่อยของความนำไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นได้ โดยพิจารณาตามรูปที่ 3.16



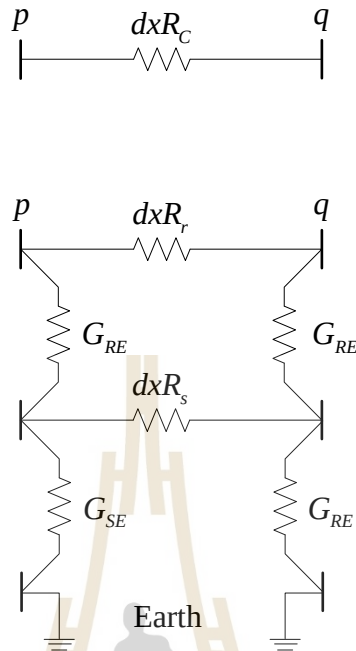
รูปที่ 3.16 แบบจำลองกรณีที่มีสายส่งและรางของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น

จากรูปที่ 3.16 และสมการที่ (3.22) สามารถหาเมตริกซ์ย่อยที่บัสสถานีย่อยแบบ
สามารถดับต่อหนึ่งบัสได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} I_S^{(C)} \\ I_S^{(R)} \\ I_S^{(S)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_S^{(C,C)} & G_S^{(C,R)} & G_S^{(C,S)} \\ G_S^{(R,C)} & G_S^{(R,R)} & G_S^{(R,S)} \\ G_S^{(S,C)} & G_S^{(S,R)} & G_S^{(S,S)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S^{(C)} \\ V_S^{(R)} \\ V_S^{(S)} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

- โดย $I_S^{(C)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกรางที่สามที่บัสสถานีย่อย (A)
 $I_S^{(R)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกรางวิ่งที่บัสสถานีย่อย (A)
 $I_S^{(S)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกโครงสร้างที่บัสสถานีย่อย (A)
 $I_N^{(R)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกรางวิ่งที่โนดใด ๆ ที่บัสสถานีย่อย (A)
 $G_S^{(C,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของรางที่สามที่บัสสถานีย่อย (S)
 $G_S^{(C,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางที่สามและรางวิ่งที่บัสสถานีย่อย (S)
 $G_S^{(C,S)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางที่สามและโครงสร้างที่บัสสถานีย่อย (S)
 $G_S^{(R,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งและรางที่สามที่บัสสถานีย่อย (S)
 $G_S^{(R,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของรางวิ่งที่บัสสถานีย่อย (S)
 $G_S^{(R,S)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งและโครงสร้างที่บัสสถานีย่อย (S)
 $G_S^{(S,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างและรางที่สามที่บัสสถานีย่อย (S)
 $G_S^{(S,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างและรางที่สามที่บัสสถานีย่อย (S)
 $G_S^{(S,S)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของโครงสร้างที่บัสสถานีย่อย (S)

แบบจำลองสายส่งแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น



รูปที่ 3.17 การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบสามระดับ

จากรูปที่ 3.17 การหาเมตริกซ์ย่อยที่สายส่งจะพิจารณาเฉพาะเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากในส่วนของสายส่งไม่มีแหล่งจ่าย ซึ่งการต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบสามระดับ สามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าระหว่างโนด p และ q หา $[G_{pq}]$ และ $[G_{qp}]$ ได้จากสมการ (3.23)

$$[G_{pq}] = [G_{qp}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{dxR_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{dxR_r} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{dxR_s} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

- โดย $G_{pq}^{(C,C)}$ 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)

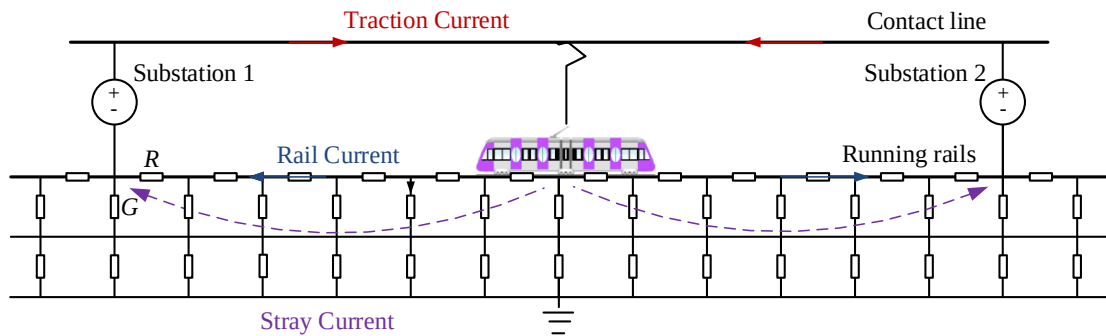
และสามารถหา $[G_{pp}]$ และ $[G_{qq}]$ ได้จากสมการ (3.24)

$$[G_{pp}]_{SE} = [G_{qq}]_{SE} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & dxG'_{RS} & -dxG'_{RS} \\ 0 & -dxG'_{RS} & dxG'_{RS} + dxG'_{SE} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

จากนั้นทำการรวมสมการเมตริกซ์ย่อยเหล่านี้เพื่อสร้างเมตริกซ์ความนำไฟฟ้า และสมการโนดสำหรับระบบ N_{bus} เขียนได้ดังสมการที่ (3.25)

$$\begin{bmatrix} I_1^{(C)} \\ I_1^{(R)} \\ I_1^{(S)} \\ I_2^{(C)} \\ I_2^{(R)} \\ I_2^{(S)} \\ \vdots \\ I_N^{(C)} \\ I_N^{(R)} \\ I_N^{(S)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11}^{(C,C)} & G_{11}^{(C,R)} & G_{11}^{(C,S)} \\ G_{11}^{(R,C)} & G_{11}^{(R,R)} & G_{11}^{(R,S)} \\ G_{11}^{(S,C)} & G_{11}^{(S,R)} & G_{11}^{(S,S)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{12}^{(C,C)} & G_{12}^{(C,R)} & G_{12}^{(C,S)} \\ G_{12}^{(R,C)} & G_{12}^{(R,R)} & G_{12}^{(R,S)} \\ G_{12}^{(S,C)} & G_{12}^{(S,R)} & G_{12}^{(S,S)} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} G_{1N}^{(C,C)} & G_{1N}^{(C,R)} & G_{1N}^{(C,S)} \\ G_{1N}^{(R,C)} & G_{1N}^{(R,R)} & G_{1N}^{(R,S)} \\ G_{1N}^{(S,C)} & G_{1N}^{(S,R)} & G_{1N}^{(S,S)} \end{bmatrix} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} G_{N1}^{(C,C)} & G_{N1}^{(C,R)} & G_{N1}^{(C,S)} \\ G_{N1}^{(R,C)} & G_{N1}^{(R,R)} & G_{N1}^{(R,S)} \\ G_{N1}^{(S,C)} & G_{N1}^{(S,R)} & G_{N1}^{(S,S)} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} G_{NN}^{(C,C)} & G_{NN}^{(C,R)} & G_{NN}^{(C,S)} \\ G_{NN}^{(R,C)} & G_{NN}^{(R,R)} & G_{NN}^{(R,S)} \\ G_{NN}^{(S,C)} & G_{NN}^{(S,R)} & G_{NN}^{(S,S)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{(C)} \\ V_1^{(R)} \\ V_1^{(S)} \\ V_2^{(C)} \\ V_2^{(R)} \\ V_2^{(S)} \\ \vdots \\ V_N^{(C)} \\ V_N^{(R)} \\ V_N^{(S)} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

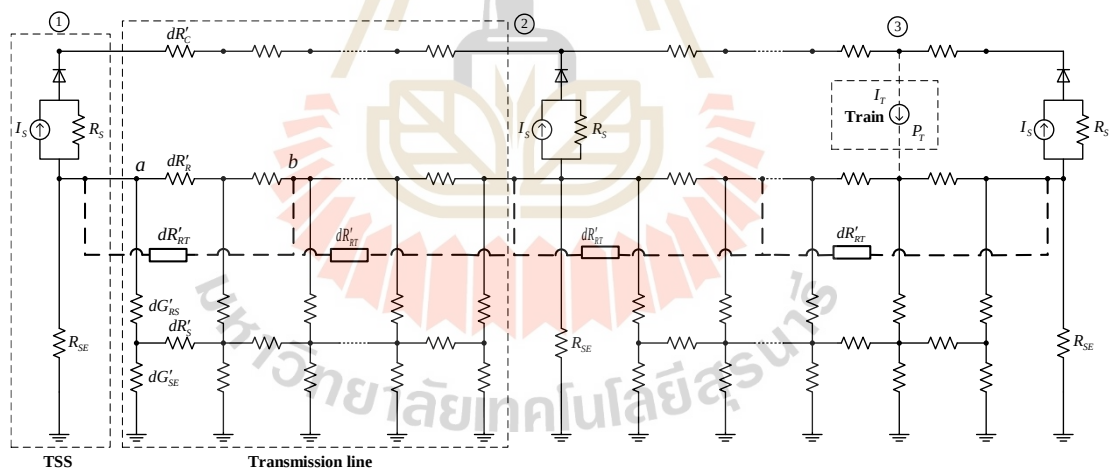
การหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและค่ากระแสไฟฟ้ารั่วของการเคลื่อนที่ของระบบปกติ เมื่อรถไฟเคลื่อนที่จากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 1 (Substation 1) ไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 2 (Substation 2) กระแสไฟฟ้าขับเคลื่อนจะถูกส่งไปยังรถไฟผ่านทาง contact line หรือ รางจ่ายตัวนำที่สาม (3rd rail) ที่ขนานอยู่กับรางวิ่ง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่รถไฟเพื่อจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนของรถไฟ และกระแสไฟฟ้าของรางวิ่งจะไหลไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน และมีกระแสไฟฟ้ารั่วลงสู่พื้นดินกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน ดังรูปที่ 3.18 แสดงการทำงานของระบบ TRA-TPS



รูปที่ 3.18 ระบบ TRA-TPS

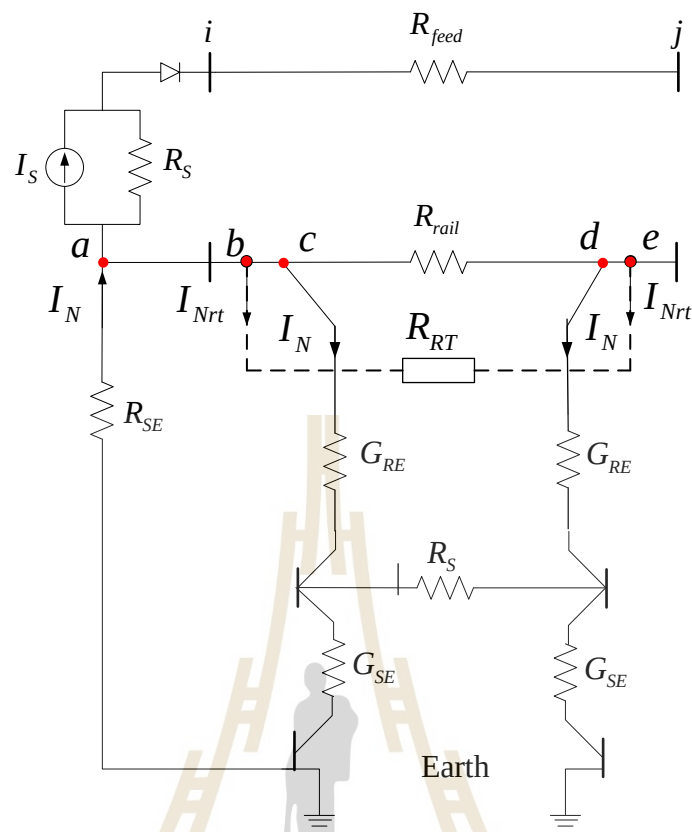
3.6.2 แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ

ในระบบ RET-TPS ตัวนำย้อนกลับถูกติดตั้งเพิ่มเติมจากแบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟาระบบปกติ โดยทั่วไปจะใช้สายเคเบิลขนานกับรางวิ่งและเชื่อมต่อกับรางวิ่งตามระยะทางที่กำหนด โดยไม่มีผลกับในส่วนตัวนำรางวิ่งกับโครงสร้าง (G_{RS}) และตัวนำโครงสร้างกับดิน (G_{SE}) โดยที่ R'_{RT} คือ ตัวต้านทานของสายเคเบิล (Ω/km) ที่ถูกนำมาติดตั้งในระบบตัวนำย้อนกลับนี้ ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ

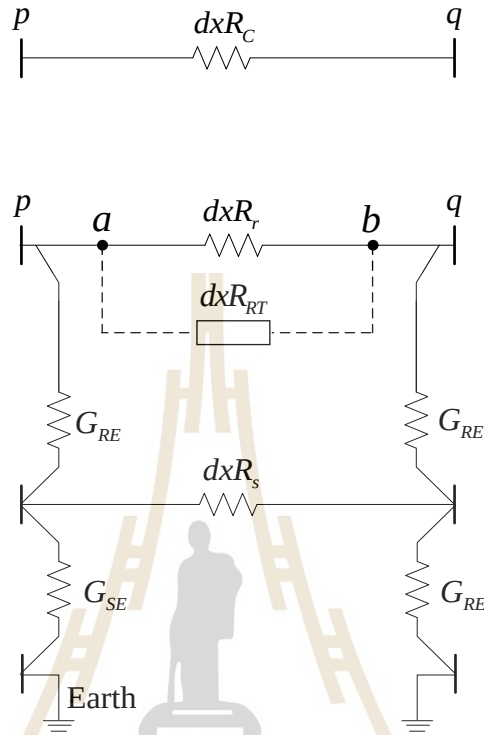
การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของแบบจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับระบบตัวนำไฟฟ้าสามระดับต่อหนึ่งบัสเช่นเดียวกันกับการเคลื่อนที่รถไฟฟาระบบปกติ และมีการเชื่อมต่อเพิ่มเข้าที่รางวิ่ง ดังนั้นการหาเมตริกซ์ย่อยของความนำไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบตัวนำย้อนกลับได้ โดยพิจารณาตามรูปที่ 3.20 แสดงแบบจำลองกรณีที่มีสายส่งและรางของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น เมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อของตัวนำย้อนกลับ



รูปที่ 3.20 แบบจำลองกรณีที่มีสายส่งและรางแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น
เมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อของตัวนำย้อนกลับ

สามารถหาเมตริกซ์ย่อยที่บัสสถานีย่อยแบบสามระดับต่อหนึ่งบัสได้ดังสมการที่ (3.22) ที่กล่าวไว้ข้างต้นได้เหมือนกับแบบจำลองการเคลื่อนที่ระบบปกติ จากรูปที่ 3.21 การหาเมตริกซ์ย่อยที่สายส่งจะพิจารณาเฉพาะเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าเท่านั้น ซึ่งการต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบสามระดับ สามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าระหว่างโนด p และ q หา $[G_{pq}]$ และ $[G_{qp}]$ ได้จากสมการ (3.23) ที่กล่าวไว้ข้างต้นได้ โดยที่ $I_{Nrt}^{(R)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกรางวิ่งที่โนดติดตั้งตัวนำย้อนกลับใด ๆ ที่บัสสถานีย่อย (A)

แบบจำลองสายส่งแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น กรณีเพิ่มจุดเชื่อมต่อของตัวนำ
ย้อนกลับ



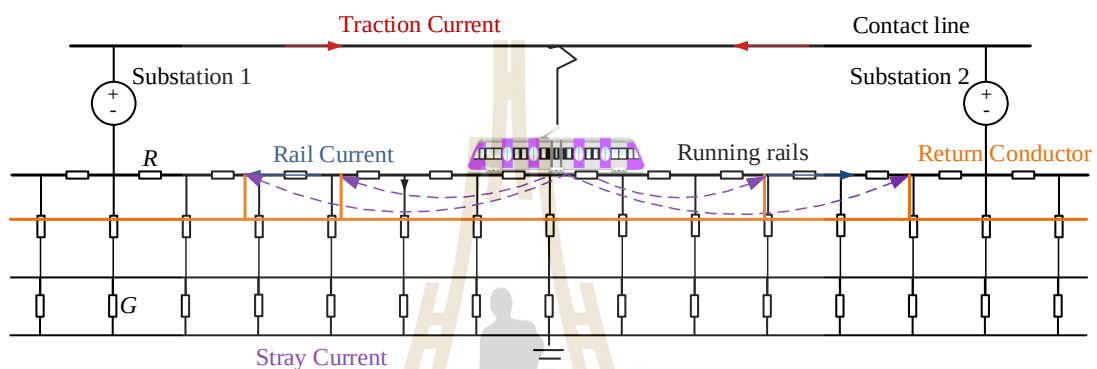
รูปที่ 3.21 การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ

การเพิ่มโนดจุดเชื่อมต่อของสายเคเบิลกับรางวิ่งระหว่างโนด a และ b ใด ๆ สามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าระหว่างโนด a และ b ได้ดังสมการ (3.26) หา $[G_{ab}]$ และ $[G_{ba}]$ ได้จากสมการ (3.26)

$$[G_{ab}] = [G_{ba}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{dxR_{RT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

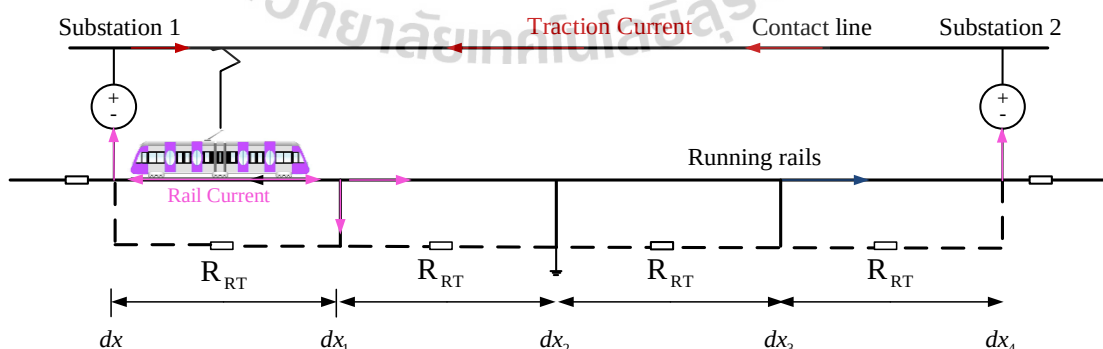
- โดย $G_{ab}^{(C,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของรางที่สามระหว่างโนด a และ b ใด ๆ (S)
 $G_{ab}^{(C,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางที่สามและรางวิ่งระหว่างโนด a และ b ใด ๆ (S)
 $G_{ab}^{(R,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งและรางที่สามระหว่างโนด a และ b ใด ๆ (S)
 $G_{ab}^{(R,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของรางวิ่งระหว่างโนด a และ b ใด ๆ (S)

เมื่อตัวนำย้อนกลับถูกติดตั้งขนานกับรางวิ่งและเชื่อมต่อกับรางวิ่งตามระยะทางที่กำหนด ดังรูปที่ 3.22 กระแสไฟฟ้าที่รางส่วนใหญ่จะไหลกลับไปยังสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านทางตัวนำที่ถูกติดตั้ง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่รางจากรางลงสู่พื้นดินจะลดลง ความนำไฟฟ้าของรางวิ่งระหว่างโนด a และ b ใด ๆ ($G_{ab}^{(R,R)}$) สามารถพิจารณาแยกตามตำแหน่งของรถไฟไฟฟ้าที่อยู่ในจุดเชื่อมต่อนั้น ๆ เนื่องจากเกิดเส้นทางใหม่และค่าความต้านทานระหว่างโนด a และ b ของรางวิ่งจะถูกพิจารณาเป็นระยะของเส้นทางใหม่นั้น

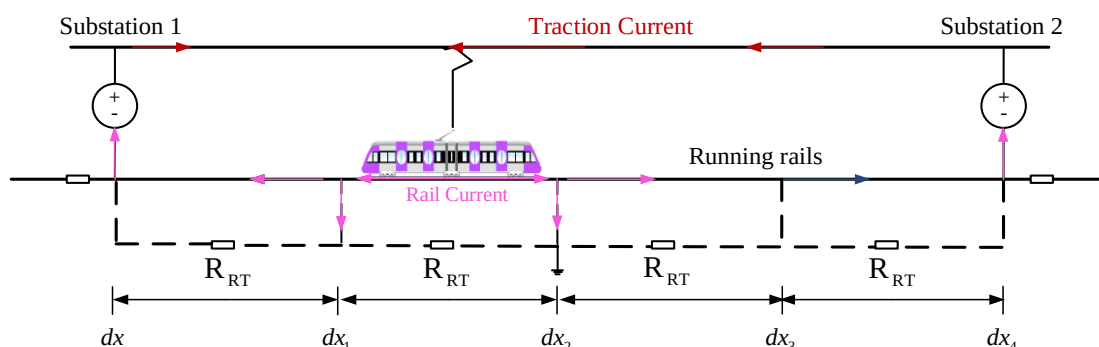


รูปที่ 3.22 ระบบ RET-TPS

เมื่อรถไฟอยู่ที่ตำแหน่งส่วนราง ดังรูปที่ 3.23(ก) และรูปที่ 3.23(ข) จะเห็นได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่รางออกจากรถไฟ และไหลไปที่สถานีย่อยผ่านรางวิ่งด้วยเส้นทางที่มีความต้านทานน้อยที่สุด นั่นคือผ่านตัวต้านทาน R_{RT} ของสายเคเบิลที่เชื่อมต่อขนานกับรางวิ่งที่ใกล้ตำแหน่งรถไฟมากที่สุดด้วยระยะ dx ใด ๆ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.23 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่รางของระบบตัวนำย้อนกลับ

(ก) ตำแหน่งรถไฟที่ระยะ $dx_1 - dx$ (ข) ตำแหน่งรถไฟที่ระยะ $dx_1 - dx_2$

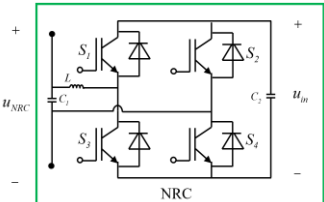
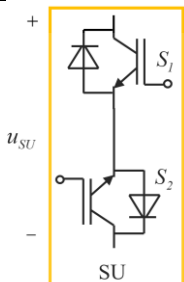
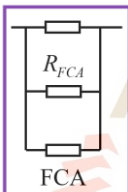
3.6.3 แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

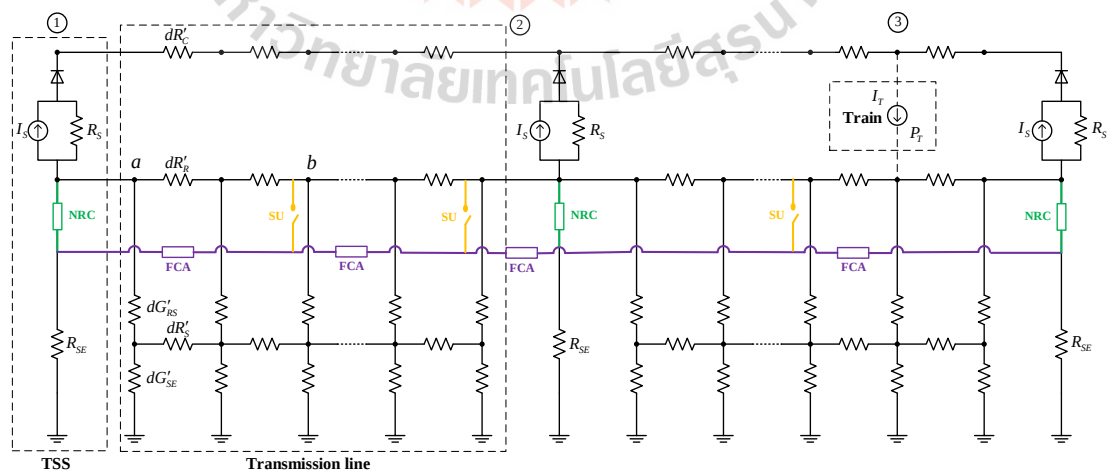
ในระบบ NEG-TPS ภาพไดอะแกรมของระบบที่ถูกเพิ่มในแบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟระบบปกติ ดังตารางที่ 3.2 อุปกรณ์เสริมติดตั้งของระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ Negative Resistance Converter (*NRCs*), Feeder Cable (*FCA*s) และ Switch Unit (*SUs*) ถูกเพิ่มเข้าไปยังระบบ TRA-TPS

ในทางปฏิบัติ *NRCs* จะถูกติดตั้งในตู้ที่สถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน (Substation), *SUs* จะถูกสร้างขึ้นและติดตั้งด้วยพันธะตรงข้ามรางรถไฟ (rail-to-rail cross bonds) และ *FCA*s จะถูกติดตั้งวางขนานตามรางวิ่งเพื่อเป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อกันของ *NRCs* และ *SUs* ดังนั้นในระบบ NEG-TPS สามารถติดตั้งอุปกรณ์ *NRCs*, *FCA*s และ *SUs* ได้โดยตรงในระบบปกติ (TRA-TPS) โดยไม่ต้องดัดแปลงรถไฟ รางวิ่ง หรือโครงสร้างอื่น ๆ ซึ่งโหมดการทำงานต่าง ๆ ในการใช้งานจริงจะถูกกล่าวอธิบายเพิ่มเติมในภาคผนวก ก.

ในแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ โดยไม่พิจารณาการต่อลงดินแบบสลับไขว้ (Cross Bonding), Impedance Bonding และ Track Circuit โดยที่ *NRCs* เป็นอุปกรณ์ตัวปรับผลรวมความต้านทานของเส้นทางนั้นให้เป็นศูนย์ *FCA*s เป็นค่าความต้านทานของสายเคเบิลที่ถูกติดตั้งขนานกับรางวิ่ง โดยใช้ค่าเดียวกันกับระบบตัวนำย้อนกลับ และ *SUs* เป็นอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งของรถไฟจะมีการใช้งานเมื่อรถไฟวิ่งผ่าน (แบบอุดมคติ) ดังรูปที่ 3.24

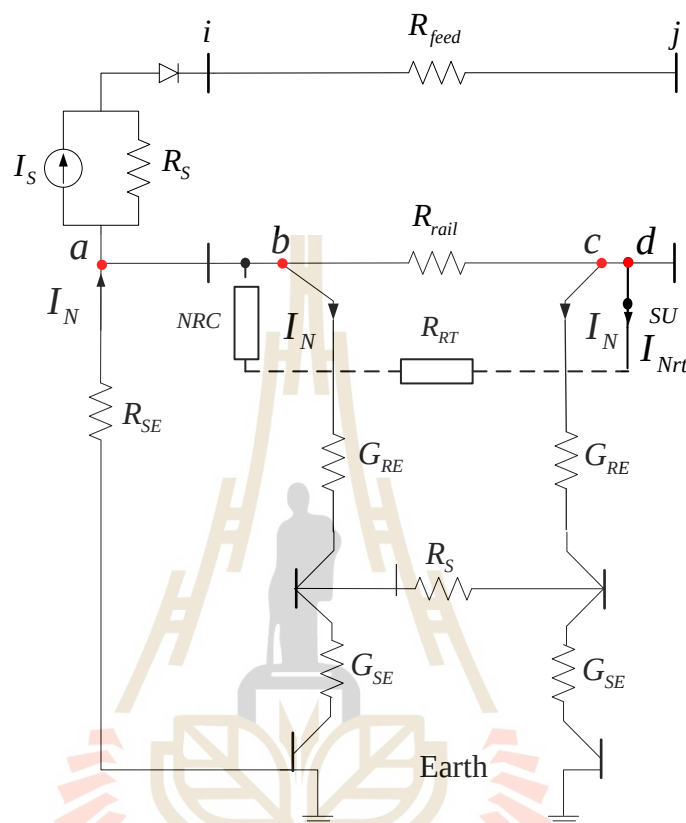
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์เสริมติดตั้งของระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

อุปกรณ์	แบบจำลอง
 Negative Resistance Converter (NRCs)	 NRC
 Switch Unit (SUs)	 SU
 Feeder Cable (FCAs)	 FCA



รูปที่ 3.24 ระบบ NEG-TPS

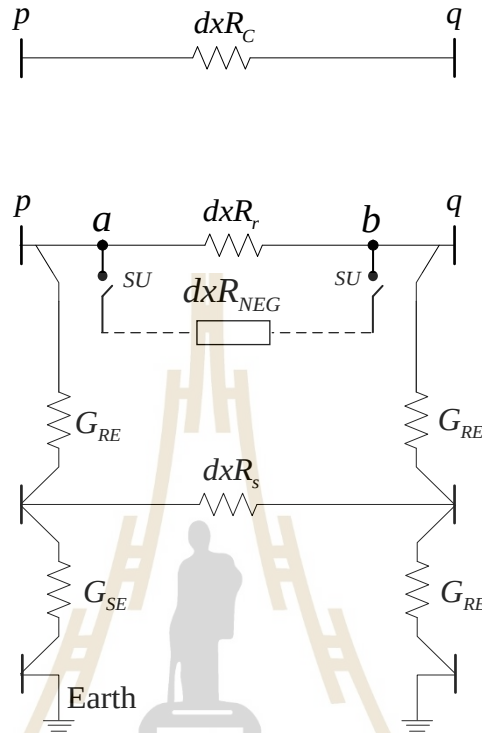
การหาเมตริกซ์ย่อยของพหุนามนำไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ โดยพิจารณาตามรูปที่ 3.25 แบบจำลองกรณีที่มีสายส่งและรางของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น เมื่อเพิ่มอุปกรณ์ของระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ



รูปที่ 3.25 แบบจำลองกรณีที่มีสายส่งและรางแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น
เมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อของตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

สามารถหาเมตริกซ์ย่อยที่บัสสถานีย่อยแบบสามระดับต่อหนึ่งบัสได้ดังสมการที่ (3.22) ที่กล่าวไว้ข้างต้นได้เหมือนกับแบบจำลองการเคลื่อนที่ระบบปกติ จากรูปที่ 3.25 การหาเมตริกซ์ย่อยที่สายส่งจะพิจารณาเฉพาะเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากในส่วนของสายส่งไม่มีแหล่งจ่าย ซึ่งการต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบสามระดับ สามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าระหว่างโนด p และ q หา $[G_{pq}]$ และ $[G_{qp}]$ ได้จากสมการ (3.23) ที่กล่าวไว้ข้างต้นได้เหมือนกับแบบจำลองการเคลื่อนที่ระบบปกติ

แบบจำลองสายส่งแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น กรณีเพิ่มอุปกรณ์ของระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ



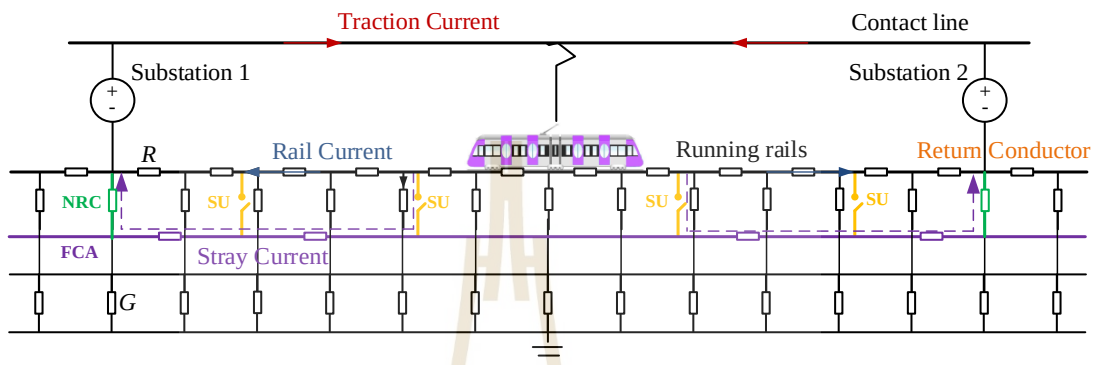
รูปที่ 3.26 การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

การเพิ่มโนดของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบระหว่างโนด a และ b ใด ๆ สามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าระหว่างโนด a และ b ได้ดังสมการ (3.27) หา $[G_{ab}]$ และ $[G_{ba}]$ ได้จากสมการ (3.26) เมื่อ R_{NEG} คือ ค่าความต้านทานรวมของเส้นทางลูปนั้น

$$[G_{ab}] = [G_{ba}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{dxR_{NEG}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

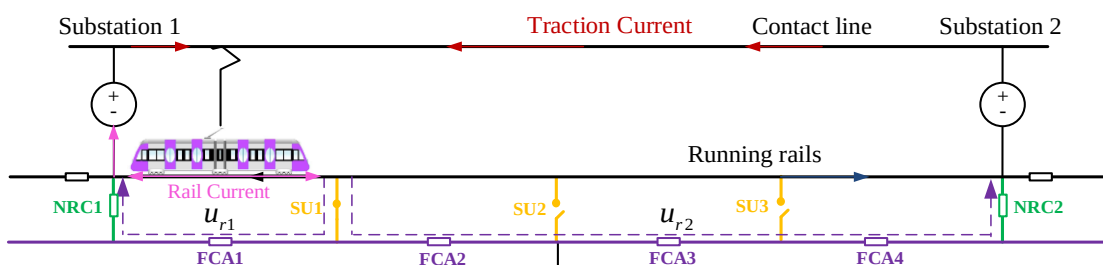
ระบบ NEG-TPS รางวิ่งจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนตัว่าง ๆ โดยเป็นเส้นทางที่สั้นกว่าของกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าในรูปเป็นศูนย์ แรงดันเอาต์พุตของ NRCs จะถูกควบคุมให้มีค่าตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้าระหว่าง FCAs และ SUs บนเส้นทางของกระแสไฟฟ้า

ย้อนกลับเส้นทางใหม่นี้ และความต้านทานในลูปจาก SUs ที่เปิดอยู่ไปจนถึง $NRCs$ ควรเป็นศูนย์ ตามอุดมคติ เส้นทางของกระแสย้อนกลับใหม่นี้เรียกว่า ลูปความต้านทานเป็นศูนย์ (zero-resistance loops) จากการแบ่งตามความยาวของรางวิ่งที่สั้นลงจากความยาวทั้งหมด ดังรูปที่ 3.27 จะส่งผลให้ ค่าศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสไฟฟ้ารั่วจะลดลงนั่นเอง



รูปที่ 3.27 แบบจำลองระบบ NEG-TPS

เมื่อรถไฟอยู่ตำแหน่งส่วนรางที่ 1 รถไฟอยู่ระหว่าง $NRC1$ และ $NRC2$ ดังรูปที่ 3.28 จะมีเฉพาะ $SU1$ เท่านั้นที่ปิดวงจร $SU2$ และ $SU3$ เปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าของลูปที่ 1 (u_{r1}) ของลูปความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ $NRC1$ (u_{NRC1}) และแรงดันไฟฟ้าที่ $FCA1$ (u_{FCA1}) จะถูกควบคุมให้เป็นผลรวมศูนย์ตามอุดมคติ ในทำนองเดียวกันแรงดันไฟฟ้าของลูปที่ 2 (u_{r2}) ของลูปความต้านทานเป็นศูนย์ เนื่องจากส่วนรางที่ 2, 3 และ 4 ถูกตัดวงจรโดยลูปความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ $NRC2$ (u_{NRC2}) และแรงดันไฟฟ้าที่ $FCA2$, $FCA3$ และ $FCA4$ (u_{FCA2} , u_{FCA3} , u_{FCA4}) จะถูกควบคุมให้เป็นผลรวมศูนย์ตามอุดมคติดังสมการที่ (3.28) ดังนั้นจะมี กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนเฉพาะในส่วนลูปที่ 1 (u_{r1}) และลูปที่ 2 (u_{r2}) สามารถคำนวณหาความต้านทานรวมลูปต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (3.29)



รูปที่ 3.28 รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 1 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

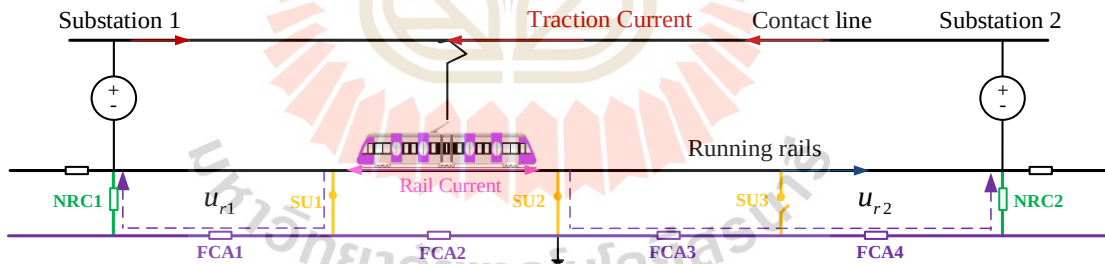
$$u_{r1} = u_{NRC1} + u_{FCA1} = 0 \quad (3.28)$$

$$u_{r2} = u_{NRC2} + (u_{FCA2} + u_{FCA3} + u_{FCA4}) = 0$$

เกิดจากผลรวมความต้านทานเป็นศูนย์

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{NRC1} + R_{FCA1} = 0 \\ R_2 &= R_{NRC2} + R_{FCA2} + R_{FCA3} + R_{FCA4} = 0 \end{aligned} \quad (3.29)$$

เมื่อรถไฟอยู่ตำแหน่งส่วนรางที่ 2 รถไฟอยู่ระหว่าง $SU1$ และ $SU2$ ดังรูปที่ 3.29 จะมีเฉพาะ $SU1$ และ $SU2$ เท่านั้นที่ปิดวงจร $SU3$ เปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าของลูบที่ 1 (u_{r1}) ของลูบความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ $NRC1$ (u_{NRC1}) และแรงดันไฟฟ้าที่ $FCA1$ (u_{FCA1}) ถูกควบคุมให้ผลรวมเป็นศูนย์ตามอุดมคติ ในทำนองเดียวกันแรงดันไฟฟ้าของลูบที่ 2 (u_{r2}) ของลูบความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ $NRC2$ (u_{NRC2}) แรงดันไฟฟ้าที่ $FCA3$ และ $FCA4$ (u_{FCA3} , u_{FCA4}) จะถูกควบคุมให้ผลรวมเป็นศูนย์ตามอุดมคติดังสมการที่ (3.30) ดังนั้นจะมีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนเฉพาะในส่วนลูบที่ 1 (u_{r1}) และลูบที่ 2 (u_{r2}) สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานรวมลูบต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (3.31)



รูปที่ 3.29 รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 2 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

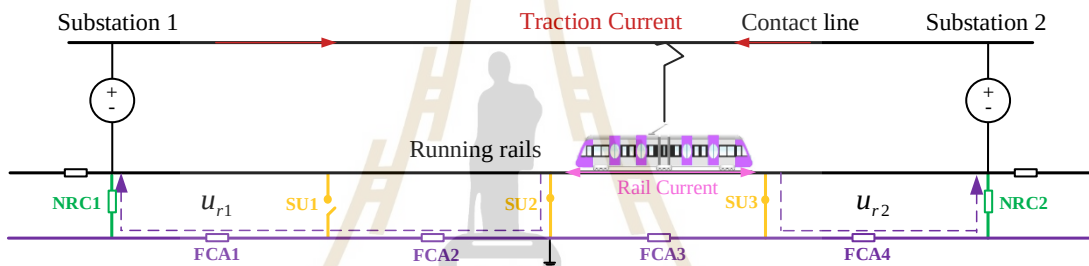
$$u_{r1} = u_{NRC1} + u_{FCA1} = 0 \quad (3.30)$$

$$u_{r2} = u_{NRC2} + (u_{FCA3} + u_{FCA4}) = 0$$

เกิดจากผลรวมความต้านทานเป็นศูนย์

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{NRC1} + R_{FCA1} = 0 \\ R_2 &= R_{NRC2} + R_{FCA3} + R_{FCA4} = 0 \end{aligned} \quad (3.31)$$

เมื่อรถไฟอยู่ตำแหน่งส่วนรางที่ 3 รถไฟอยู่ระหว่าง $SU2$ และ $SU3$ ดังรูปที่ 3.30 เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนรางที่ 3 จะมีเฉพาะ $SU2$ และ $SU3$ เท่านั้นที่ปิดวงจร $SU1$ เปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าของลูบที่ 1 (u_{r1}) ของลูบความต้านทานเป็นศูนย์ และแรงดันไฟฟ้าที่ $NRC1$ (u_{NRC1}) แรงดันไฟฟ้าที่ $FCA1$ และ $FCA2$ (u_{FCA1} , u_{FCA2}) จะถูกควบคุมให้ผลรวมเป็นศูนย์ตามอุดมคติ ในทำนองเดียวกันแรงดันไฟฟ้าของลูบที่ 2 (u_{r2}) ของลูบความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ $NRC2$ (u_{NRC2}) และแรงดันไฟฟ้าที่ $FCA4$ (u_{FCA4}) จะถูกควบคุมให้ผลรวมเป็นศูนย์ตามอุดมคติ ดังสมการที่ (3.32) เนื่องจากส่วนรางที่ 1 และส่วนรางที่ 2 ถูกลัดวงจรโดยลูบความต้านทานเป็นศูนย์ และส่วนรางที่ 4 ถูกลัดวงจรโดยลูบความต้านทานเป็นศูนย์เช่นกัน ดังนั้นจะมีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนเฉพาะในส่วนลูบที่ 1 (u_{r1}) และลูบที่ 2 (u_{r2}) สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานรวมลูบต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (3.33)



รูปที่ 3.30 รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 3 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

$$u_{r1} = u_{NRC1} + (u_{FCA1} + u_{FCA2}) = 0 \quad (3.32)$$

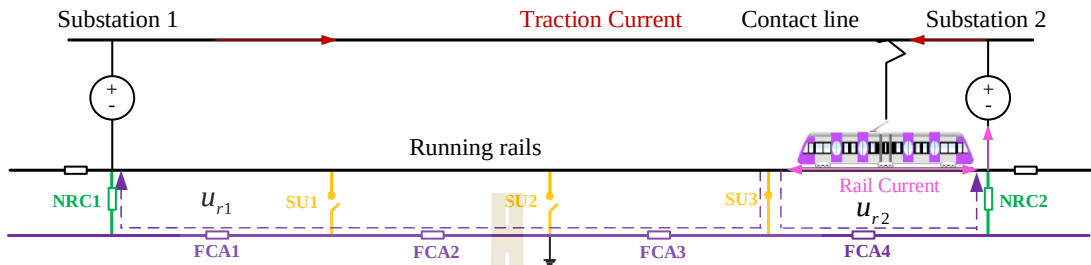
$$u_{r2} = u_{NRC2} + u_{FCA4} = 0$$

เกิดจากผลรวมความต้านทานเป็นศูนย์

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{NRC1} + R_{FCA1} + R_{FCA2} = 0 \\ R_2 &= R_{NRC2} + R_{FCA4} = 0 \end{aligned} \quad (3.33)$$

เมื่อรถไฟอยู่ตำแหน่งส่วนรางที่ 4 รถไฟอยู่ระหว่าง $SU3$ และ $NRC2$ ดังรูปที่ 3.31 จะมีเฉพาะ $SU3$ เท่านั้นที่ปิดวงจร $SU1$ และ $SU2$ เปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าของลูบที่ 1 (u_{r1}) ของลูบความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ $NRC1$ (u_{NRC1}) และแรงดันไฟฟ้าที่ $FCA1$, $FCA2$ และ $FCA3$ (u_{FCA1} , u_{FCA2} , u_{FCA3}) จะถูกควบคุมให้เป็นศูนย์ตามอุดมคติ ในทำนองเดียวกันแรงดันไฟฟ้าของลูบที่ 2 (u_{r2}) ของลูบความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ $NRC2$ (u_{NRC2}) และ

แรงดันไฟฟ้าที่ $FCA4$ (u_{FCA4}) จะถูกควบคุมให้เป็นศูนย์ตามอุดมคติดังสมการที่ (3.34) ดังนั้นจะมีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนเฉพาะในส่วนลูบที่ 1 (u_{r1}) และลูบที่ 2 (u_{r2}) สามารถคำนวณหาความต้านทานรวมลูบต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (3.35)



รูปที่ 3.31 รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 4 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

$$u_{r1} = u_{NRC1} + (u_{FCA1} + u_{FCA2} + u_{FCA3}) = 0 \quad (3.34)$$

$$u_{r2} = u_{NRC2} + u_{FCA4} = 0$$

เกิดจากผลรวมความต้านทานเป็นศูนย์

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{NRC1} + R_{FCA1} + R_{FCA2} + R_{FCA3} = 0 \\ R_2 &= R_{NRC2} + R_{FCA4} = 0 \end{aligned} \quad (3.35)$$

ไม่ว่ารถไฟจะอยู่ตำแหน่งไหนของรางวิ่งทั้งหมด ลูปความต้านทานเป็นศูนย์ของ $NRCs$, SUs และ $FCAs$ จะควบคุมให้กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไหลไปในส่วนรางที่ไหลได้เท่านั้น ไม่สามารถไหลไปตามส่วนรางที่ไม่ใช่ตำแหน่งรถไฟหรือส่วนรางที่ถูกกั้ววงจร ดังนั้นเส้นทางย้อนกลับของกระแสไฟฟ้ารางจึงสั้นลงจากความยาวรางวิ่งทั้งหมด จึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าร่วงสู่พื้นดินน้อยลง

3.7 ศักยภาพการลดลงในระบบ (Reduction Performance)

ร้อยละการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าราง (η) และกระแสไฟฟ้ารั่ว (σ) สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.36) และ (3.37) โดยมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบศักยภาพการลดลงค่าศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วของระบบ NEG-TPS เปรียบเทียบกับระบบ TRA-TPS และ RET-TPS

$$\eta = \begin{cases} \eta_{NT} = \left| \frac{U_{RE(NEG)} - U_{RE(Normal)}}{U_{RE(Normal)}} \right| \times 100\% \\ \eta_{RT} = \left| \frac{U_{RE(RET)} - U_{RE(Normal)}}{U_{RE(Normal)}} \right| \times 100\% \end{cases} \quad (3.36)$$

$$\delta = \begin{cases} \delta_{NT} = \left| \frac{i_{S(NEG)} - i_{S(Normal)}}{i_{S(Normal)}} \right| \times 100\% \\ \delta_{RT} = \left| \frac{i_{S(RET)} - i_{S(Normal)}}{i_{S(Normal)}} \right| \times 100\% \end{cases} \quad (3.37)$$

โดย	$U_{RE(Normal)}$	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ารางของระบบ TRA-TPS (V)
	$U_{RE(RET)}$	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ารางของระบบ RET-TPS (V)
	$U_{RE(NEG)}$	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ารางของระบบ NEG-TPS (V)
	$i_{S(Normal)}$	คือ กระแสรั่วไฟฟ้ารั่วของระบบ TRA-TPS (mA/m)
	$i_{S(RET)}$	คือ กระแสรั่วไฟฟ้ารั่วของระบบ RET-TPS (mA/m)
	$i_{S(NEG)}$	คือ กระแสรั่วไฟฟ้ารั่วของระบบ NEG-TPS (mA/m)
	η_{NT}	คือ ร้อยละการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้ารางระหว่างระบบ NEG-TPS และระบบ TRA-TPS (%)
	η_{RT}	คือ ร้อยละการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้ารางระหว่างระบบ RET-TPS และระบบ TRA-TPS (%)
	δ_{NT}	คือ ร้อยละการลดลงของกระแสไฟฟ้ารั่วระหว่างระบบ NEG-TPS และระบบ TRA-TPS (%)
	δ_{RT}	คือ ร้อยละการลดลงของกระแสไฟฟ้ารั่วระหว่างระบบ RET-TPS และระบบ TRA-TPS (%)

3.8 สรุป

กระแสรั่วสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ โดยในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงจะมีโอกาสเกิดขึ้นมากกว่า จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษางานวิจัยนี้ ในบทนี้ได้กล่าวถึงสาเหตุและผลกระทบของกระแสรั่ว ไม่ว่าจะเป็นที่ส่งผลต่อโครงสร้างต่าง ๆ ที่เป็นโลหะของ

ระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง และความปลอดภัยของผู้มาใช้บริการ โดยที่ศักย์ไฟฟ้าที่ราง อาจเป็นอันตรายต่อความปลอดภัยของบุคคลเกี่ยวกับแรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ไม่เกิน 120 V การจำลองผลของระบบขนส่งมวลชนกระแสตรง สายฉลองรัชธรรม MRT สายสีม่วง (เหนือ) ที่มีการเดินรถขบวนเดียวแบบไป-กลับ ที่มีการต่อลงดินสองชั้น (ตัวนำสามระดับ) ดังนั้นสมการในบทนี้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์และประเมินผลค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางให้เป็นไปตามมาตรฐาน EN50122-1 สามารถพิจารณาผลการจำลอง ซึ่งจะนำเสนอในบทถัดไป



บทที่ 4

ผลการจำลองและอภิปรายผล

4.1 บทนำ

จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงรูปแบบการจำลองผลประเภทต่าง ๆ ที่จะใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ซึ่งการศึกษากระแสไฟฟ้ารั่วในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดตรง จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะสมบัติของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า ตารางการเดินรถ แบบจำลองการต่อลงดินของระบบไฟฟ้า เป็นต้น ปัจจัยที่กล่าวมานี้มีความซับซ้อนต่อการจำลองผล ดังนั้นจึงต้องใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ที่สามารถนำมาใช้เป็นซอฟต์แวร์ช่วยคำนวณผ่านแบบจำลองของระบบ ผ่านโปรแกรม MATLAB เพื่อช่วยให้ผู้จัดทำเห็นสภาพการทำงานและผลที่ได้เสมือนจริง ในบทนี้ใช้ระบบรถไฟฟ้ากระแสดตรงแบ่งเป็น 2 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีที่ 1 เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ประกอบด้วยรถไฟฟ้า 1 ขบวนวิ่งบนรางวิ่งและมีสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน 3 สถานีอยู่ที่ตำแหน่ง 0, 5 และ 10 กิโลเมตร ตามลำดับ และการจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วง (เหนือ)

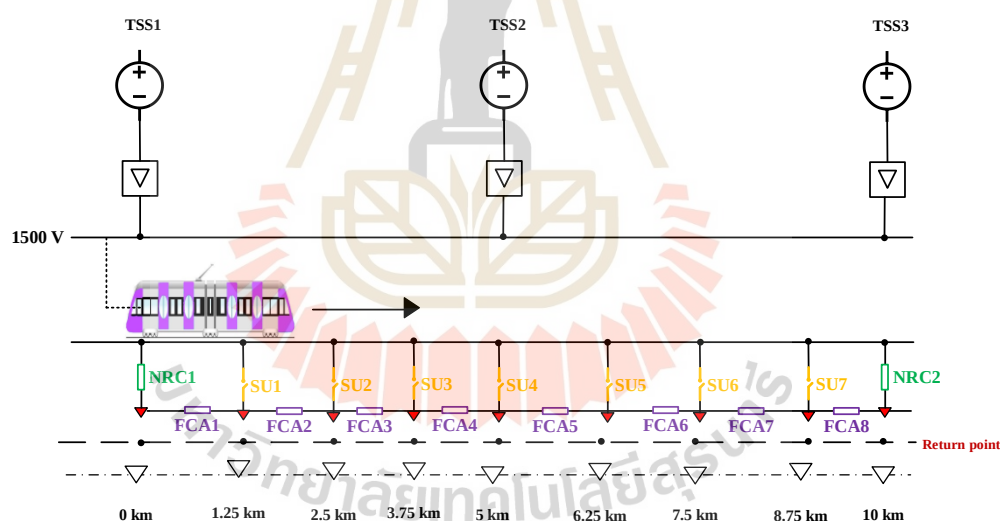
4.2 กรณีศึกษาที่ 1 (ความเร็วคงที่)

4.2.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่กรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลพารามิเตอร์ในการสร้างแบบจำลอง แบบจำลองทั่วไปของกรณีที่ 1 ดังรูปที่ 4.1 โดยใช้แรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนปกติ 1500 V และรถไฟฟ้าใช้กระแสจุดลากคงที่ 1667

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของกรณีศึกษาที่ 1

Parameters	Variables	Values	Units
Substation voltage rated	u_{subs}	1500	V
Train current	i_L	1667	A
Catenary resistance	R_C	75	mΩ/km
Running rails resistance	R_R	9	mΩ/km
SUs resistance	R_{SU}	0.002	mΩ/km
FCA's resistance	R_{FCA}	0.00225	Ω/km
Rail-to-earth resistance	R_G	2	S·km
Distance	L	10	km

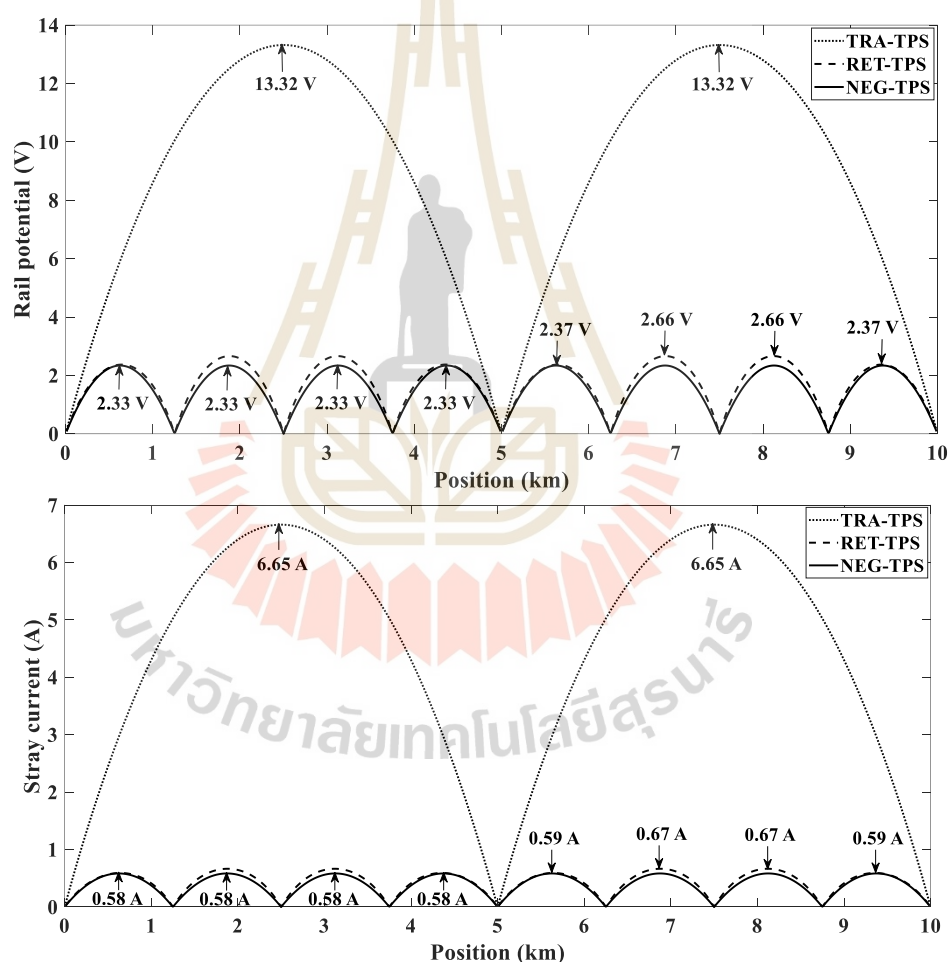


รูปที่ 4.1 แบบจำลองทั่วไปของกรณีศึกษาที่ 1

เมื่อพิจารณาจากแบบจำลองของ TRA-TPS, RET-TPS และ NEG-TPS ดังรูปที่ 4.1 เมื่อรถไฟมีการเคลื่อนที่ การคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วจะพิจารณาจากสมการการเมตริกซ์ย่อยที่บัสสถานีย่อยแบบสามระดับต่อเนื่องกัน บัส สมการที่ (3.22) - (3.27) และการประเมินหาค่าศักยภาพการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วในระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับและระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.36) และ (3.37) ที่กล่าวไว้ข้างต้น

1) ผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีศึกษาที่ 1

จากรูปที่ 4.1 แบบจำลองกรณีศึกษาที่ 1 รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่จะประกอบไปด้วยรูปแบบของระบบทั้ง 3 ระบบไม่ว่าจะเป็นระบบปกติหรือ TRA-TPS (Traditional Traction Power System) ระบบการติดตั้งตัวนำหรือ RET-TPS (Return Conductor Traction Power System) และระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบหรือ NEG-TPS (Negative Resistance Converter Traction) สามารถนำผลการจำลองไปเปรียบเทียบเพื่อหาศักยภาพการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วในขั้นตอนต่อไปได้ ผลการจำลองที่ความเร็วคงที่ ในกรณีจุดเชื่อมต่อที่ตำแหน่ง 0, 1.25, 2.5, 3.75, 5, 6.25, 7.5, 8.75 และ 10 กิโลเมตร ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของกรณีศึกษาที่ 1

จากรูปที่ 4.2 ของระบบ TRA-TPS ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด (u_{rT}) มีค่าเท่ากับ 13.32 V และกระแสไฟฟ้ารั่วสูงสุด (i_{sT}) มีค่าเท่ากับ 6.65 A ที่ $x = 2.50$ km และ $x = 7.50$ km เมื่อรถไฟอยู่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน

ในระบบ RET-TPS ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด (u_{rR}) มีค่าเท่ากับ 2.66 V และกระแสไฟฟ้ารั่วสูงสุด (i_{sR}) มีค่าเท่ากับ 0.67 A เมื่อรถไฟอยู่ตรงกลางของส่วนรางที่ 2, 3, 6 และ 7 โดยที่ x มีค่าเท่ากับ 1.88 km, 3.14 km, 6.88 km และ 8.14 km ตามลำดับ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบ RET-TPS พบว่าจะเกิดขึ้นเมื่อตำแหน่งรถไฟอยู่ตรงกลางสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนออกไป

ในระบบ NEG-TPS ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด (u_{rN}) มีค่าเท่ากับ 2.33 V และกระแสไฟฟ้ารั่วสูงสุด (i_{sN}) มีค่าเท่ากับ 0.58 A เมื่อรถไฟอยู่ตำแหน่งตรงกลางของแต่ละส่วนรางในทุก ๆ ส่วน นั่นคือ x มีค่าเท่ากับ 0.62, 1.88, 3.14, 4.38, 5.62, 6.88, 8.14 และ 9.38 km เนื่องจากส่วนรางวิ่งถูกแบ่งออกเป็น 8 ส่วน (L/8) เท่า ๆ กัน ส่งผลให้การกระจายของศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วของรถไฟจึงมีค่าเท่ากันในทุก ๆ ส่วนของรางวิ่ง

2) ศักยภาพการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่ว

จากสมการการประเมินศักยภาพการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว สมการที่ (3.36) และสมการที่ (3.37) สามารถสรุปค่าร้อยละการลดลงของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับและระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบของค่าสูงสุดศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ร้อยละการลดลงของค่าสูงสุดศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว

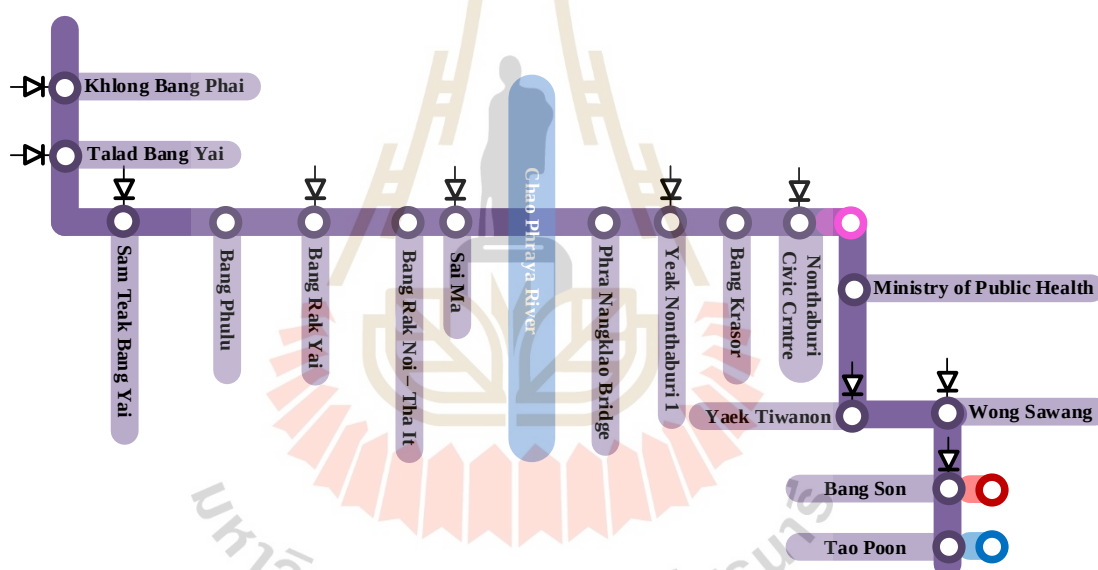
	TRA-TPS	RET-TPS	NEG-TPS
ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด (V)	13.32	2.66	2.33
กระแสไฟฟ้ารั่ว (A)	6.65	0.67	0.58
ร้อยละการลดลง (%)			
ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด (V)	Base	80.03	82.51
กระแสไฟฟ้ารั่ว (A)		89.92	91.28

จากการเปรียบเทียบศักยภาพการลดลงระหว่าง RET-TPS กับ TRA-TPS พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อตำแหน่งรถไฟอยู่ระหว่าง NEG-TPS กับ TRA-TPS ประสิทธิภาพการลดลงค่าศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วในตำแหน่งไกลจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน คิดเป็น 82.51% และ 91.28% ตามลำดับ

4.3 กรณีศึกษาที่ 2 (รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วงเหนือ)

4.3.1 ผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีศึกษาที่ 2

ระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (Metropolitan Rapid Transit Chalong Ratchadham Line หรือ MRT Purple Line) หรือ รถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง ในการจำลองผลแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 เส้นทางเดินรถ โดยระบบมีสถานีให้บริการ 16 สถานี และสถานีเรียงกระแส 10 สถานี ซึ่งระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังรถไฟฟ้าผ่านรางที่สามที่พิกัดแรงดัน 750 V มีกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน 2.5 MW ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าสายสีม่วง และตารางที่ 4.4 แสดงตำแหน่งสถานีระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) โปรแกรมการจำลองการเคลื่อนที่กรณีศึกษาใช้ MATLAB/M-file โดยใช้แบบจำลองและสมการที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้เสนอการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าและการคำนวณการไหลของกระแสไฟฟ้า



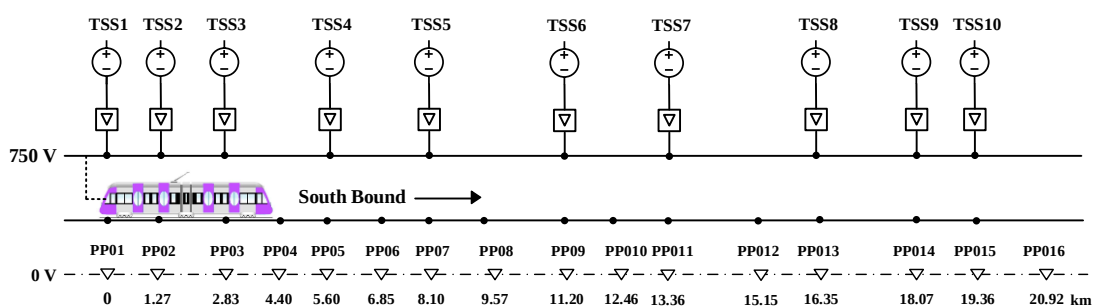
รูปที่ 4.3 เส้นทางเดินรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าสายสีม่วง

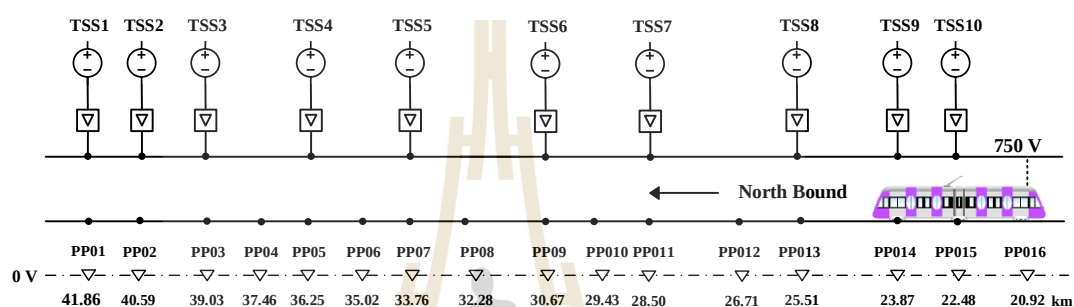
ข้อมูลจำเพาะ	ข้อมูล	ค่า	หน่วย
Train parameters			
Movement feature	max.speed	80	km/h
	max. acceleration	1.2	m/s^2
	max. deceleration	0.9	m/s^2
Weight	train mass	135	ton
	passenger mass	75	ton
tractive effort curve	maximum tractive effort	228.8	N
	maximum braking effort	168.8	N
Efficiency	motor power factor	0.86	-
Auxiliary power	constant load	270	kW
Train resistance			
3 rd Rail Resistance		0.007	Ω/km
Running Rail Resistance		0.0175	Ω/km
Structure Resistance		0.01	Ω/km
Rail-to-structure conductance		0.1	S.km
Rail-to-earth conductance		0.1	S.km
Substation parameter			
Voltage no-load		750	V
Short-circuit capacity		2.5	MW

ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งสถานีระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

รหัสสถานี ให้บริการ	รหัสสถานีเรียงกระแส	สถานี	ตำแหน่ง South Bound (km)	ตำแหน่ง North Bound (km)
PP01	TSS1	คลองบางไผ่	0.00	41.86
PP02	TSS2	ตลาดบางใหญ่	1.27	40.59
PP03	TSS3	สามแยกบางใหญ่	2.83	39.03
PP04	-	บางพลู	4.40	37.46
PP05	TSS4	บางรักใหญ่	5.60	36.25
PP06	-	บางรักน้อย-ท่าอิฐ	6.85	35.02
PP07	TSS5	ไทรม้า	8.10	33.76
PP08	-	สะพานพระนั่งเกล้า	9.57	32.28
PP09	TSS6	แยกนนทบุรี 1	11.20	30.67
PP10	-	บางกระสอ	12.46	29.43
PP11	TSS7	ศูนย์ราชการจังหวัดนนทบุรี	13.36	28.50
PP12	-	กระทรวงสาธารณสุข	15.15	26.71
PP13	TSS8	แยกติวานนท์	16.35	25.51
PP14	TSS9	วงศ์สว่าง	18.07	23.87
PP15	TSS10	บางซื่อ	19.36	22.48
PP16	-	เตาปูน	20.92	20.92



(ก)

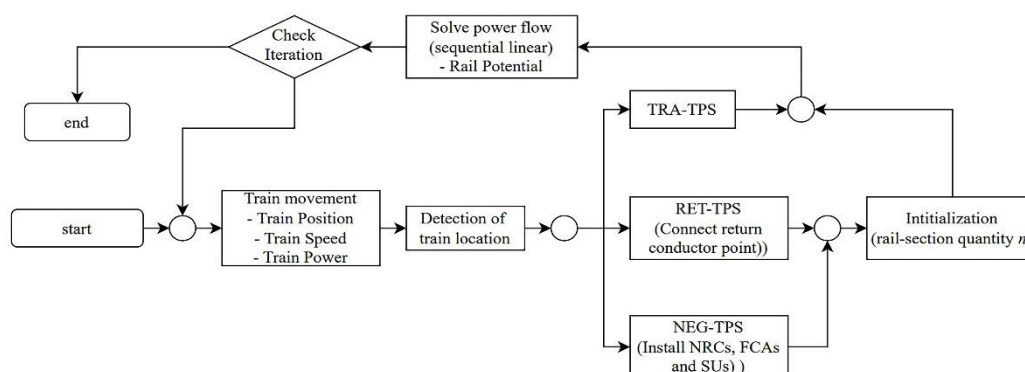


(ข)

รูปที่ 4.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วง

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound

การจำลองผลเป็นไปตามผังงานในรูปที่ 4.5 โปรแกรมจะเริ่มต้นด้วยการตั้งค่าพารามิเตอร์ของรถไฟ ฯลฯ และตัวแปรที่จำเป็นในกระบวนการ จากนั้นจะไปถึงลูปลหลักที่เริ่มต้นด้วยการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟเพื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟ เช่น ความเร็ว ตำแหน่ง และพลังงานที่ใช้ มีการตรวจจับตำแหน่งของรถไฟ จากนั้นพิจารณาแยกการคำนวณ 3 ระบบ สำหรับ RET-TPS และระบบ NEG-TPS จะคำนวณผ่านเงื่อนไขการแบ่งช่วงของรางวิ่ง ถ้ารถไฟมาถึงสถานีสุดท้ายให้ยุติกระบวนการ ถัดไปจะมีการคำนวณกระแสไฟฟ้าเพื่อค้นหาแรงดันไฟฟ้าของบัส และกลับไปทีลูปลหลักโดยทำซ้ำจนกว่าเวลาจะถึงเวลาสุดท้ายที่กำหนดไว้

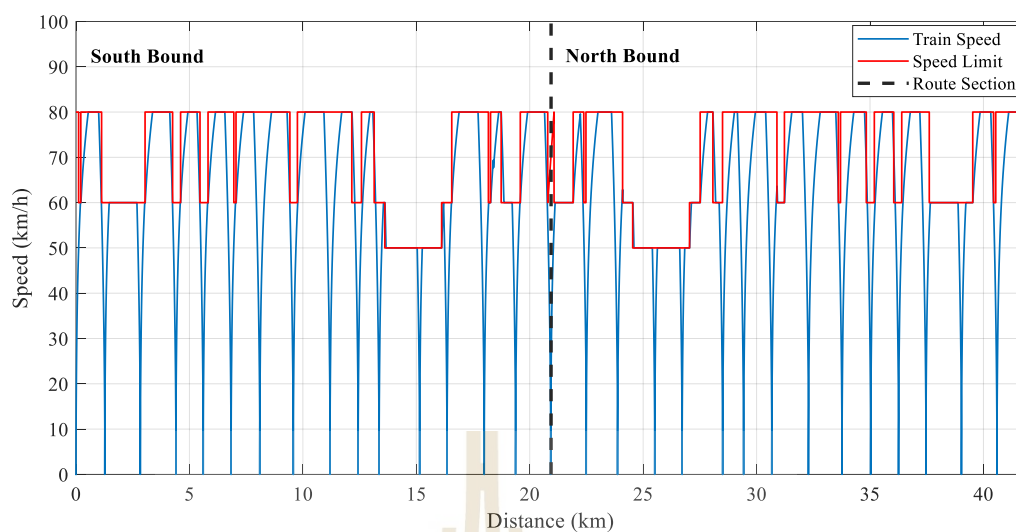


รูปที่ 4.5 แผนผังการจำลองผล

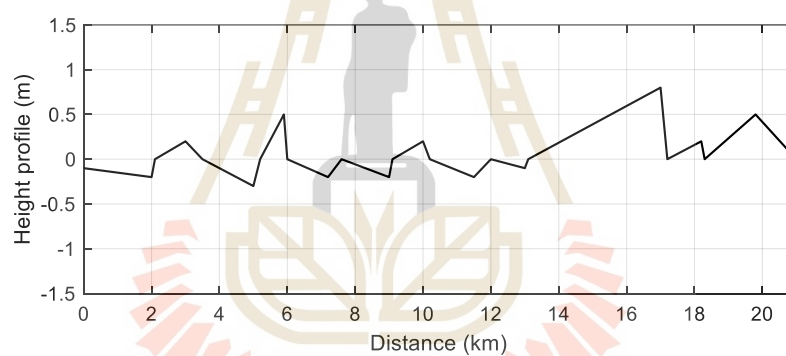
ผลที่ได้คาดว่าจะได้รับผลการจำลองทั่วไปของรถไฟฟ้าขบวนเดียว ไม่ว่าจะเป็นแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และตำแหน่งของรถไฟ รายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ผลการจำลองทั่วไป

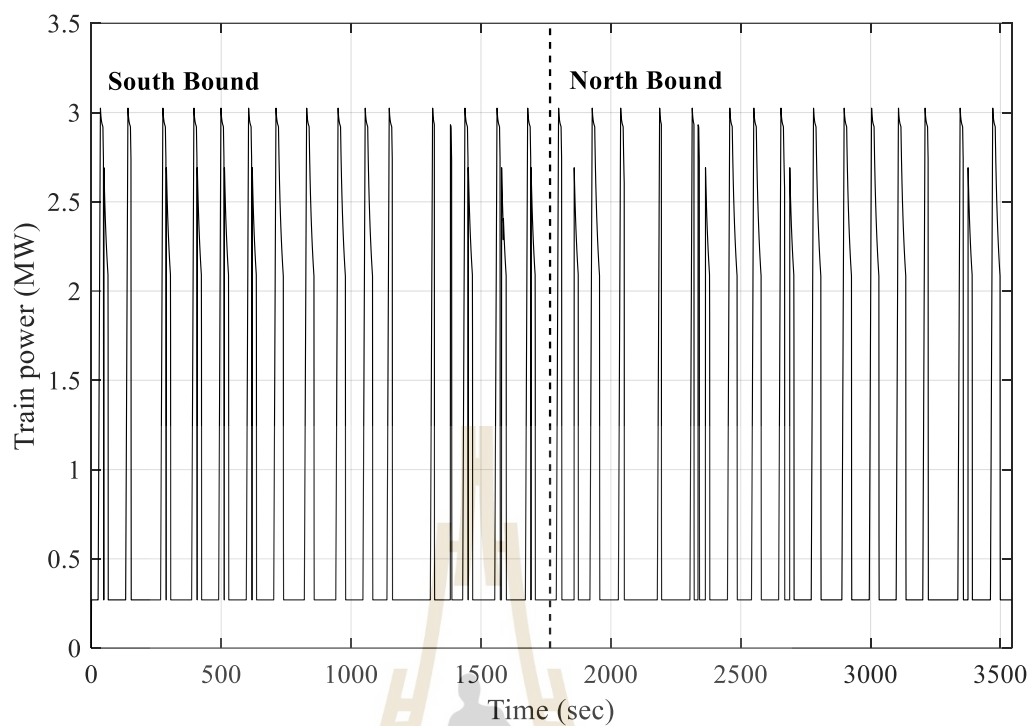
รถไฟฟ้าใช้กำลังไฟฟ้าในระหว่างโหมดความเร่งและโหมดควบคุมความเร็ว เพื่อควบคุมการขับเคลื่อนและใช้พลังงานเสริมภายในตัวรถไฟฟ้าในช่วงหยุดที่สถานีให้บริการ ดังความเร็วในการเคลื่อนที่เทียบกับเวลาในรูปที่ 4.6 แสดงภาพเกรเดียนต์ของรถไฟฟ้า MRT สายสีม่วง ดังรูปที่ 4.7 กำลังไฟฟ้ารถไฟเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 4.8 แสดงกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-10 ทั้งสองทิศทางการเดินรถ ดังรูปที่ 4.9 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่สถานีขับเคลื่อน 1-10 ดังรูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าตามตำแหน่งของรถไฟฟ้า รูปที่ 4.11 ศักย์ไฟฟ้าที่รางตามตำแหน่งของรถไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.12 และค่ากำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่รางของแบบจำลองกรณีศึกษารถไฟฟ้า MRT สายสีม่วง ผ่านแบบจำลองระบบปกติผ่านการต่อลงดินสองชั้น ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.6 ความเร็วจำกัดของ MRT สายสีม่วง



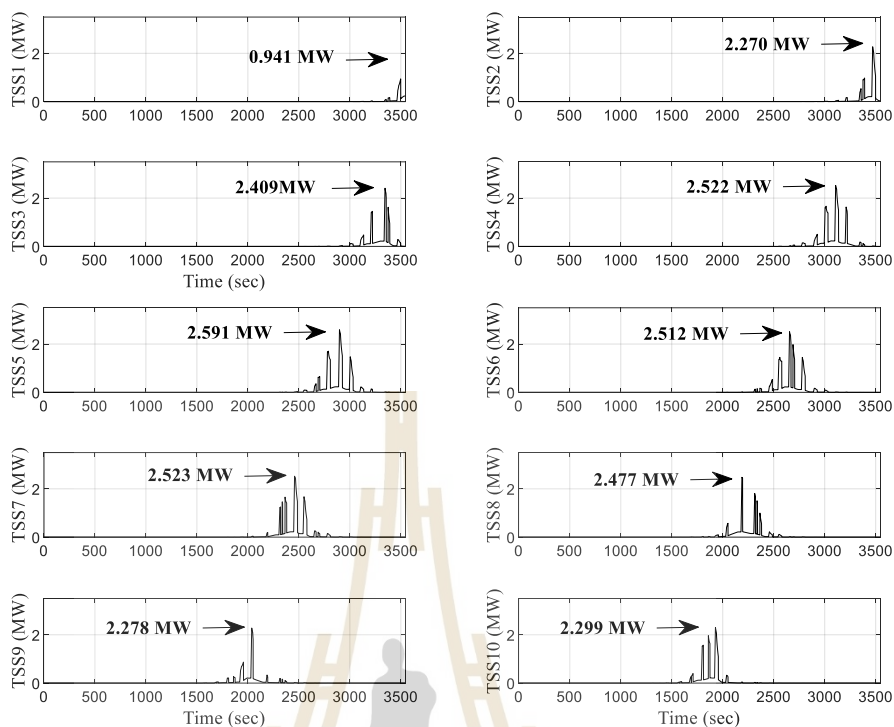
รูปที่ 4.7 เกรเดียนต์ของรถไฟฟ้า MRT สายสีม่วง (เหนือ)



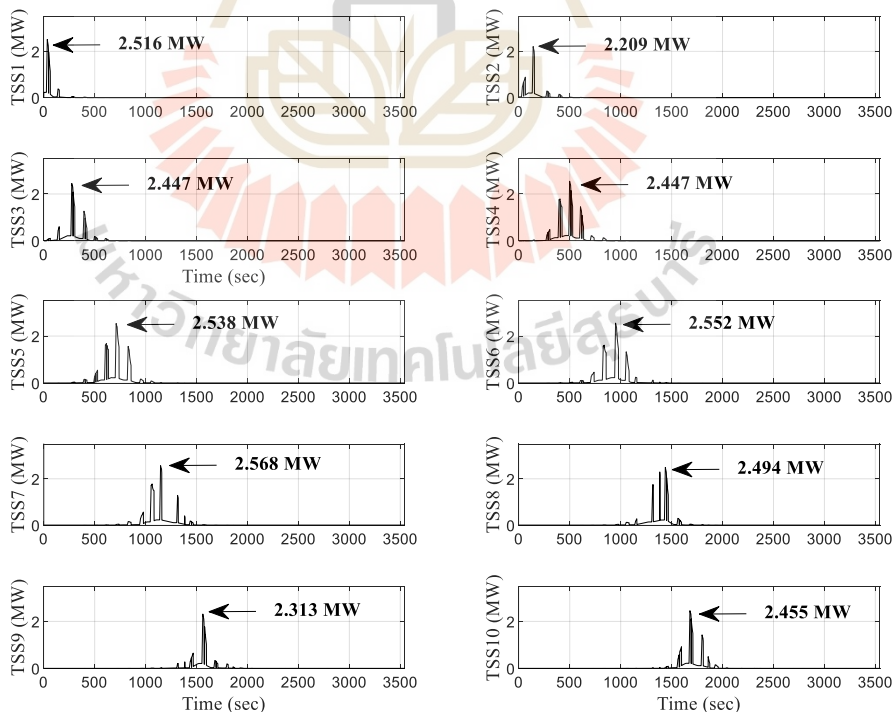
รูปที่ 4.8 กำลังไฟฟ้ารถไฟเทียบกับเวลา



Power at TSS (North Bound)

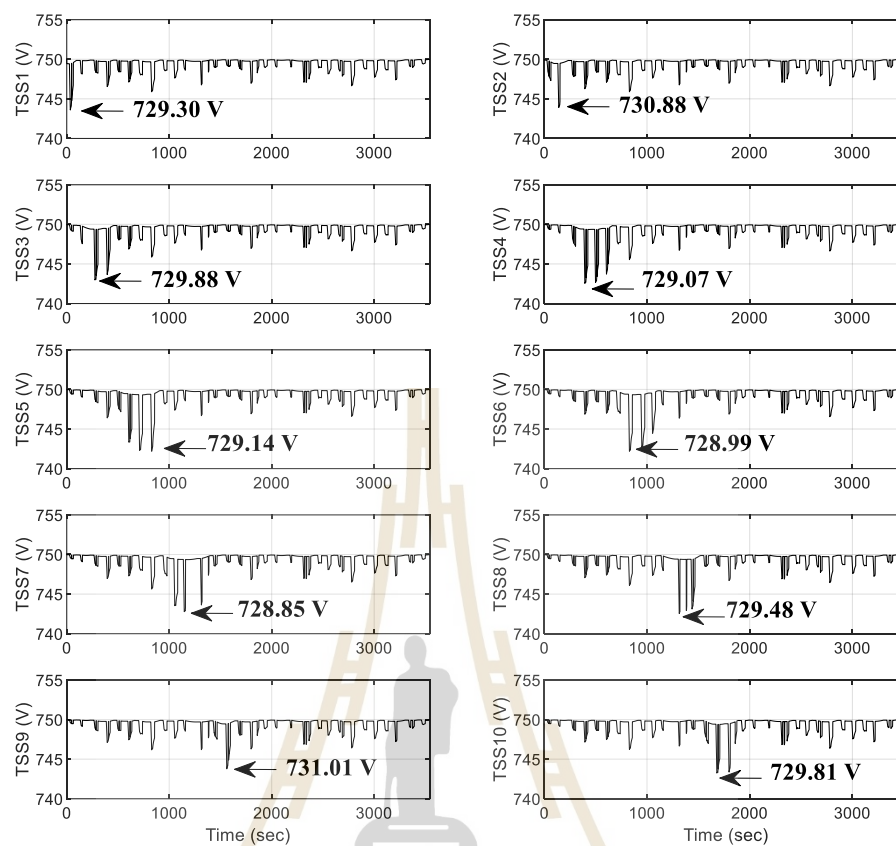


Power at TSS (South Bound)



รูปที่ 4.9 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-10

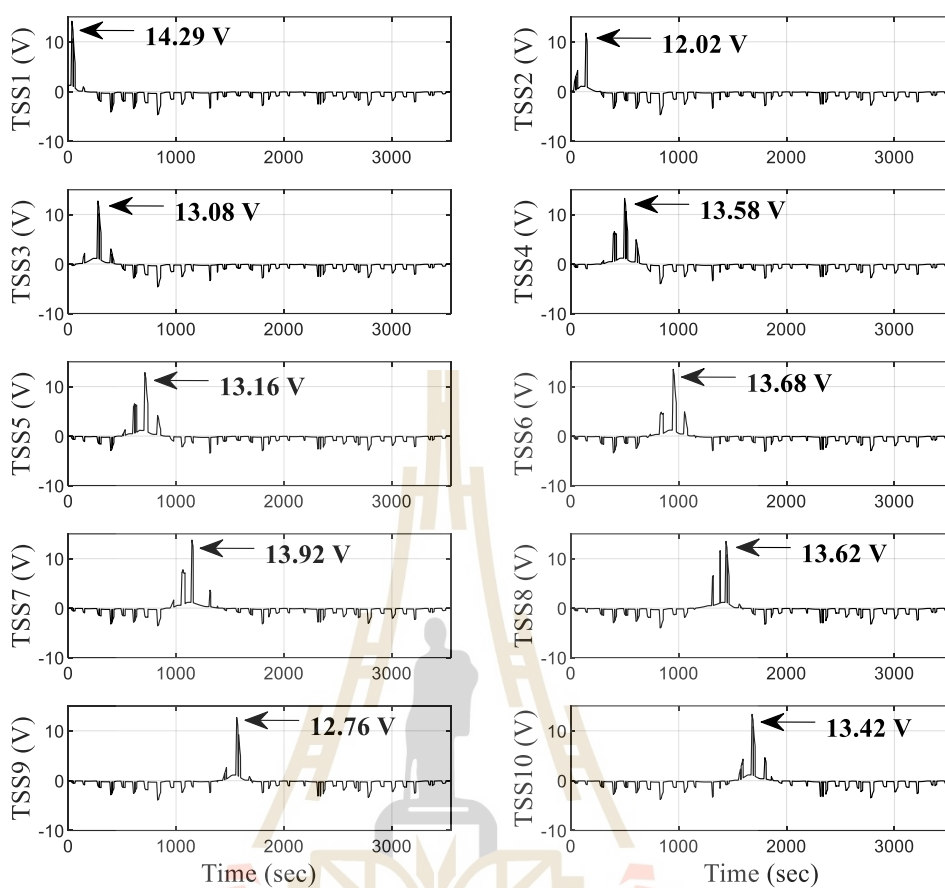
Voltage at TSS (South Bound)



รูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีขับเคลื่อน 1-10

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

U_{RE} at TSS (South Bound)

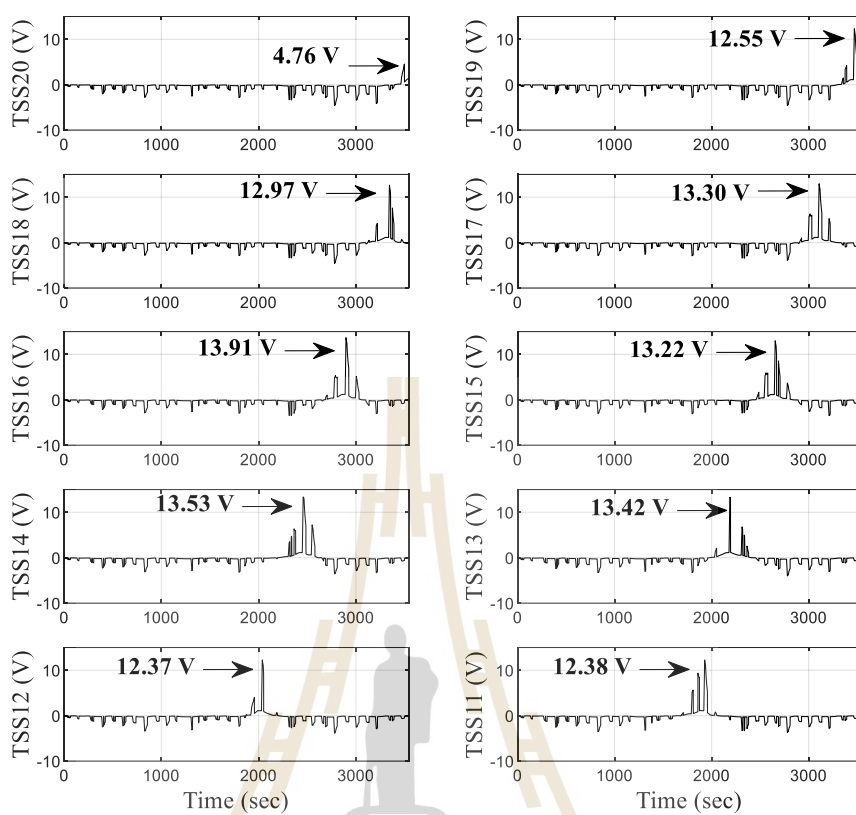


(ก)

รูปที่ 4.11 ศักย์ไฟฟ้าที่รางที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-10

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

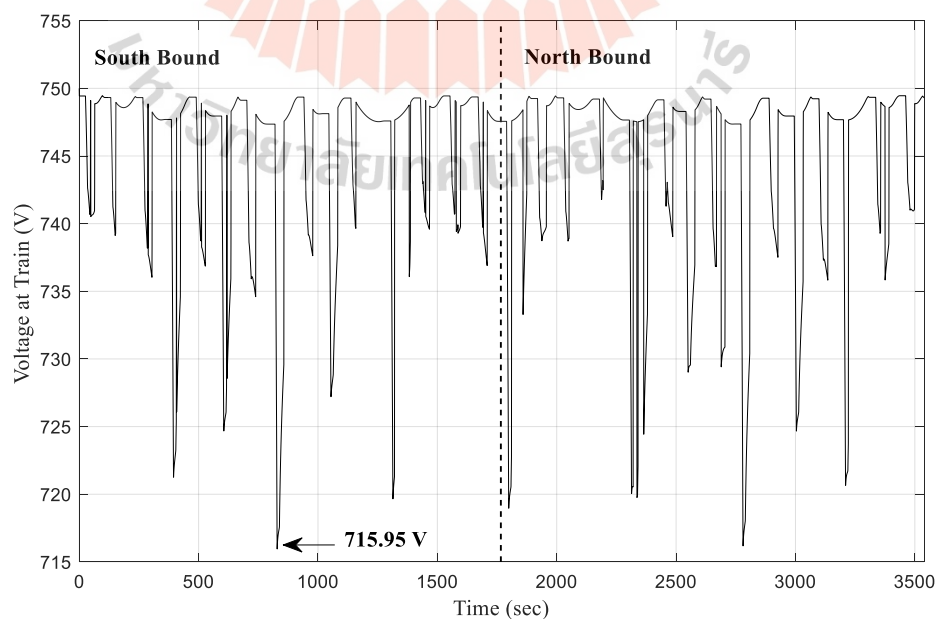
U_{RE} at TSS (North Bound)



(ข)

รูปที่ 4.11 ศักย์ไฟฟ้าที่รางที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-10 (ต่อ)

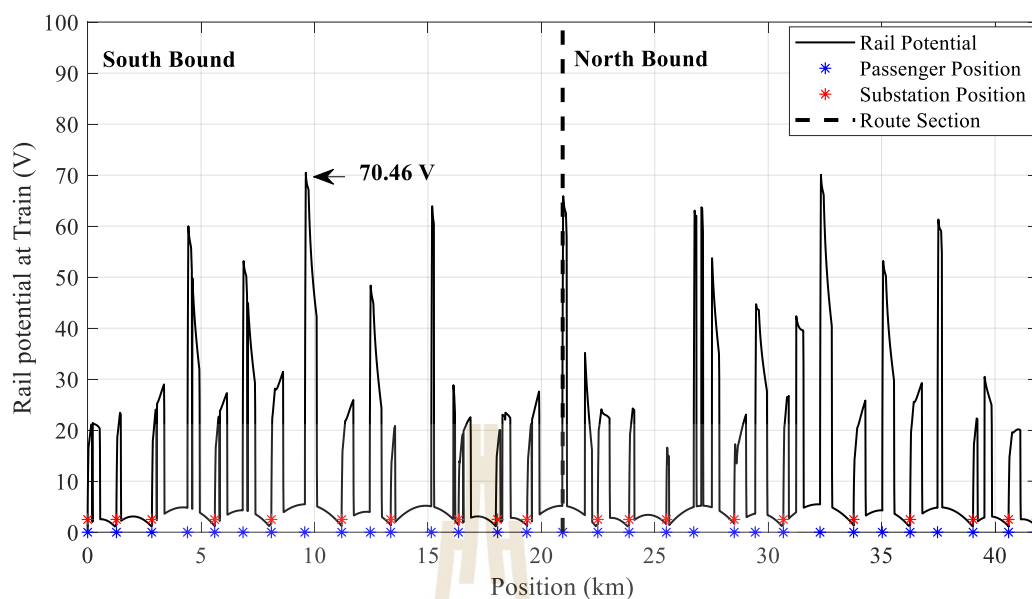
(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound



รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าตามตำแหน่งของรถไฟ

ตารางที่ 4.5 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และศักย์ไฟฟ้าที่รางของแบบจำลอง
กรณีศึกษารถไฟฟ้า MRT สายสีม่วง ผ่านแบบจำลองระบบปกติผ่านการต่อลงดินสองชั้น

TSS	$P_{S,max}(MW)$	$V_{C,min}(V)$	$U_{RE,max}(V)$	$U_{RE,min}(V)$	$U_{SE,max}(V)$	$U_{SE,min}(V)$
South Bound						
TSS1	2.516	729.301	14.294	-4.108	0.867	-0.602
TSS2	2.210	731.883	12.027	-4.104	0.871	-0.601
TSS3	2.448	729.880	13.089	-4.062	0.883	-0.593
TSS4	2.543	729.072	13.582	-3.381	0.792	-0.567
TSS5	2.535	729.141	13.162	-3.404	0.724	-0.531
TSS6	2.552	728.994	13.688	-3.448	0.637	-0.461
TSS7	2.568	728.858	13.921	-3.487	0.446	-0.398
TSS8	2.494	729.487	13.626	-3.831	0.395	-0.308
TSS9	2.314	731.011	12.767	-3.820	0.294	-0.260
TSS10	2.455	729.813	13.426	-3.774	0.343	-0.212
North Bound						
TSS1	2.299	731.129	12.383	-3.728	0.346	-0.208
TSS2	2.279	731.302	12.379	-3.773	0.284	-0.255
TSS3	2.477	729.628	13.426	-3.791	0.396	-0.309
TSS4	2.523	729.239	13.538	-3.526	0.453	-0.407
TSS5	2.512	729.334	13.227	-3.491	0.627	-0.464
TSS6	2.591	728.665	13.914	-3.446	0.723	-0.535
TSS7	2.522	729.249	13.306	-3.423	0.803	-0.572
TSS8	2.409	730.206	12.974	-4.013	0.903	-0.599
TSS9	2.271	731.372	12.552	-4.060	0.891	-0.606
TSS10	0.941	742.393	4.761	-4.064	0.886	-0.608



รูปที่ 4.13 แรงดันรางตามตำแหน่งของรถไฟ

จากรูปที่ 4.13 แสดงศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบปกติ จะเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้า รางสูงสุดจะอยู่ที่ 70.46 V ที่ตำแหน่งสถานีรับส่งผู้โดยสารที่ 8 (PP08) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่าง สถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 5 และ 6 (TSS05-TSS06) เป็นระยะกึ่งกลางในระยะที่ไกลจากสถานีจ่าย กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุดในตำแหน่งอื่น ๆ และค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ยเท่ากับ 37.13 V ดัง ตารางที่ 4.6 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร และค่าเฉลี่ยค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของ ระบบปกติที่เกิดจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดของสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละสถานีนำมาคำนวณเป็น ค่าเฉลี่ย ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นในการเปรียบเทียบกับทั้ง 2 ระบบ และพบว่าจะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่จุด สถานีรับส่งผู้โดยสารในช่วงเร่งความเร็วและจะลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางตามการเคลื่อนที่ของ รถไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกัน สำหรับค่ากระแสไฟฟ้ารั่วเกิดจากผลรวมของกระแสไฟฟ้าไหลเข้าออกที่ โหนดรางวิ่งที่ถูกกล่าวไปในบทที่ 3

ตารางที่ 4.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร ระบบปกติ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	21.20	PP15	24.10
PP02	23.42	PP14	24.01
PP03	28.97	PP13	16.58
PP04	59.97	PP12	63.56
PP05	27.28	PP11	23.06
PP06	53.16	PP10	44.70
PP07	31.46	PP09	26.72
PP08	70.46	PP08	42.34
PP09	25.92	PP07	70.05
PP10	48.35	PP06	25.81
PP11	20.84	PP05	53.18
PP12	63.90	PP04	29.25
PP13	22.54	PP03	61.29
PP14	23.42	PP02	30.46
PP15	27.57	PP01	1.68
PP16	65.88	สูงสุด	70.46
เฉลี่ย			37.13
กระแสไฟฟ้ารั่ว (mA/m)			0.00757

ศักย์ไฟฟ้าที่รางของแบบจำลองกรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีม่วงพบว่ามีความศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจากการคำนวณมีค่าเป็น 13.426 V ที่ TSS10 และ 70.46 V ที่ตำแหน่งรถไฟซึ่งอาจจะเกิดจากกระแสไฟฟ้าปริมาณมากที่จ่ายให้กับรถไฟในขณะนั้นเนื่องจากการเร่งความเร็วและระยะห่างของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ตามมาตรฐานยุโรปสำหรับศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่สามารถเข้าถึงได้ไม่เกิน 120 Vdc

2) การประเมินศักยภาพไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว

การประเมินกระแสไฟฟ้ารั่วสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) จะคำนวณแรงดันระหว่างรางวิ่งไปยังดินและกระแสที่ไหลผ่านไปยังดินตามมาตรฐาน EN 50122-2 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขับเคลื่อนสูงสุดเป็น

$$I_{tr} = \frac{P_{S,max}}{V_{line,min} - V_{rail,max}} = \frac{2.455 \times 10^6}{729.813 - 13.426} = 3426.919 \text{ A}$$

ความยาวของระยะทางที่ใช้ในการพิจารณา $L = 1.58 \text{ km}$ (ซึ่งเป็นระยะที่ยาวที่สุดสำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวของโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) นั่นคือ สถานีบางซื่อ-เตาปูน หรือที่ TSS10) โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาว $R_R = 0.0175 \text{ } \Omega/\text{km}/\text{rail}$ แต่การใช้งานจริงทางรถไฟมี 2 ราง

ดังนั้นค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาวมีค่าเป็น $R_{R2rail} = 0.013825 \text{ } \Omega/\text{km}$ ที่ระยะทาง $L = 1.58 \text{ km}$ ค่าความนำต่อหน่วยความยาวมีค่าเป็น $G_{RE} = 2 \text{ mS}/\text{km}$

$$L_c = \frac{1}{\sqrt{G_{RE} \times R_R}} = \frac{1}{\sqrt{0.002 \times 0.013825}} = 190.174$$

$$R_c = \sqrt{\frac{R_R}{G_{RE}}} = \sqrt{\frac{0.013825}{0.002}} = 2.629$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} U_{RE} &= 0.5 \times I_{tr} \times R_c \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_c}\right)}\right) \\ &= 0.5 \times 3426.919 \times 2.629 \times \left(1 - e^{-\left(\frac{1.58}{190.174}\right)}\right) = 37.273 \text{ V} \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} I_s &= 0.5 \times \frac{I}{L_c} \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_c}\right)}\right) \\ &= 0.5 \times \frac{3426.919}{190.174} \times \left(1 - e^{-\left(\frac{1.58}{190.174}\right)}\right) = 0.07455 \text{ mA}/\text{m} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ศักย์ไฟฟ้าที่รางในอัตรา 37.273 V และกระแสรั่วจากทางวิ่งในอัตรา 0.07455 mA/m สำหรับพิกัด 3426.919 A ดังตารางที่ 4.7

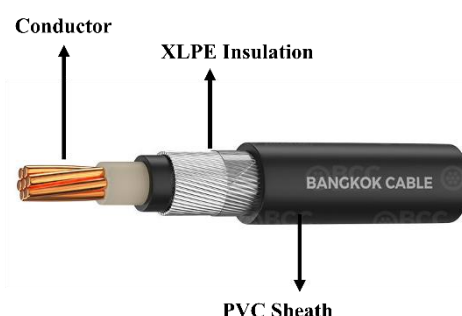
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการประเมินกระแสรั่วไหลระหว่างการจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟขบวนเดียวกับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางที่ได้จากแบบจำลองการต่อลงดินตามมาตรฐาน EN 50122-2

วิธีการ	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง (V)
การจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟขบวนเดียว	70.46
การคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางตามมาตรฐาน EN 50122-2	37.273

จากตารางพบว่าศักย์ไฟฟ้าที่รางมีค่าแตกต่าง เนื่องจากผลการจำลองการเคลื่อนที่รถไฟขบวนเดียวมีกระแสรั่วที่สะสมอยู่ในดินที่ไหลย้อนกลับเข้าสู่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน แต่ค่าทั้งสองกรณีผ่านมาตรฐานตามมาตรฐาน EN 50122-2 ที่กำหนด นั่นคือ แรงดันที่ยอมให้เข้าถึงได้มีค่าไม่เกิน 120 V และแนะนำว่าจะไม่เกิดความเสียหายในทางรถไฟในช่วง 25 ปี ถ้ากระแสรั่วไหลต่อหน่วยความยาวไม่เกินค่า 2.5 mA/m

4.3.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีศึกษาที่ 2 (ระบบ RET-TPS)

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ MRT สายสีม่วงขบวนเดียวในระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับในตำแหน่งต่าง ๆ ที่แตกต่างกันไป โดยเลือกใช้สายเคเบิล 0.6/1kV CV 90°C XLPE INSULATED และ PVC SHEATHED ตามมาตรฐาน IEC 60502-1 (TIS 2143-2546) ดังรูปที่ 4.14 และค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.8 แบ่งการติดตั้งเป็น 5 ระยะ ได้แก่ ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ, 4 จุดเชื่อมต่อ, 5 จุดเชื่อมต่อ, 8 จุดเชื่อมต่อ และ 21 จุดเชื่อมต่อ โดยตำแหน่งจุดเชื่อมต่อทิศทาง North Bound เป็นระยะทางที่พิจารณาต่อเนื่องจากทิศทางของ South Bound



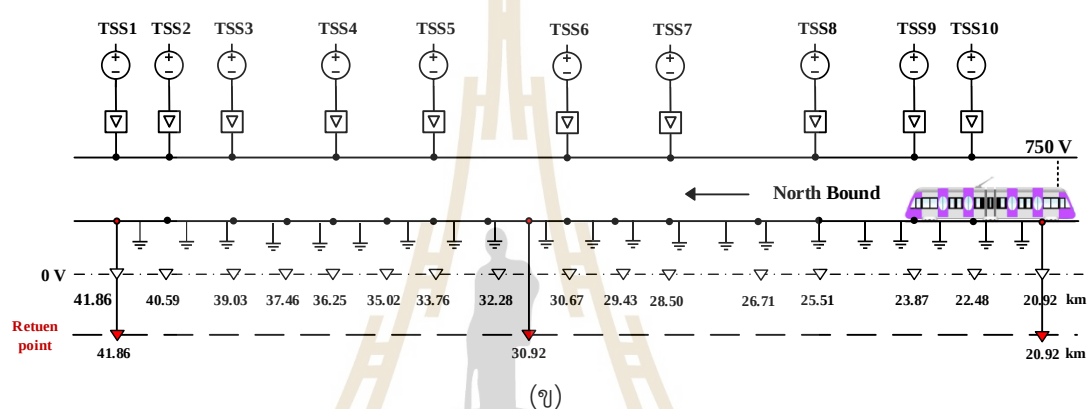
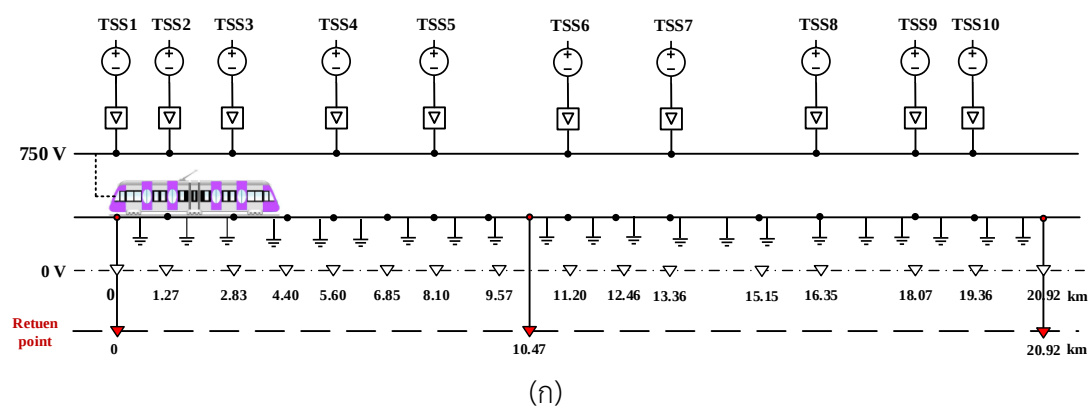
รูปที่ 4.14 เคเบิล XLPE Single core แรงดัน 0.6/1kV

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ของสายเคเบิล

ข้อมูล	ค่า	หน่วย
ระบบ	DC	-
ขนาด	400	mm ²
เส้นผ่านศูนย์กลาง	71	mm ²
การนำกระแส	856	A
ความต้านทาน (R_{DC})	0.0047	Ω/km
ความต้านทาน ขนาน 2 เส้น	0.0235	Ω/km
ความต้านทาน ขนาน 3 เส้น	0.0156	Ω/km

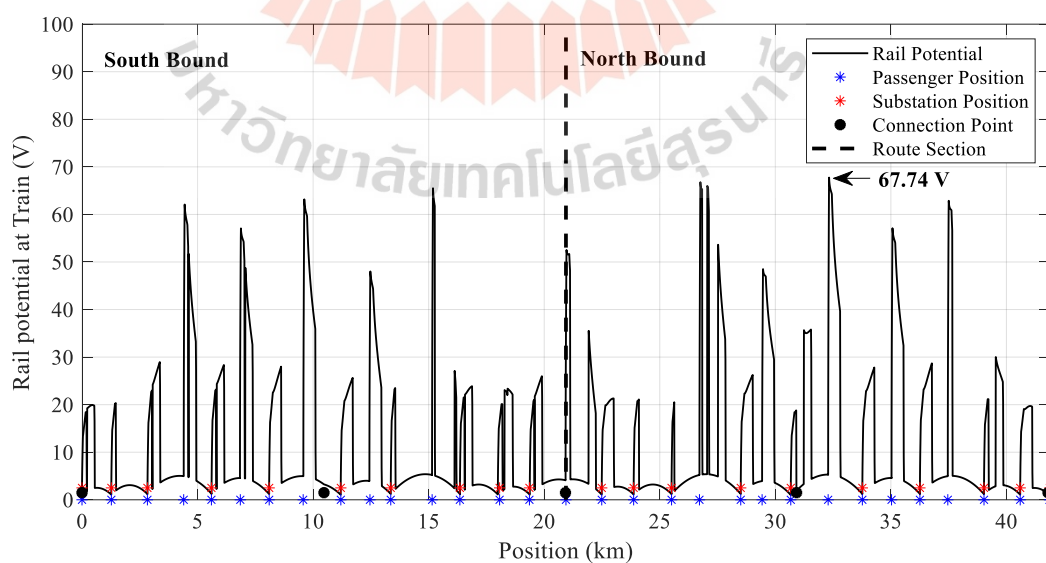
1) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 10 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 10.47, 20.92, 30.92, และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อแสดง ดังรูปที่ 4.15 ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่วางตามตำแหน่งรถไฟฟ้า ดังรูป 4.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร ของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.9 และกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่วาง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.1 ในภาคผนวก ข1.1





รูปที่ 4.15 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound

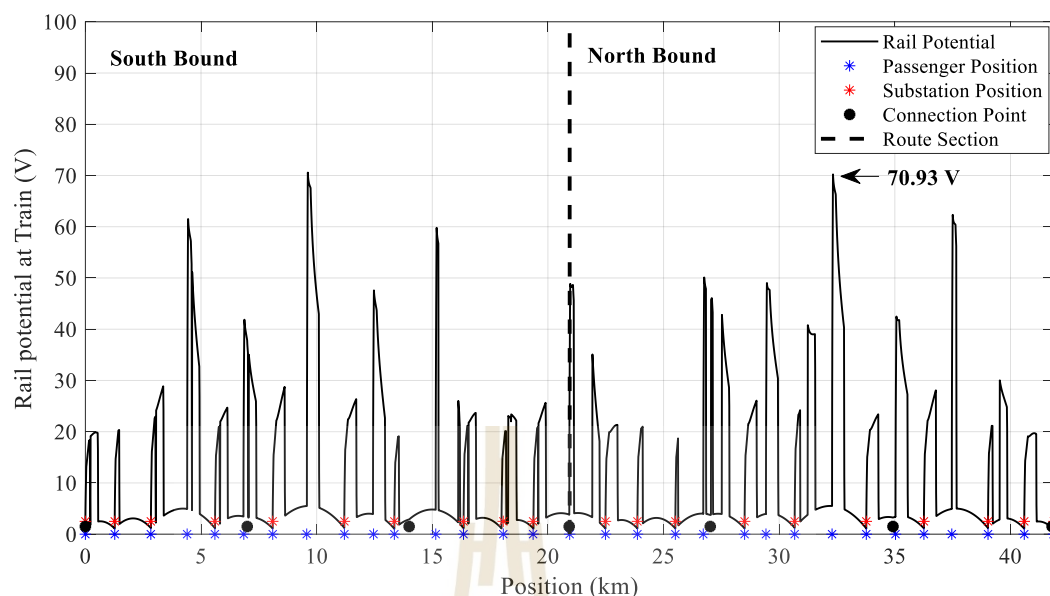


รูปที่ 4.16 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.9 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	19.88	PP15	21.29
PP02	20.33	PP14	20.95
PP03	28.95	PP13	20.51
PP04	62.07	PP12	66.78
PP05	28.34	PP11	26.24
PP06	56.43	PP10	48.5
PP07	27.82	PP09	18.72
PP08	63.16	PP08	67.74
PP09	25.63	PP07	27.66
PP10	47.67	PP06	57.09
PP11	23.33	PP05	28.68
PP12	65.02	PP04	62.86
PP13	23.88	PP03	21.14
PP14	23.28	PP02	19.71
PP15	25.98	PP01	1.04
PP16	52.52	สูงสุด	67.74
เฉลี่ย			35.58
กระแสไฟฟ้ารั่ว (mA/m)			0.00748

2) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 7 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 7, 14, 20.92, 27.92, 34.92 และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อแสดง ดังรูปที่ ข.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่ง ผู้โดยสาร สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.3 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และ ศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.2 ในภาคผนวก ข1.2 ตามลำดับ ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ดังรูปที่ 4.17 ในภาคผนวก ข1.2 ตามลำดับ และศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อ 4 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.10

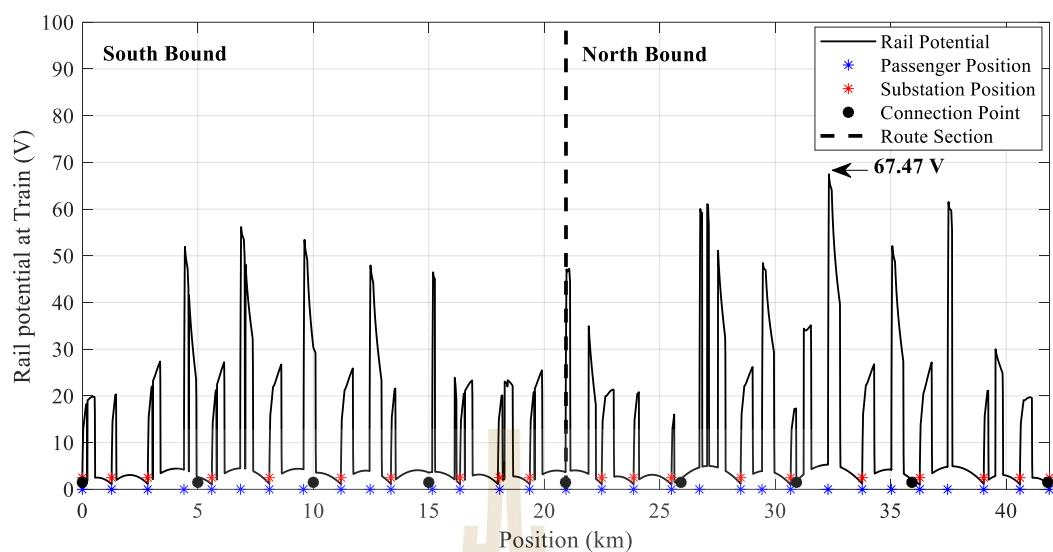


รูปที่ 4.17 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.10 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อ 4 จุดเชื่อมต่อ

4 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	70.93	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	35.55	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.00745	mA/m

3) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 5 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 5, 10, 15, 20.92, 25.92, 30.92, 35.92 และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับแบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อแสดง ดังรูปที่ ข.2 กำลังไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.5 ในภาคผนวก ข.1.3 ตามลำดับ ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ดังรูปที่ 4.18 และศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อ 5 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.11



รูปที่ 4.18 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ

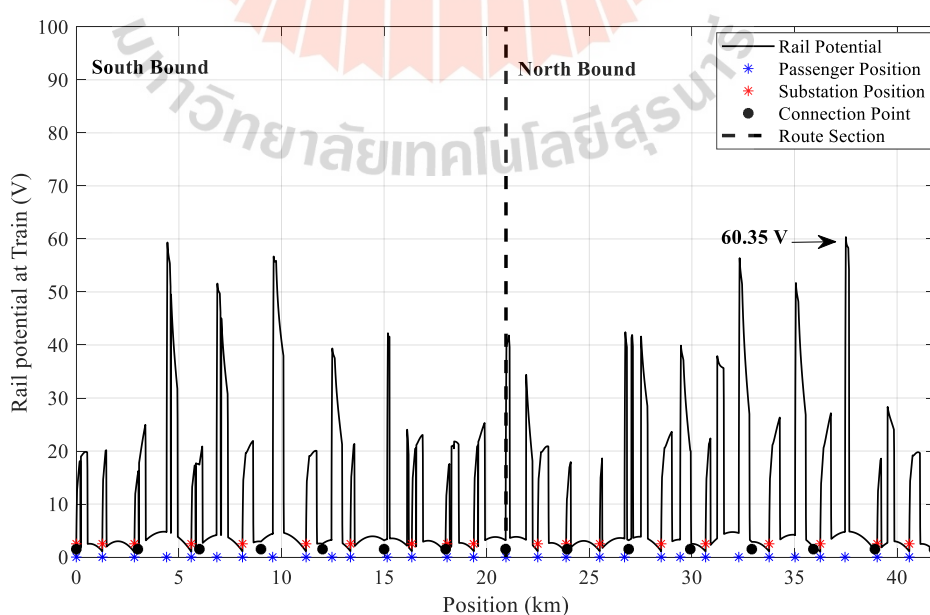
ตารางที่ 4.11 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	19.83	PP15	21.34
PP02	20.34	PP14	20.81
PP03	22.09	PP13	16.03
PP04	51.92	PP12	60.98
PP05	27.20	PP11	26.19
PP06	56.16	PP10	48.45
PP07	26.73	PP09	17.33
PP08	53.43	PP08	67.47
PP09	25.89	PP07	26.77
PP10	47.94	PP06	52.09
PP11	21.60	PP05	27.19
PP12	46.47	PP04	61.53
PP13	23.33	PP03	30.00

ตารางที่ 4.11 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ
ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ (ต่อ)

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP14	23.37	PP02	19.68
PP15	25.48	PP01	1.01
PP16	47.21	สูงสุด	67.47
		เฉลี่ย	33.41
		กระแสไฟฟ้ารั่ว (mA/m)	0.00744

4) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 3 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 20.92, 23.92, 26.92, 29.92, 32.92, 33.92, 35.92, 38.92 และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ ข.3 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหล ดังตารางที่ ข.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.7 ในภาคผนวก ข1.4 ตามลำดับ ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางดังรูปที่ 4.19 และศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วไหลของจุดเชื่อมต่อ 8 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.12

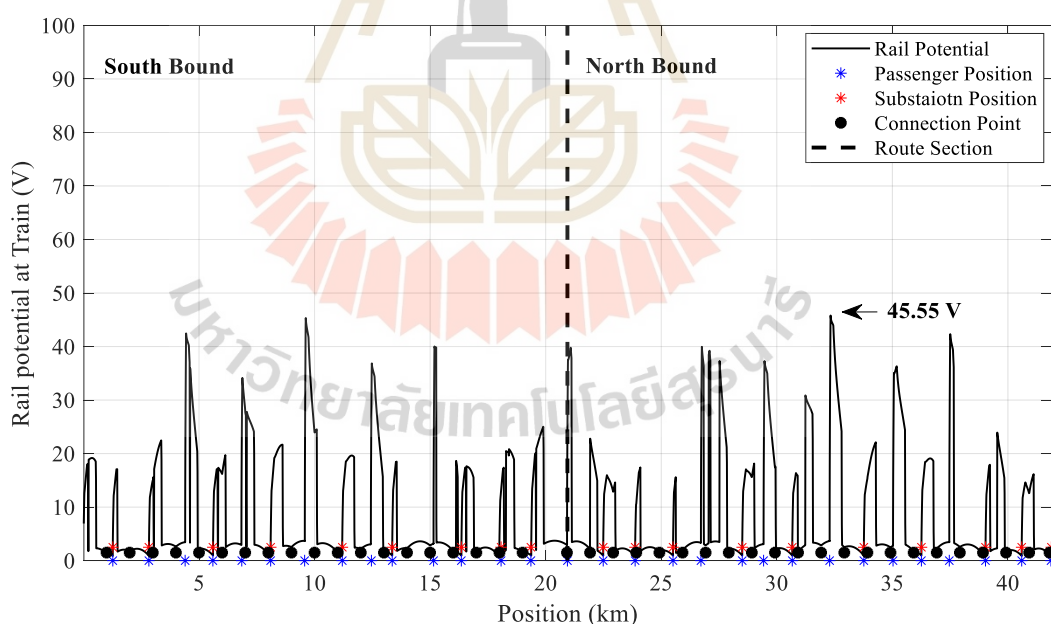


รูปที่ 4.19 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.12 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ
ย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ

8 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	60.35	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	31.19	V
กระแสไฟฟ้ารั่วไหล	0.00741	mA/m

5) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ ที่ระยะทุก ๆ 1 กิโลเมตร แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อแสดงได้ดังรูปที่ ข.4 กำลังไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.8 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.9 ในภาคผนวก ข1.5 ตามลำดับ ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ดังรูปที่ 4.20 และศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อ 21 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.13



รูปที่ 4.20 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.13 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วไหลของจุดเชื่อมต่อ
ตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ

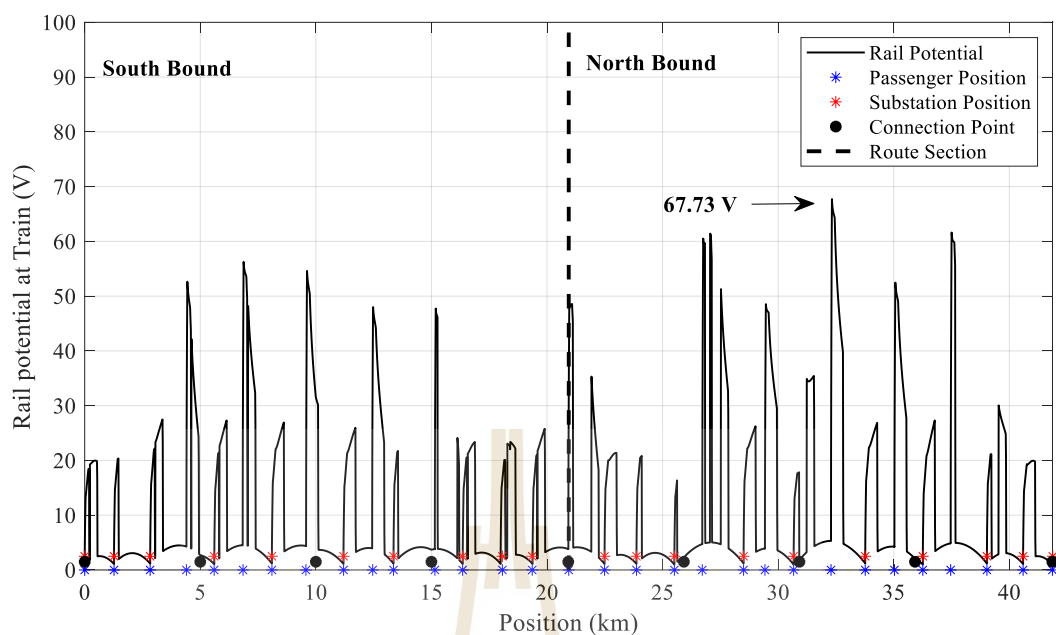
21 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	45.55	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	26.03	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.00711	mA/m

จากตารางที่ 4.9 - ตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.18 – รูปที่ 4.20 แสดงค่า ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อในตำแหน่งต่าง ๆ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดทุกกรณีการศึกษา ยกเว้นการเชื่อมต่อ 8 จุดเชื่อมต่อหรือการติดตั้งทุก ๆ 3 กิโลเมตร ค่าสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีรับ-ส่งผู้โดยสารที่ 8 (PP08) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 และ 5 (TSS06-TSS05) ในทิศทาง North Bound เนื่องจากเป็นสถานีย่อยที่มีระยะห่างจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุด เมื่อเทียบกับระยะห่างของสถานีย่อยอื่น ๆ

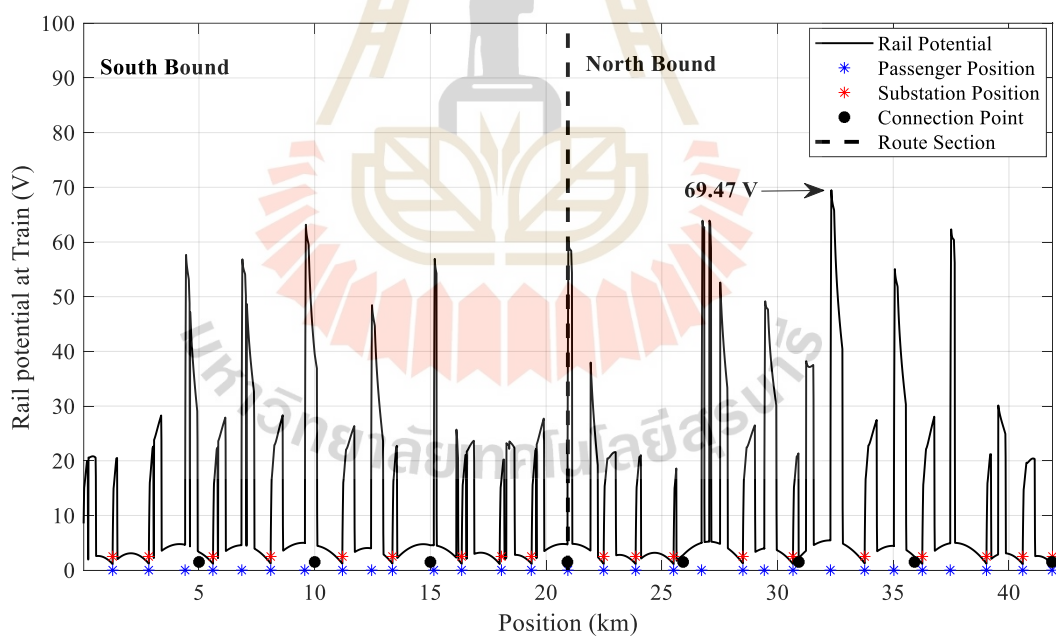
การติดตั้ง 8 จุดเชื่อมต่อหรือการติดตั้งทุก ๆ 3 กิโลเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีย่อยที่ 4 (PP04) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 4 และ 3 (TSS04-TSS03) ในทิศทาง North Bound สำหรับสถานีย่อยนี้ไม่ได้เป็นตำแหน่งที่มีระยะห่างจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน แต่สถานีย่อยอยู่ใกล้เคียงกับจุดเชื่อมต่อ นั่นคือจุดเชื่อมต่อที่ 2 กับจุดเชื่อมต่อ 3 จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้ แตกต่างจากกรณีจุดเชื่อมต่ออื่น ๆ

ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว จะมีแนวโน้ม คือ เมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว จะมีค่าลดลง ตามลำดับ ร้อยละการลดลงเมื่อเทียบกับระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าปกติ จะมีค่าลดลงตามตารางที่ 4.25 ศักยภาพการลดลงของระบบการติดตั้ง

6) กรณีใช้สายเคเบิลที่มีความต้านทานเท่ากับค่าความต้านทานของรางวิ่ง ($R_{RT} = 0.0175 \Omega/\text{km}$) และกรณีใช้สายเคเบิลที่มีความต้านทานมากกว่าค่าความต้านทานของรางวิ่ง ($R_{RT} = 0.047 \Omega/\text{km}$) ใช้กรณีศึกษาเดียวกันกับระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ 5 กิโลเมตร เพื่อศึกษาแนวโน้มของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วไหล ดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 แสดงศักย์ไฟฟ้าที่ราง ตามลำดับ ตารางที่ ข.10 และตารางที่ ข.11 ในภาคผนวก ข.1.6 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณกระแสไฟฟ้ารั่วทั้ง 2 กรณีการเปลี่ยนค่าความต้านทานรางตัวนำย้อนกลับ



รูปที่ 4.21 ศักย์ไฟฟ้าที่ราง ใช้สายเคเบิลค่าความต้านทานเท่ากับรางวิ่ง



รูปที่ 4.22 ศักย์ไฟฟ้าที่ราง ใช้สายเคเบิลค่าความต้านทานมากกว่ารางวิ่ง

ตารางที่ 4.14 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ
ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ ($R_{RT} = 0.0175 \text{ } \Omega/\text{km}$)

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	19.96	PP15	21.38
PP02	20.36	PP14	20.83
PP03	27.48	PP13	16.35
PP04	52.63	PP12	61.30
PP05	27.29	PP11	26.23
PP06	56.25	PP10	48.54
PP07	26.93	PP09	35.43
PP08	54.60	PP08	67.73
PP09	25.95	PP07	26.86
PP10	48.00	PP06	52.47
PP11	21.74	PP05	27.30
PP12	47.73	PP04	61.62
PP13	23.36	PP03	30.01
PP14	23.39	PP02	19.79
PP15	25.75	PP01	1.04
PP16	48.57	สูงสุด	67.73
เฉลี่ย			34.45
กระแสไฟฟ้ารั่ว (mA/m)			0.00745

ตารางที่ 4.15 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ
ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ ($R_{RT} = 0.047 \text{ } \Omega/\text{km}$)

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	20.81	PP15	21.58
PP02	20.51	PP14	21.02
PP03	28.28	PP13	18.59
PP04	57.64	PP12	63.91
PP05	22.89	PP11	26.47
PP06	56.83	PP10	49.16
PP07	28.38	PP09	38.20
PP08	63.15	PP08	69.47
PP09	26.34	PP07	27.45
PP10	48.45	PP06	55.05
PP11	22.73	PP05	28.06
PP12	56.91	PP04	62.31
PP13	23.66	PP03	30.11
PP14	23.53	PP02	20.40
PP15	27.71	PP01	1.12
PP16	60.18	สูงสุด	69.47
เฉลี่ย			36.15
กระแสไฟฟ้ารั่ว (mA/m)			0.00745

จากรูปที่ 4.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของกรณีใช้สายเคเบิลเท่ากับความต้านทานของรางวิ่ง จะเห็นได้ว่าค่าในตารางที่ 4.14 เมื่อเทียบกับค่าในตารางที่ 4.11 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ ในตำแหน่งจุดเชื่อมต่อเดียวกัน แต่ใช้ค่าความต้านทานตัวนำย้อนกลับต่างกัน ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 67.47 V เป็น 67.73 V และค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 33.41 V เป็น 34.45 V และจากรูปที่ 4.24 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของกรณีใช้สายเคเบิลมากกว่าความต้านทานของรางวิ่ง จะเห็นได้ว่าค่าในตารางที่ 4.14 เมื่อเทียบกับค่าในตารางที่ 4.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก

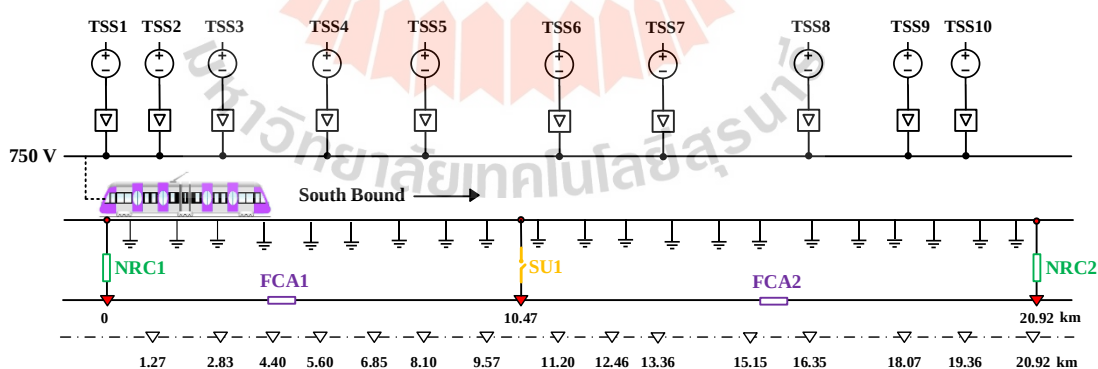
67.47 V เป็น 69.47 V และค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 33.41 V เป็น 36.15 V ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกัน นั่นคือที่ตำแหน่งสถานีรับส่งผู้โดยสารที่ 8 (PP08) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 และ 5 (TSS06-TSS05) ในทิศทาง North Bound

ดังนั้นค่าความต้านทานของสายเคเบิลที่นำมาขนานกับรางจึงมีผลกับศักย์ไฟฟ้าที่รางเนื่องจากพฤติกรรมการไหลกลับของกระแสไฟฟ้าที่รางมักจะเลือกเส้นทางที่ค่าความต้านทานน้อยกว่า ถ้าเลือกใช้ค่าความต้านทานเท่ากับหรือมากกว่าค่าความต้านทานของรางจึง ศักย์ไฟฟ้าที่รางที่ได้จะเพิ่มขึ้น ไม่ตรงกับวัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์นี้ในการลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางนั่นเอง

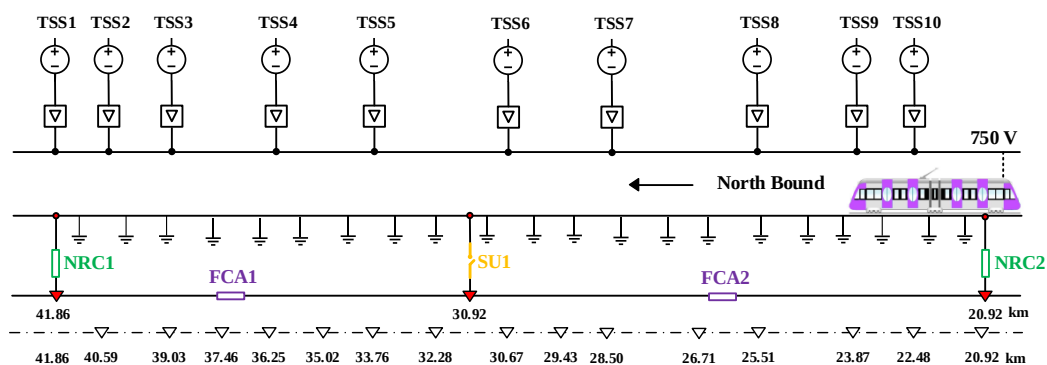
4.3.3 ผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีศึกษาที่ 2 (ระบบ NEG-TPS)

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ MRT สายสีม่วงขบวนเดียวในระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบในตำแหน่งต่าง ๆ ที่แตกต่างกันไป แบ่งการติดตั้งเป็น 5 ระยะ ได้แก่ ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ, 4 จุดเชื่อมต่อ, 5 จุดเชื่อมต่อ, 8 จุดเชื่อมต่อ, และ 21 จุดเชื่อมต่อ

1) ติดตั้งระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 10 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 10.47, 20.92, 30.92, และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับแบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อแสดง ดังรูปที่ 4.23 ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ดังรูปที่ 4.24 และค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.16 และกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ค.1 ในภาคผนวก ค1.1



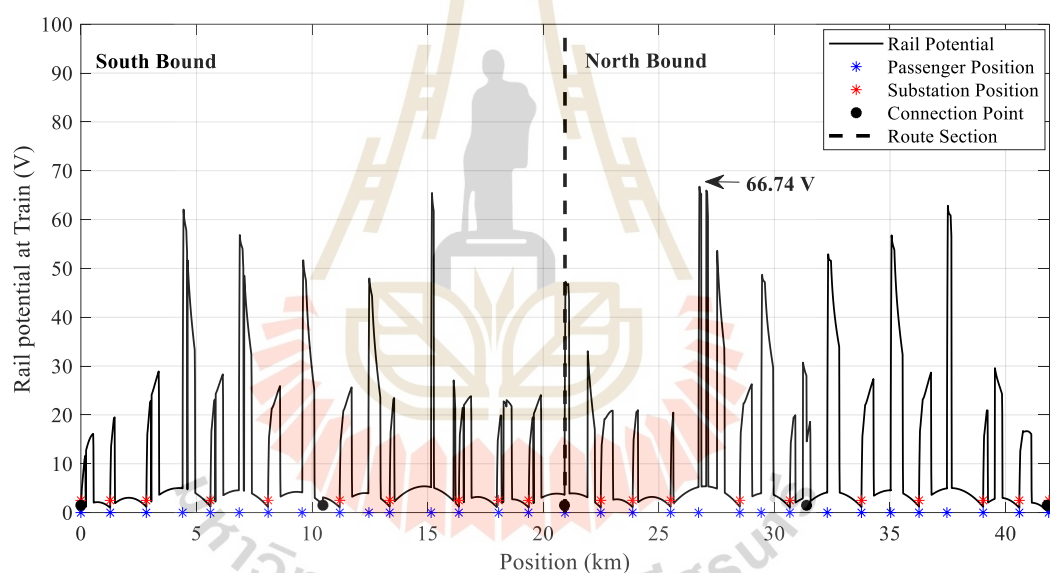
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.23 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound



รูปที่ 4.24 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ

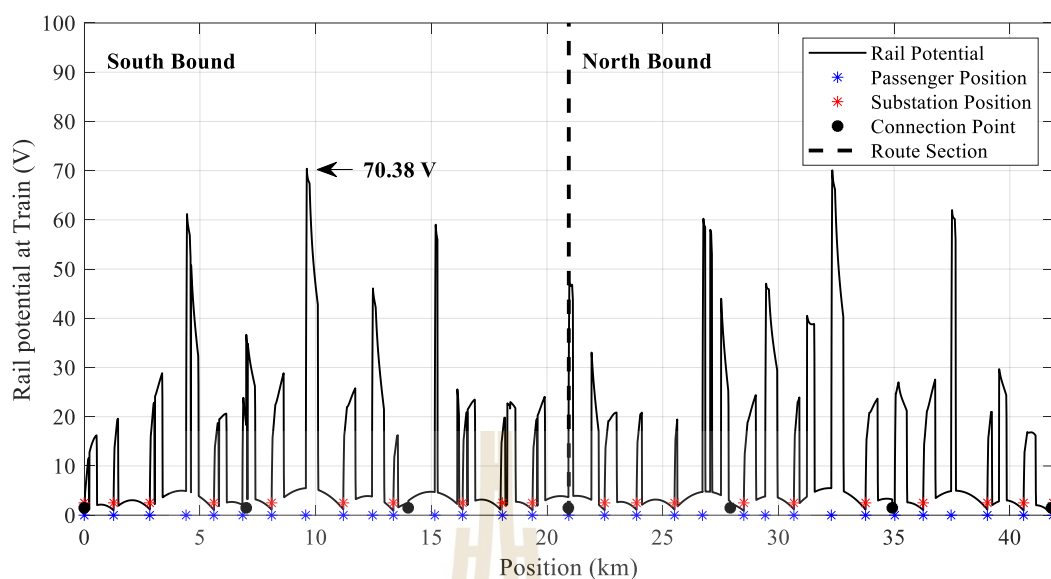
ตารางที่ 4.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	16.13	PP15	20.88
PP02	19.50	PP14	20.98
PP03	28.91	PP13	20.48
PP04	62.05	PP12	66.74

ตารางที่ 4.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ (ต่อ)

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP05	28.30	PP11	26.29
PP06	56.84	PP10	48.69
PP07	25.92	PP09	30.72
PP08	51.67	PP08	52.89
PP09	25.64	PP07	27.04
PP10	47.95	PP06	56.77
PP11	23.47	PP05	28.67
PP12	65.45	PP04	62.82
PP13	23.83	PP03	29.57
PP14	23.04	PP02	16.71
PP15	24.06	PP01	0.29
PP16	47.28	สูงสุด	66.74
		เฉลี่ย	35.56
		กระแสไฟฟ้ารั่ว (mA/m)	0.00747

2) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 7 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 7, 14, 20.92, 27.92, 34.92 และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับแบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อ ดังรูปที่ ค.1 และผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ดังรูปที่ 4.25 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ค.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ค.3 ในภาคผนวก ค1.2 ตามลำดับ และศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อ 4 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.17

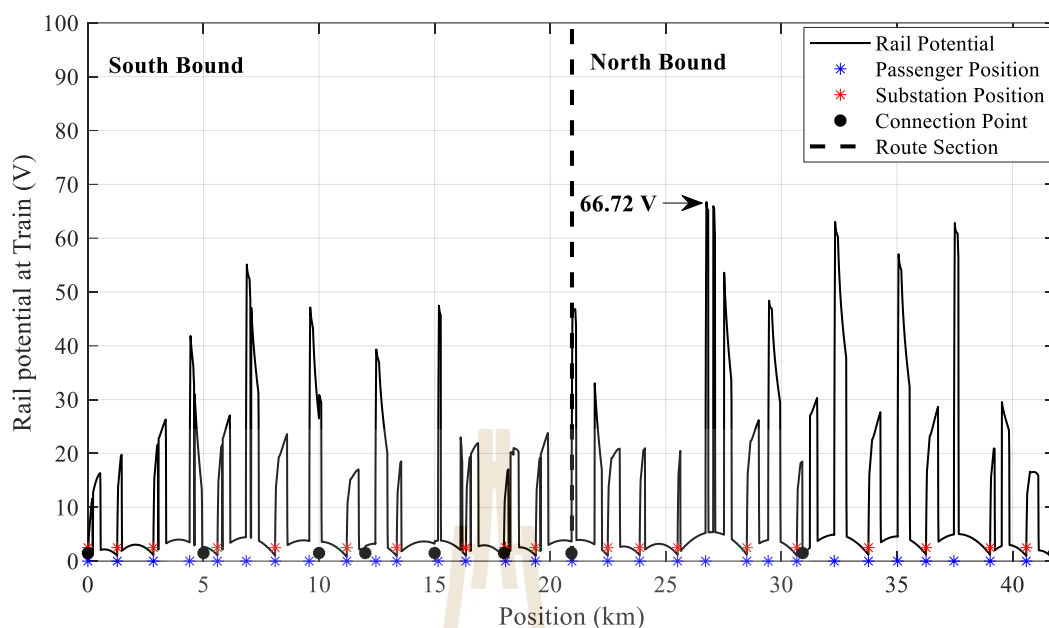


รูปที่ 4.25 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.17 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อ

4 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	70.38	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	32.93	V
กระแสไฟฟ้ารั่วไหล	0.00746	mA/m

3) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 5 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 5, 10, 15, 20.92, 25.92, 30.92, 35.92 และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ ดังรูปที่ ค.2 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ค.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีย่อย สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ค.5 ในภาคผนวก ค.1.3 ตามลำดับ ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางได้ดังรูปที่ 4.26

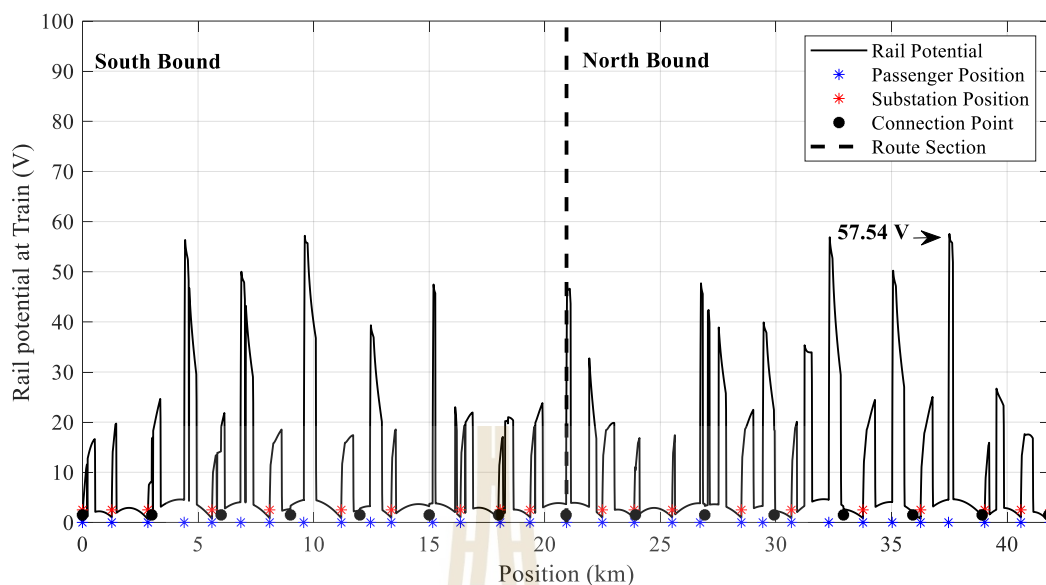


รูปที่ 4.26 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.18 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ

5 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	66.72	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	32.29	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.00746	mA/m

4) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 3 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 20.92, 23.92, 26.92, 29.92, 32.92, 33.92, 35.92, 38.92 และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ ดังรูปที่ ค.3 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่รางสำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว แสดงดังตารางที่ ค.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีย่อยสำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ค.7 แสดงในภาคผนวก ค1.4 ตามลำดับ และผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางตามตำแหน่งรถไฟ ดังรูปที่ 4.27

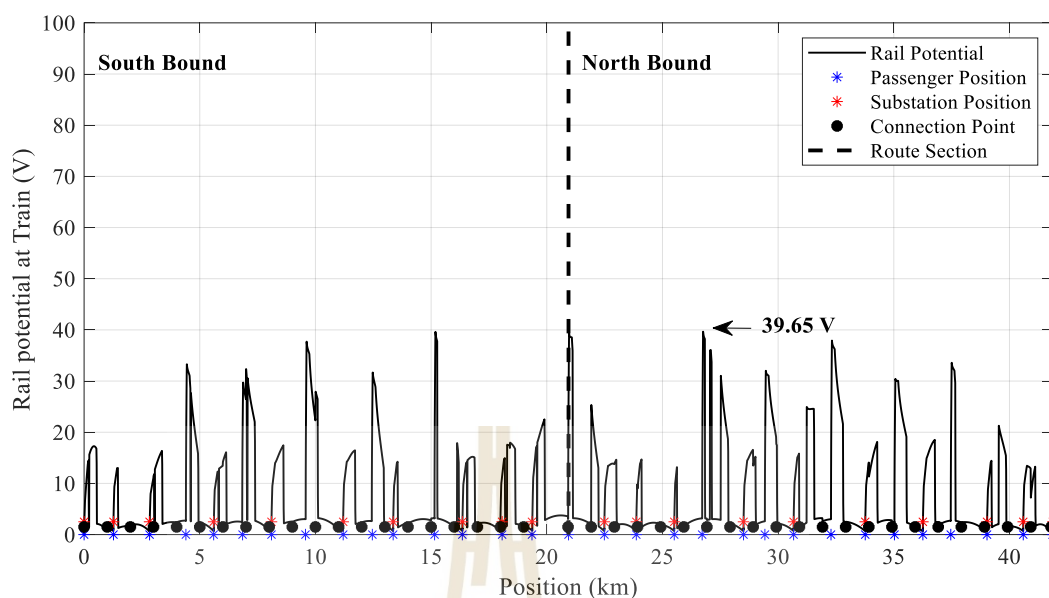


รูปที่ 4.27 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.19 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ

8 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	57.54	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	30.20	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.00746	mA/m

5) ติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ ที่ระยะทุก ๆ 1 กิโลเมตร แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ ดังรูปที่ ค.4 กำลังไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ค.8 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีย่อย สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ค.9 ในภาคผนวก ค1.5 ตามลำดับ และผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ดังรูปที่ 4.28 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.20 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ

21 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	39.65	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	22.89	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.0733	mA/m

จากตารางที่ 4.16 - ตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.24 - รูปที่ 4.28 ที่กล่าวมาข้างต้น แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อในตำแหน่งต่าง ๆ พบว่าการติดตั้ง 3, 4 และ 21 จุดเชื่อมต่อ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 12 (PP12) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 8 และ 7 (TSS08-TSS07) ในทิศทาง North Bound สำหรับสถานีย่อยนี้ไม่ได้เป็นตำแหน่งที่มีระยะห่างจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุด แต่สถานีย่อยนี้มีระยะห่างกับจุดเชื่อมต่อมากกว่า จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้

การติดตั้ง 4 จุดเชื่อมต่อหรือการติดตั้งทุก ๆ 7 กิโลเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีย่อยที่ 8 (PP08) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 และ 5 (TSS06-TSS05) ในทิศทาง South Bound เนื่องจากเป็นสถานีย่อยที่มีระยะห่างจากสถานี

จ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุด ทิศทางการเดินรถต่างกับของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ เนื่องจากค่าสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น แรงเกรเดียนต์ของสองทิศทางที่ตรงข้ามกัน

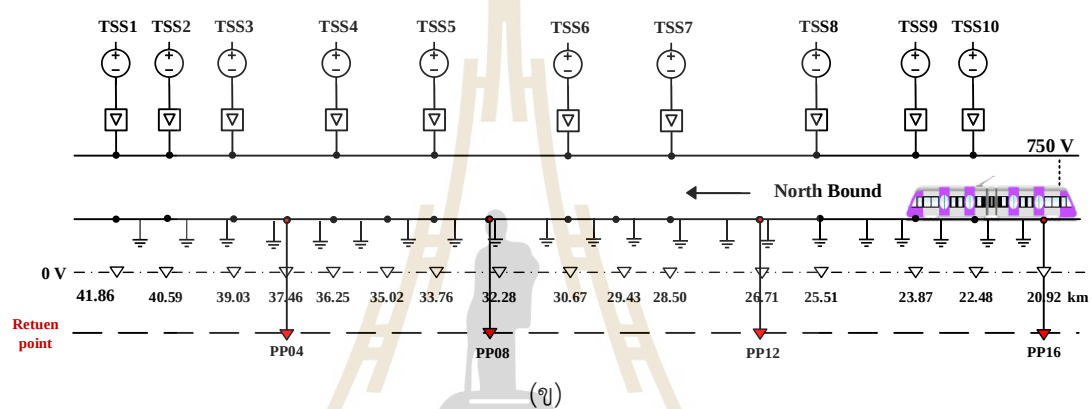
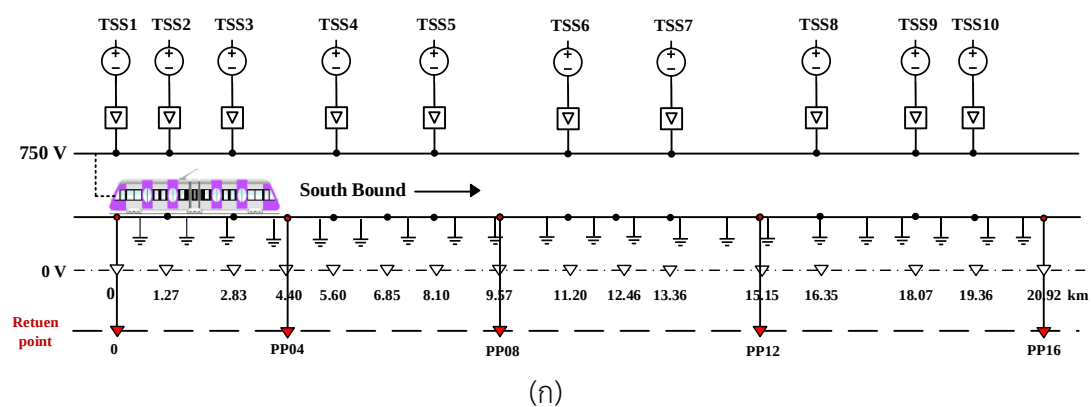
การติดตั้ง 8 จุดเชื่อมต่อหรือการติดตั้งทุก ๆ 3 กิโลเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีย่อยที่ 4 (PP04) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 4 และ 3 (TSS04-TSS03) ในทิศทาง North Bound เช่นเดียวกันกับระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ นั่นคือ สถานีย่อยอยู่ใกล้เคียงกับจุดเชื่อมต่อ นั่นคือจุดเชื่อมต่อที่ 2 กับจุดเชื่อมต่อ 3 จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้ แตกต่างจากกรณีจุดเชื่อมต่ออื่น ๆ

ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว จะมีแนวโน้ม คือ เมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว จะมีค่าลดลง ตามลำดับ เพอร์เซ็นต์การลดลงระบบการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบเมื่อเทียบกับระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าปกติ จะมีค่าลดลงตามตารางที่ 4.25 แสดงศักยภาพการลดลงของระบบการติดตั้ง

4.3.4 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าย่อย

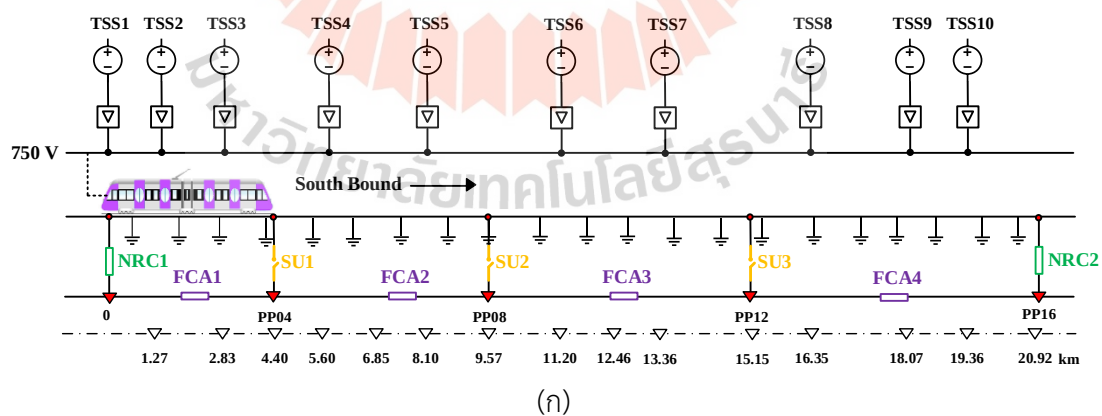
1) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับและตัวแปลงความต้านทานเชิงลบที่สถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ ได้แก่ ที่ตำแหน่ง PP04, PP08, PP12 และ PP16 ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ ดังรูปที่ 4.29 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.13 ในภาคผนวก ข2.1 ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ ดังรูปที่ 4.30 ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับ ดังรูปที่ 4.31 และผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ ดังรูปที่ 4.32

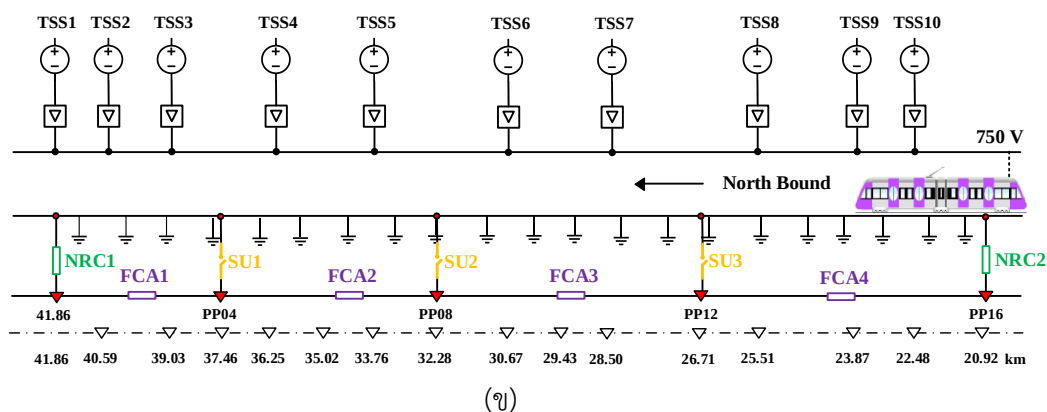
กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.13 ในภาคผนวก ข2.1 ตามลำดับ ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ ดังตารางที่ 4.21 และศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ ดังตารางที่ 4.22



รูปที่ 4.29 แบบจำลองการติดตั้งตัวนำย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ

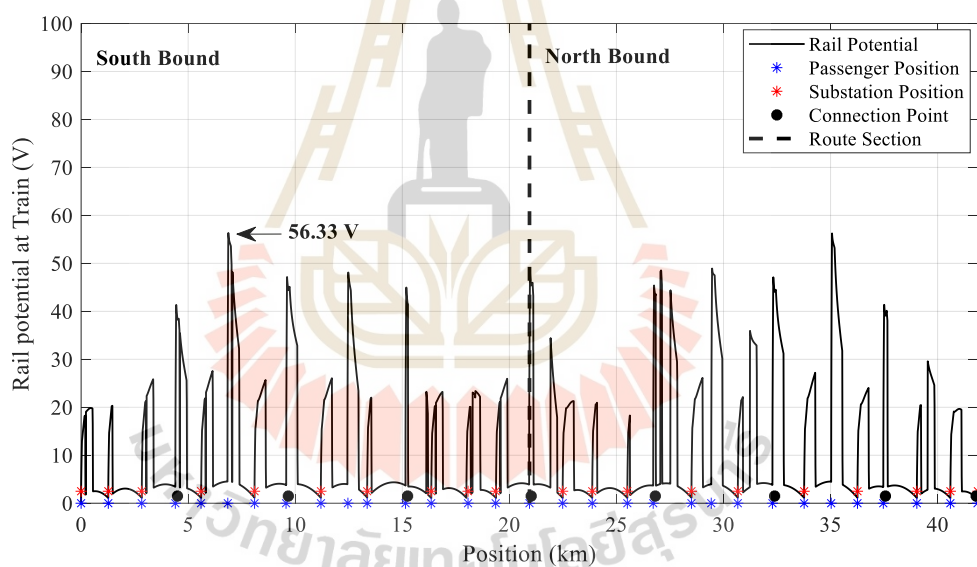
(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound



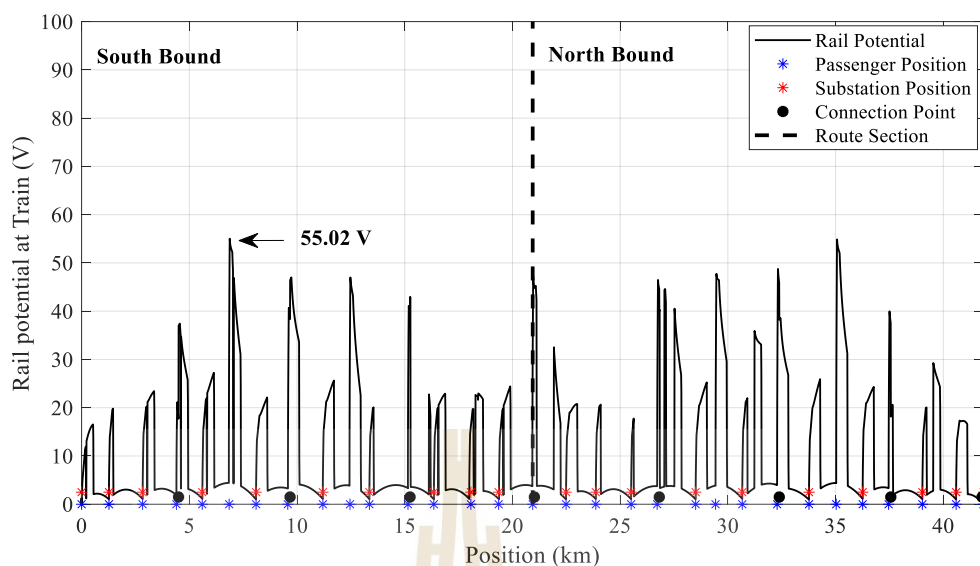


รูปที่ 4.30 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุด
เชื่อมต่อ

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound



รูปที่ 4.31 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ



รูปที่ 4.32 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.21 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ

4 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	56.33	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	31.99	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.0746	mA/m

ตารางที่ 4.22 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ

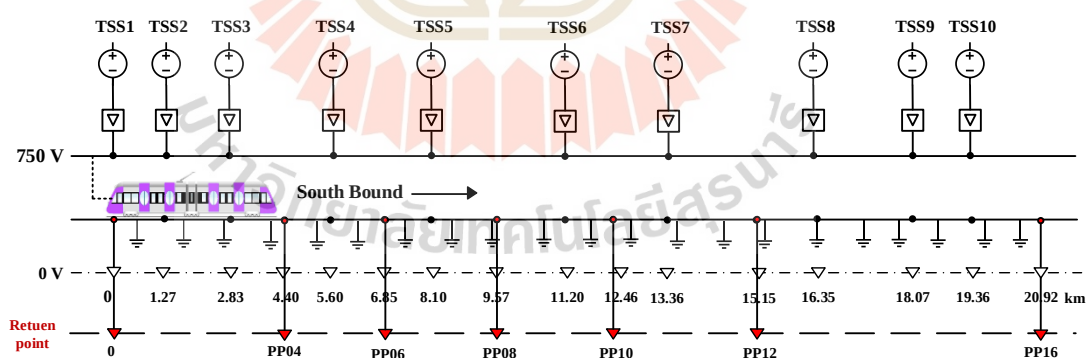
4 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	55.02	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	30.84	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.0746	mA/m

จากตารางที่ 4.21, ตารางที่ 4.22, รูปที่ 4.31 และรูปที่ 4.32 ที่กล่าวมาข้างต้น แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อในตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 6

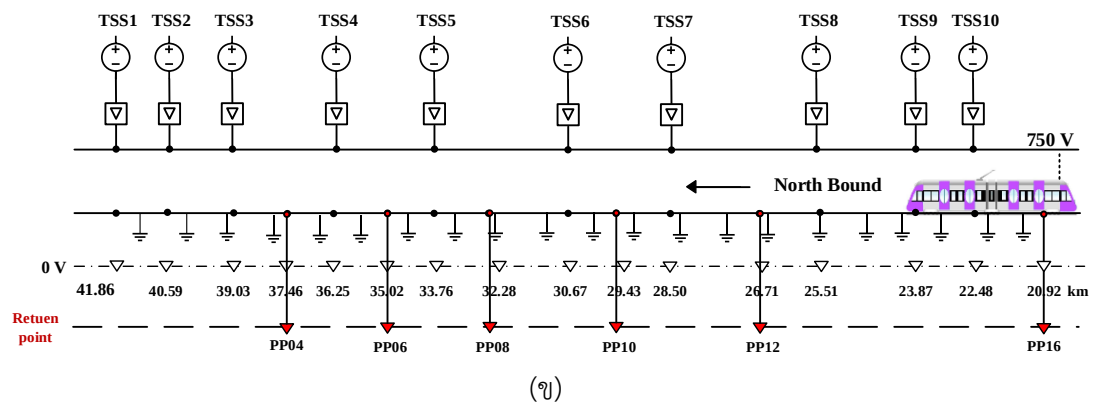
(PP06) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 4 และ 5 (TSS04-TSS05) ในทิศทาง North Bound สำหรับสถานีย่อยนี้เป็นตำแหน่งที่มีระยะห่างจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุด จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้

2) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับที่สถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ ได้แก่ ที่ตำแหน่ง PP04, PP06, PP08, PP10, PP12 และ PP16 ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ แสดงได้ดังรูปที่ 4.33 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหล แสดงดังตารางที่ ข.14 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย แสดงดังตารางที่ ข.15 แสดงในภาคผนวก ข.2.2 ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ ดังรูปที่ 4.34 ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับ ดังรูปที่ 4.35 และผลการจำลองศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ ดังรูปที่ 4.36

กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.14 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.15 ในภาคผนวก ข.2.2 ตามลำดับ ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ ดังตารางที่ 4.23 และศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ ดังตารางที่ 4.24

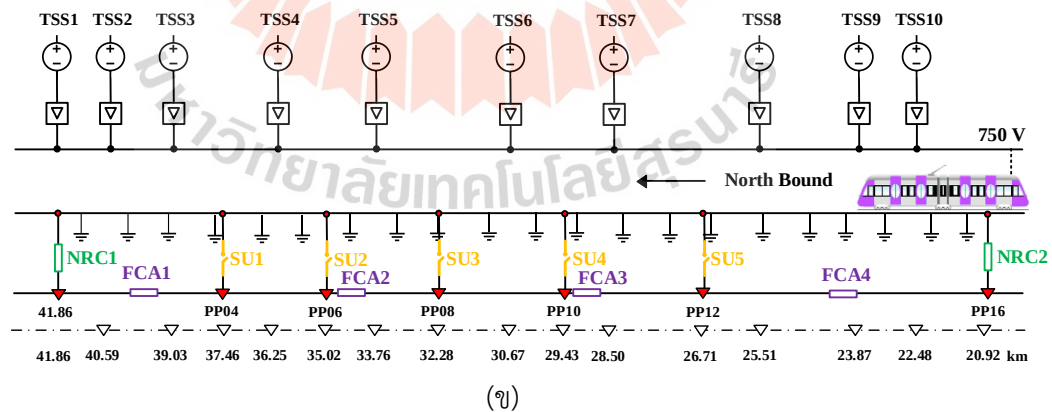
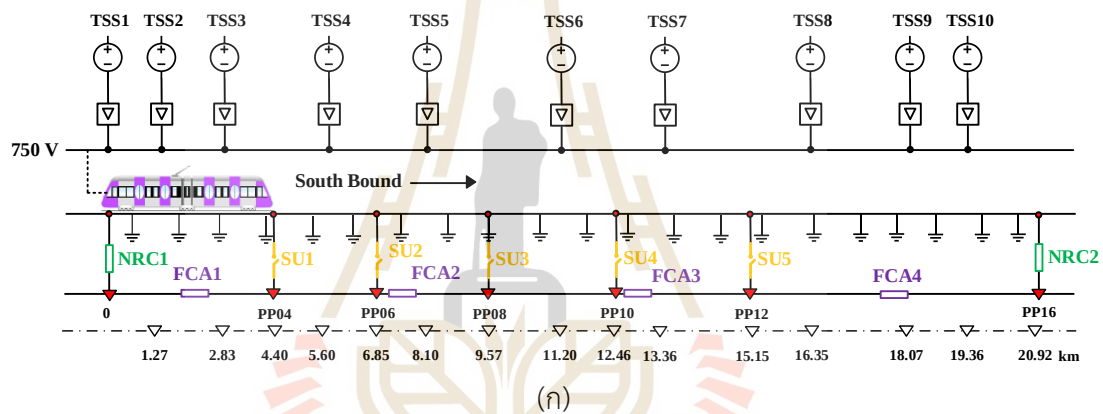


(ก)



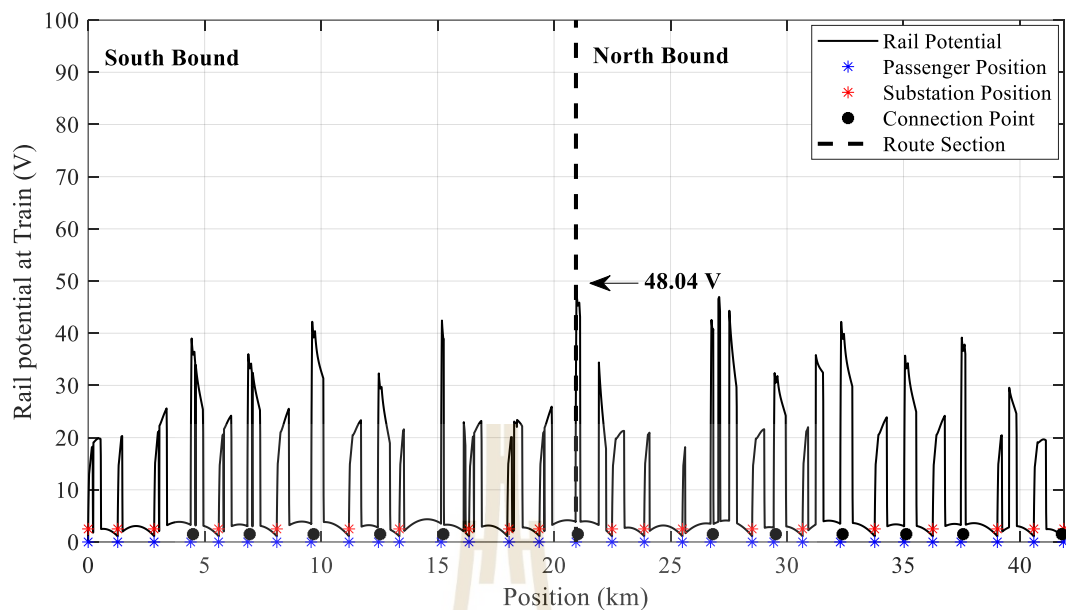
รูปที่ 4.33 แบบจำลองการติดตั้งตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound

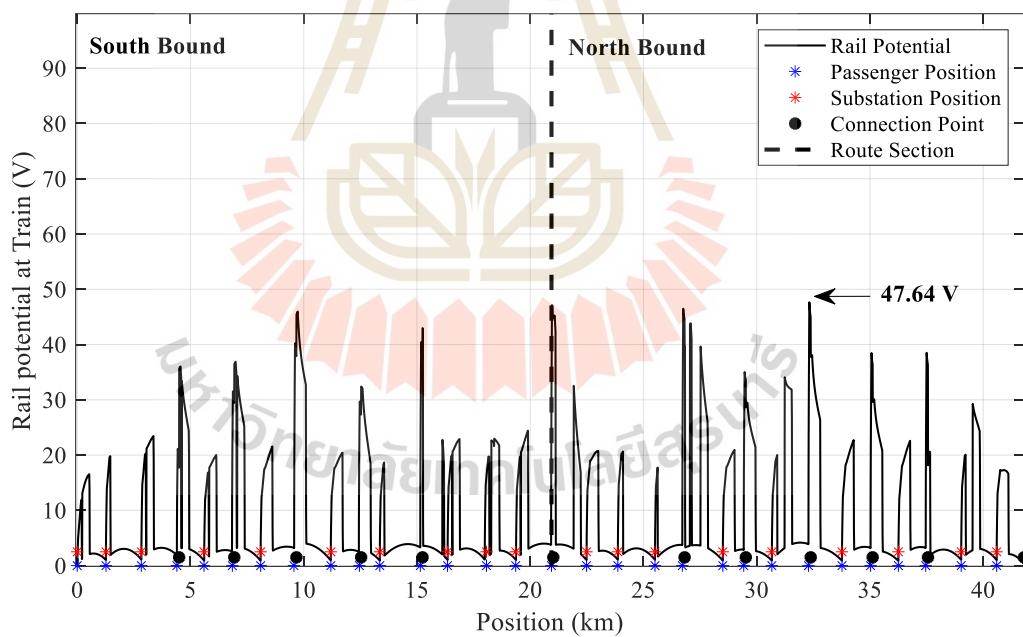


รูปที่ 4.34 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound



รูปที่ 4.35 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ



รูปที่ 4.36 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.23 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ
ย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ

6 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	48.04	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	28.55	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.0746	mA/m

ตารางที่ 4.24 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัว
แปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ

6 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	47.64	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	27.85	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.0746	mA/m

จากตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.35 ที่กล่าวมาข้างต้น แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับจุดเชื่อมต่อในตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 16 (PP16) เป็นตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อยสุดท้ายสำหรับเส้นทาง ไม่มีสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน สำหรับสถานีย่อยนี้เป็นตำแหน่งที่มีระยะห่างจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 10 (TSS10) หรือเป็นการจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนด้านเดียว จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้

จากตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.36 ที่กล่าวมาข้างต้น แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบจุดเชื่อมต่อในตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 8 (PP08) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 และ 5 (TSS06-TSS05) ในทิศทาง South Bound สำหรับสถานีย่อยนี้เป็นตำแหน่งที่มีระยะห่างจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุด จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้

4.4 ผลการประเมินการลดลงของระบบการติดตั้งเพิ่มจุดเชื่อมต่อกับรางวิ่ง

จากกรณีศึกษาทั้งหมดของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับและระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ ทั้งหมด 5 ระยะการเชื่อมต่อ และการติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าย่อย สามารถสรุปผลการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 ศักยภาพการลดลงของระบบการติดตั้ง

	จุดเชื่อมต่อ	ศักย์ไฟฟ้าที่ราง (V)		กระแส ไฟฟ้ารั่ว (mA)	ศักย์ภาพการลดลง (%)		
		สูงสุด	เฉลี่ย		ศักย์ไฟฟ้า ที่รางสูงสุด	ศักย์ไฟฟ้า ที่รางเฉลี่ย	กระแส ไฟฟ้ารั่ว
TRA-TPS		70.46	37.13	0.00757	Base	Base	Base
RET- TPS	3 จุดเชื่อมต่อ	67.74	35.58	0.00748	3.86	4.17	1.19
	4 จุดเชื่อมต่อ	70.93	35.55	0.00745	0.67	4.26	1.58
	5 จุดเชื่อมต่อ	67.47	33.41	0.00744	4.24	10.02	1.72
	8 จุดเชื่อมต่อ	60.35	31.19	0.00741	14.35	16.00	2.11
	21 จุดเชื่อมต่อ	45.55	26.03	0.00711	35.35	29.89	6.08
	สถานีย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ	56.33	31.99	0.00746	20.05	13.84	1.45
	สถานีย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ	48.04	28.55	0.00746	31.82	23.11	1.45
NEG- TPS	3 จุดเชื่อมต่อ	66.74	35.56	0.00747	3.86	4.23	1.32
	4 จุดเชื่อมต่อ	70.38	32.93	0.00746	0.11	11.31	1.45
	5 จุดเชื่อมต่อ	66.72	32.29	0.00746	5.31	13.04	1.45
	8 จุดเชื่อมต่อ	57.54	30.20	0.00746	18.34	18.66	1.45
	21 จุดเชื่อมต่อ	39.65	22.89	0.00733	43.73	38.35	3.17
	สถานีย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ	55.02	30.84	0.00746	21.91	16.94	1.45
	สถานีย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ	47.64	27.85	0.00746	32.39	24.99	1.45

จากตารางที่ 4.25 แสดงประสิทธิภาพการลดลงของระบบการติดตั้งทุกระบบศึกษา พบว่า สำหรับการติดตั้งจุดเชื่อมต่อในกรณีที่เชื่อมต่อด้วยระยะทางเท่า ๆ กันทุกจุด ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและ กระแสไฟฟ้ารั่ว จะแปรผันตรงกับจำนวนจุดเชื่อมต่อ นั่นคือถ้าเชื่อมต่อด้วยจำนวนจุดเชื่อมต่อที่มากขึ้น ค่าศักยภาพการลดลงจะมากขึ้นด้วยเช่นกัน และการติดตั้งที่จุดปัญหาต้นเหตุ คือ ที่ระยะรถไฟ ออกจากสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร ถ้ามีการติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่จุดนี้ด้วยจำนวนจุดเชื่อมต่อที่ไม่มากไป ก็ จะสามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน

4.4 สรุป

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ MRT สายสีม่วงเหนือที่มีการเดินรถจริงแล้วในปัจจุบัน จากผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการประเมินศักย์ไฟฟ้าที่ราง ความต้องการกำลังไฟฟ้า ของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กำลังงานสูญเสียและแรงดันไฟฟ้าของรถไฟระหว่างการเดินทางที่ของ รถไฟฟ้าขบวนเดียว นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการจำลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบทาง รถไฟโดยคำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าที่ราง แรงดันไฟฟ้าในโครงสร้างโลหะ และยังสามารถศึกษาเพิ่มเติมเพื่อ ศึกษากระแสไฟฟ้ารั่วได้

จากผลการประเมินการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วของวิธีการติดตั้ง อุปกรณ์เสริมเข้าไปในระบบรถไฟ MRT สายสีม่วงเหนือภายในระบบปกตินำผ่านการต่อลงดินสองชั้น ด้วยระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับและระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ สามารถสรุปได้ว่ามี หลายปัจจัยในการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับศักยภาพการลดลง ไม่ว่าจะเป็นการเลือกสายเคเบิลที่มีความต้านทานภายในหรือตำแหน่งการเชื่อมต่อที่เพิ่มเข้าไปในระบบปกติ

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดกระแสรั่วภายในราง ส่งผลให้เกิดการสึกหรอของโครงสร้างโลหะและความปลอดภัยของบุคคลที่สาม โดยพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงและพัฒนาวิธีการลดค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีการติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ ซึ่งเป็นวิธีการลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว ภายใต้วิธีติดตั้งอุปกรณ์เสริม NRCs, FCAs และ Sus โดยการแบ่งรางเป็นส่วนต่าง ๆ โดยเป็นเส้นทางที่สั้นกว่าของกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับ เพื่อให้ได้ผลรวมแรงดันไฟฟ้าในรูปเป็นศูนย์ตามอุดมคติ ด้วยโปรแกรม MATLAB นำมาทดสอบและประเมินผลการทดสอบ โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบแบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีรถไฟฟ้า MRT เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ประกอบด้วยรถไฟฟ้า 1 ขบวนวิ่งบนรางวิ่งและมีสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน 3 สถานีอยู่ที่ตำแหน่ง 0, 5 และ 10 กิโลเมตร ตามลำดับ และระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงสายสีม่วงที่ให้บริการในเขตกรุงเทพมหานครและจังหวัดนนทบุรี โดยเปรียบเทียบการทดสอบการติดตั้งที่ตำแหน่ง 1, 3, 5, 7, 10 กิโลเมตรตามลำดับ ด้วยระบบปกติ ระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ และระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ จากการทดสอบพบว่ากรณีระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ สามารถช่วยลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วได้สูงสุด 91.28% ในกรณีเคลื่อนที่ด้วยรถไฟฟ้า MRT สายสีม่วงเหนือความเร็วคงที่ และลดได้ 32.39% ที่กรณีเมื่อเทียบกับกรณีปกติในการเดินรถของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีม่วง สามารถสรุปได้ว่าวิธีการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ เป็นวิธีการใหม่ที่สามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาระยะการทดสอบในระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับและระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบด้วยระยะที่เท่า ๆ กัน โดยไม่ได้พิจารณาด้วยการหาระยะที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) และการติดตั้งอุปกรณ์เสริมที่ไม่ได้คำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการติดตั้งของจำนวนอุปกรณ์ จึงทำให้เมื่อเทียบการลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วเทียบกับค่าใช้จ่ายมีความไม่เหมาะสมกับการนำไปติดตั้งจริงที่ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีม่วง เพื่อให้มีความ

ละเอียด สมจริง และมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น ควรมีการพิจารณาระยะในการติดตั้งตัวนำย้อนกลับ และระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดและคำนึงถึงค่าใช้จ่าย ในตัวอุปกรณ์เสริม ในลำดับต่อไป



รายการอ้างอิง

- ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2557). ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (Railway Electrification). เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นคร จันทศร. (2559). ช่างรถไฟ **ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ. โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของประเทศไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 3.**
- T. Chuchit. (2018). Study and assessment of stray current in DC rapid transit system. **Thesis, electeical engineering, suranaree university of technology.** pp. 79-87.
- Paul, Dev. (2015). DC stray current in rail transit systems and cathodic protection [History]. **IEEE Industry Applications Magazine 22.1.** pp. 8-13.
- Pham, Kinh D., Ralph S. Thomas, and WALTER E. STINGER JR. (2003). Operational and safety considerations for light rail DC traction electrification system design. **Experience, Economics, and Evolution.** pp. 650.
- EN 50122-1. (2011). Railway applications – Fixed installation – **Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 1:** Protective provisions against electric shock.
- EN 50122-2. (2010). Railway applications – Fixed installation – **Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 2:** Provisions against the effects of stray current caused by DC traction systems.
- Dekker, N. M. J. (1999). Stray current control-an overview of options. pp. 8.
- Gu, Jingda, et al. (2020). Negative resistance converter traction power system for reducing rail potential and stray current in the urban rail transit. **IEEE Transactions on Transportation Electrification 7.1.** pp. 225-239.
- T. Kulworawanichpong. (2015). Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton–Raphson method. **Journal of Modern Transportation 23.4.** pp. 241-251.

- Steimel A. (2008). Electric traction—motive power and energy supply: basic and practical experiences. **Oldenbourg Industrieverlag, Munich.**
- K. Mongkoldee, U. Leeton and T. Kulworawanichpong. (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.** pp. 7-12.
- 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).** pp. 148 – 154.
- Kulworawanichpong, T. (2003). Optimising AC electric railway power flows with power electronic control. **PhD Thesis. University of Birmingham. UK. November.**
- Yii-Shen Tzeng and Chien-Hsing Lee. (2010). Analysis of Rail Potential and Stray Currents in a Direct-Current Transit System. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY,** VOL. 25, NO. 3.
- 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).** pp. 11941 – 1947.
- 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.** pp. 1 – 5.
- Valero Rodríguez 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).** pp. 31 – 40.
- Ramos G., Leal A.F., Ríos M.A., and Roa, L.F. (2014). Grounding Model in Multi-Train DC Traction Systems. **Latin America Transactions. IEEE Latin America Transactions.** **12(2).** pp. 169–175.
- Dev Paul. (2016). DC stray current in rail transit systems and cathodic protection. **IEEE Industry Applications Magazine,** vol. 22, no. 1, Jan.-Feb. pp. 813.
- G L. Zhao, J. Li and M. Liu. (2016). Simulation and analysis of metro stray current based on multi-locomotives condition. in **35th Chinese Control Conference (CCC).** pp. 9252-9258.

- A. Ibrahim, A. Elrayyah, Y. Sozer and J. A. D. Abreu-Garcia. (2017). DC railway system emulator for stray current and touch voltage prediction. **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 53, no. 1. pp. 439-446.
- Zhan Shang, Xiaofeng Yang, Jingda Gu, Trillion Q. Zheng. (2020). Modeling of Negative Resistance Converter Traction Power System. **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**.
- M. Niasati and A. Gholami. (2008). Overview of stray current control in DC railway systems. in Proc. **IET Int. Conf. Railway Eng. (ICRE)**. pp. 1–6.



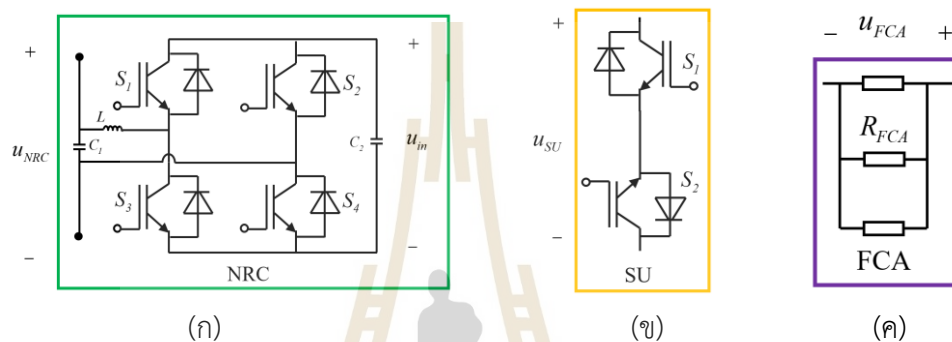
ภาคผนวก ก

ระบบ Negative Resistance Converter Traction Power System



ก.1 โหมดการทำงาน Negative Resistance Converter

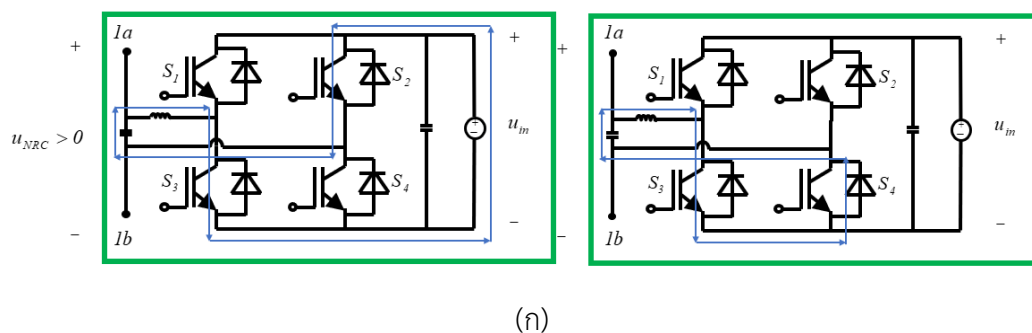
Negative resistance converter เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วงจร DC-DC full-bridge converter มีค่าความต้านทานเอาต์พุตเทียบเท่าค่าเป็นลบและค่าแรงดันเอาต์พุตสามารถยืดหยุ่นได้ ดังรูปที่ ก.1(ก), SU เป็นสวิตช์แบบสองทิศทาง ใช้ IGBTs ต่อกันสองตัวแบบอนุกรมย้อนกลับ (reverse series) ดังรูปที่ ก.1(ข) และ FCA เป็นสายเคเบิลที่ต่อแบบขนาน ดังรูปที่ ก.1(ค) NRC และ SU เป็นอุปกรณ์ที่มีพลังงานการไหลได้แบบสองทิศทาง

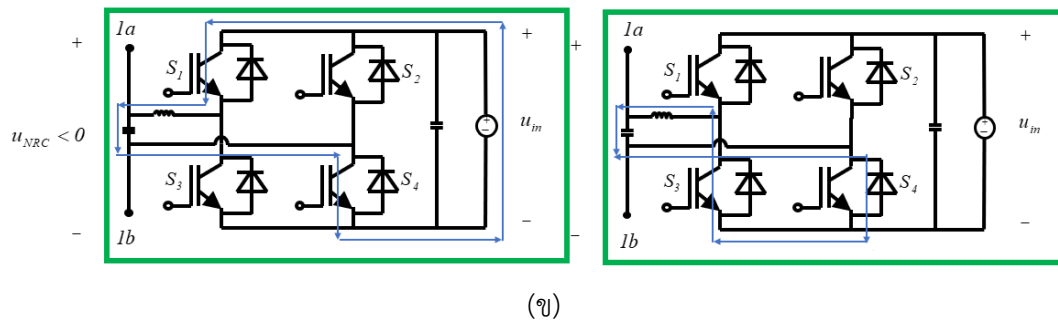


รูปที่ ก.1 อุปกรณ์ของระบบ NEG-TPS (ก) NRC. (ข) SU. (ค) FCA.

โหมดการทำงานของ NRC

โหมดการทำงานของ NRC จะถูกกำหนดโดยค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม FCA ในรูปความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม FCA จะมีค่าแตกต่างกันเมื่อรถไฟทำงานอยู่ในสภาวะที่ต่างกัน เมื่อแรงดันขาออก (u_{NRC}) ของ NRC จะมีค่าเป็นลบสำหรับชดเชยค่าแรงดันของ FCA ดังรูปที่ ก.2(ก) แสดงโหมดการทำงานของ NRC การควบคุมพัลส์ (PWM) จะถูกนำมาใช้กับ S_2 และ S_3 ที่ถูกเปิดการใช้งาน, S_1 และ S_4 ถูกปิดการใช้งาน และเมื่อ u_{NRC} จะมีค่าเป็นลบสำหรับชดเชยค่าแรงดันของ FCA ดังรูปที่ ก.2(ข) การควบคุม PWM จะถูกนำมาใช้กับ S_1 และ S_4 ที่ถูกเปิดการใช้งาน, S_2 และ S_3 ถูกปิดการใช้งานตลอดเวลา ทั้งในโหมด 1 และ 2 ของ NRC จะเทียบเท่าการแปลงแรงดันให้ลดลง (buck converter) เนื่องจาก u_{NRC} สามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขรถไฟหลายสภาวะการทำงาน

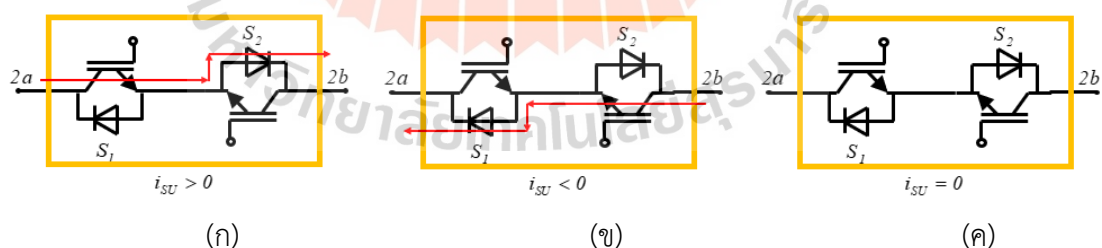




รูปที่ ก.2 โหมดการทำงานของ NRC (ก) โหมดการทำงานที่ 1 (ข) โหมดการทำงานที่ 2

โหมดการทำงานของ SU

โหมดการทำงานของ SU จะถูกกำหนดโดยตำแหน่งของรถไฟและทิศทางการไหลของกระแสราง ทิศทางของกระแสรางจะแตกต่างกันเมื่อรถไฟทำงานในสถานะที่ต่างกัน ปลายหัวของ SU ทั้งสองจะถูกเปิดใช้งานเมื่อรถไฟอยู่ในตำแหน่งตรงกลางของ SU ทั้งสองและ SU ส่วนอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ส่วนของรางที่ตำแหน่งรถไฟจะถูกปิดการใช้งาน ซึ่งโหมดการทำงานของ SU ดังรูปที่ 3.28 โหมดการทำงานของ SU ในโหมดการทำงานที่ 1 เมื่อกระแสรางไหลจาก 2a ไปยัง 2b, S_1 จะเปิดการใช้งานและ S_2 จะไม่เปิดใช้งาน ดังรูปที่ ก.3(ก) และในโหมดการทำงานที่ 2 กระแสรางไหลจาก 2b ไปยัง 2a, S_1 จะถูกปิดการใช้งานและ S_2 จะถูกเปิดการใช้งานขึ้น ดังรูปที่ ก.3(ข) ซึ่ง SU สามารถทำงานภายใต้เงื่อนไขรถไฟหลายสภาวะการทำงานที่มีกระแสรางไหลไปในทิศทางที่ต่างกัน และในโหมดการทำงานที่ 3 ทั้ง S_1 และ S_2 จะถูกปิดการใช้งานและกระแสรางไม่สามารถไหลผ่าน SU ได้ดังรูปที่ ก.3 (ค)



รูปที่ ก.3 โหมดการทำงานของ SU

(ก) โหมดการทำงานที่ 1 (ข) โหมดการทำงานที่ 2 (ค) โหมดการทำงานที่ 3



ภาคผนวก ข

ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2 (รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วงเหนือ)
ระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ

ข.1 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ

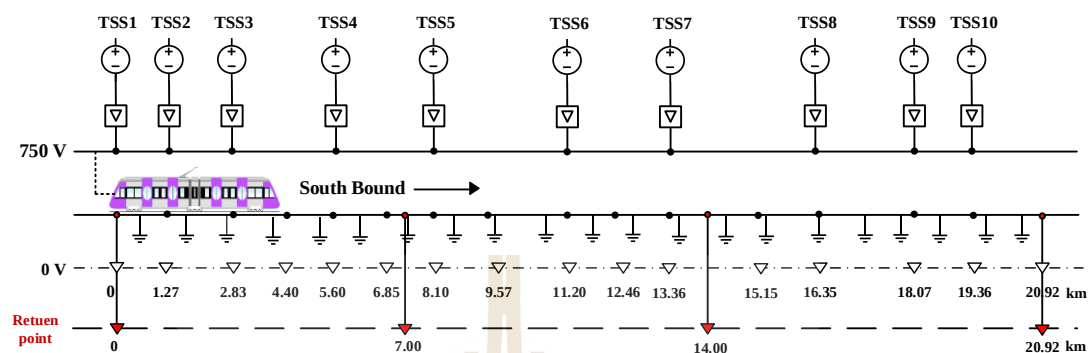
ข1.1 ผลการจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ 3 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ ข.1 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 3 จุดเชื่อมต่อ

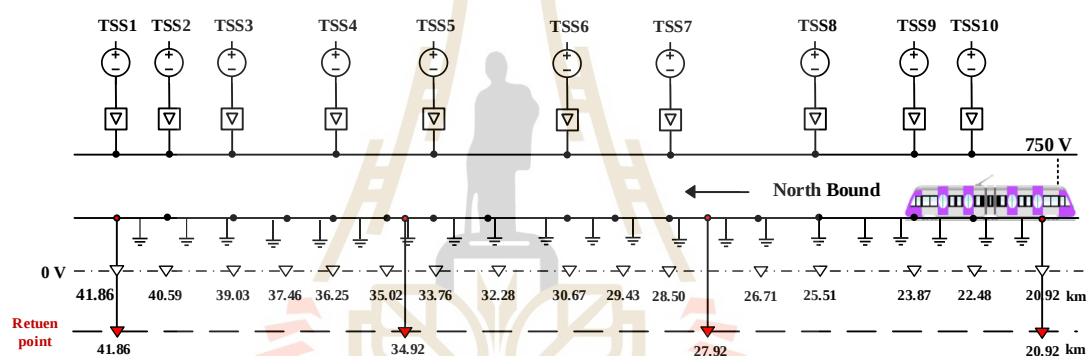
South Bound						
TSS	$P_{S,max}(MW)$	$V_{C,min}(V)$	$U_{RE,max}(V)$	$U_{RE,min}(V)$	$U_{SE,max}(V)$	$U_{SE,min}(V)$
TSS1	2.508	729.372	10.891	-0.973	0.050	-0.045
TSS2	2.287	731.234	12.141	-0.973	0.050	-0.045
TSS3	2.459	729.781	13.508	-2.586	0.050	-0.044
TSS4	2.555	728.969	14.094	-3.040	0.047	-0.043
TSS5	2.575	728.803	13.605	-1.401	0.039	-0.041
TSS6	2.507	729.375	11.980	-0.976	0.031	-0.038
TSS7	2.547	729.041	13.949	-4.605	0.025	-0.036
TSS8	2.460	729.773	13.541	-5.789	0.022	-0.032
TSS9	2.308	731.057	12.509	-7.184	0.019	-0.033
TSS10	2.430	730.027	12.144	-2.554	0.016	-0.033
North Bound						
TSS10	2.400	730.281	12.217	-2.065	0.011	-0.032
TSS9	2.317	730.984	12.584	-6.861	0.013	-0.031
TSS8	2.484	729.568	13.679	-5.366	0.013	-0.028
TSS7	2.535	729.140	13.798	-2.895	0.012	-0.018
TSS6	2.495	729.479	10.887	-0.964	0.010	-0.011
TSS5	2.572	728.828	13.952	-2.026	0.013	-0.009
TSS4	2.559	728.939	14.108	-2.306	0.016	-0.011
TSS3	2.435	729.984	13.312	-1.098	0.018	-0.012
TSS2	2.280	731.294	11.845	-0.971	0.018	-0.013
TSS1	0.890	742.811	3.138	-0.949	0.018	-0.013

ข.1.2 แบบจำลองและผลการจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ 4 จุดเชื่อมต่อ

แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ



(ก)



(ข)

รูปที่ ข.1 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อ

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound

ตารางที่ ข.2 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 4 จุดเชื่อมต่อ

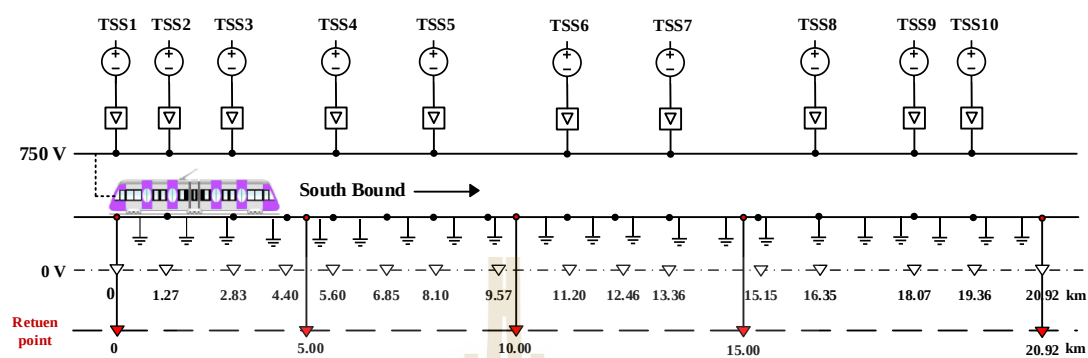
South Bound						
TSS	$P_{S,max}(MW)$	$V_{C,min}(V)$	$U_{RE,max}(V)$	$U_{RE,min}(V)$	$U_{SE,max}(V)$	$U_{SE,min}(V)$
TSS1	2.494	729.486	10.705	-0.867	0.051	-0.043
TSS2	2.287	731.236	12.151	-1.328	0.051	-0.043
TSS3	2.459	729.782	13.477	-3.566	0.049	-0.043
TSS4	2.532	729.161	12.745	-1.823	0.042	-0.041
TSS5	2.552	728.997	12.734	-0.965	0.035	-0.039
TSS6	2.540	729.094	13.868	-3.644	0.029	-0.037
TSS7	2.487	729.547	11.374	-0.896	0.024	-0.035
TSS8	2.455	729.816	13.082	-3.402	0.019	-0.031
TSS9	2.308	731.057	12.501	-6.009	0.018	-0.029
TSS10	2.422	730.093	12.142	-2.540	0.016	-0.027
North Bound						
TSS10	2.394	730.331	12.236	-2.278	0.011	-0.022
TSS9	2.317	730.985	12.527	-5.266	0.013	-0.020
TSS8	2.460	729.773	12.360	-2.091	0.011	-0.017
TSS7	2.514	729.320	12.761	-2.357	0.010	-0.012
TSS6	2.553	728.984	13.988	-5.514	0.013	-0.013
TSS5	2.543	729.076	12.447	-1.203	0.012	-0.010
TSS4	2.539	729.103	12.928	-1.064	0.013	-0.010
TSS3	2.435	729.984	13.292	-3.234	0.018	-0.011
TSS2	2.279	731.299	11.863	-1.127	0.018	-0.012
TSS1	0.884	742.863	3.053	-0.846	0.018	-0.012

ตารางที่ ข.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัว 4 จุดเชื่อมต่อ

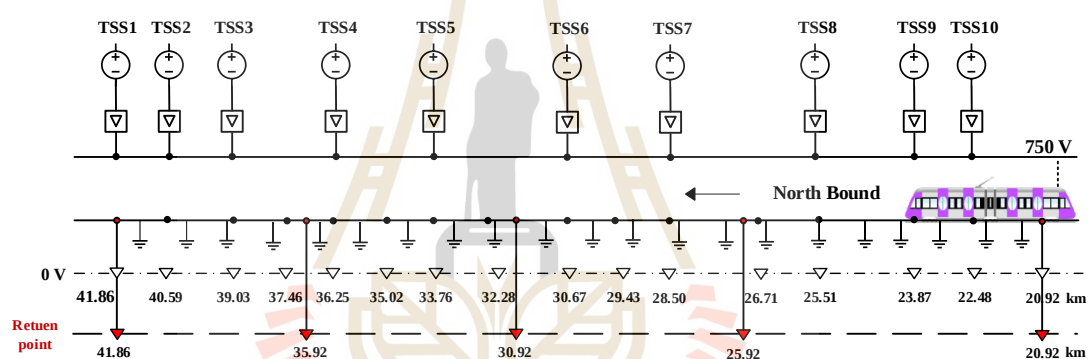
South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	19.82	PP15	21.41
PP02	20.34	PP14	21.10
PP03	28.54	PP13	20.51
PP04	61.51	PP12	66.49
PP05	24.62	PP11	26.56
PP06	41.87	PP10	49.22
PP07	28.55	PP09	24.33
PP08	70.57	PP08	70.93
PP09	26.26	PP07	27.94
PP10	47.63	PP06	56.55
PP11	19.25	PP05	28.69
PP12	59.98	PP04	62.27
PP13	23.73	PP03	20.94
PP14	23.61	PP02	20.92
PP15	27.63	PP01	1.02
PP16	59.35	สูงสุด	70.93
เฉลี่ย			35.55

ข1.3 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ 5 จุดเชื่อมต่อ

แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ



(ก)



(ข)

รูปที่ ข.2 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound

ตารางที่ ข.4 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 5 จุดเชื่อมต่อ

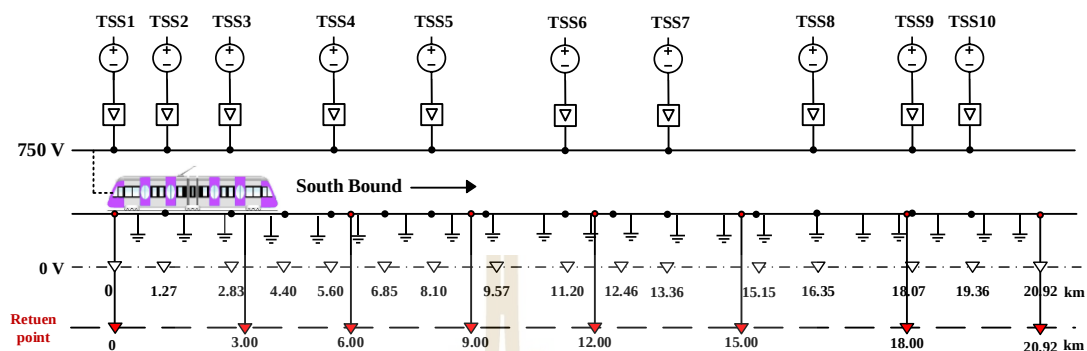
South Bound						
TSS	$P_{S,max}(MW)$	$V_{C,min}(V)$	$U_{RE,max}(V)$	$U_{RE,min}(V)$	$U_{SE,max}(V)$	$U_{SE,min}(V)$
TSS1	2.479	729.617	10.520	-0.823	0.051	-0.043
TSS2	2.287	731.236	12.107	-1.371	0.051	-0.043
TSS3	2.451	729.854	12.955	-1.769	0.047	-0.043
TSS4	2.490	729.519	11.735	-0.827	0.039	-0.041
TSS5	2.561	728.923	13.222	-2.493	0.033	-0.040
TSS6	2.503	729.410	12.458	-1.756	0.025	-0.037
TSS7	2.523	729.242	12.853	-2.966	0.022	-0.035
TSS8	2.432	730.014	12.248	-2.174	0.016	-0.032
TSS9	2.308	731.059	12.443	-5.446	0.018	-0.030
TSS10	2.418	730.127	12.130	-2.504	0.016	-0.028
North Bound						
TSS10	2.391	730.357	12.264	-2.063	0.011	-0.023
TSS9	2.316	730.990	12.422	-3.960	0.013	-0.021
TSS8	2.392	730.349	10.512	-0.860	0.011	-0.018
TSS7	2.532	729.162	13.584	-2.124	0.011	-0.012
TSS6	2.442	729.923	10.335	-0.865	0.010	-0.007
TSS5	2.569	728.854	13.623	-1.129	0.013	-0.008
TSS4	2.480	729.609	11.246	-0.813	0.011	-0.010
TSS3	2.435	729.987	13.243	-2.226	0.018	-0.011
TSS2	2.276	731.325	11.966	-1.387	0.018	-0.011
TSS1	0.893	742.790	3.389	-0.810	0.019	-0.012

ตารางที่ ข.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ

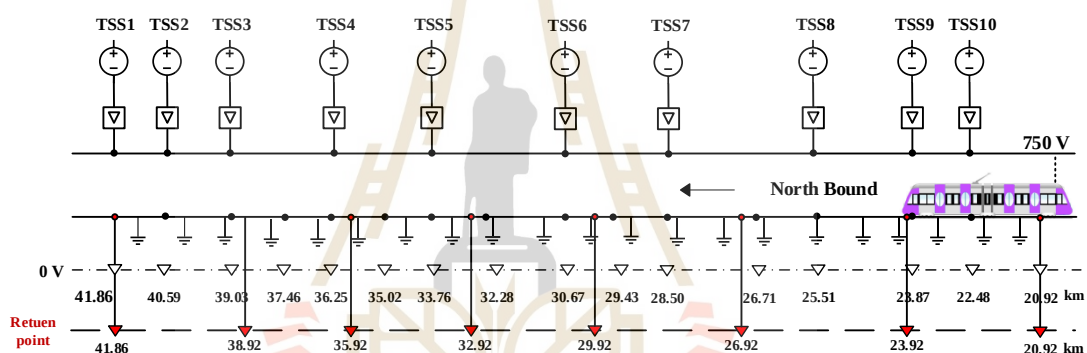
South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	19.83	PP15	21.34
PP02	20.34	PP14	20.81
PP03	22.09	PP13	16.03
PP04	51.92	PP12	60.98
PP05	27.20	PP11	26.19
PP06	56.16	PP10	48.45
PP07	26.73	PP09	17.33
PP08	53.43	PP08	67.47
PP09	25.89	PP07	26.77
PP10	47.94	PP06	52.09
PP11	21.60	PP05	27.19
PP12	46.47	PP04	61.53
PP13	23.33	PP03	30.00
PP14	23.37	PP02	19.68
PP15	25.48	PP01	1.01
PP16	47.21	สูงสุด	67.47
เฉลี่ย			33.41

ข1.4 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ

แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ



(ก)



(ข)

รูปที่ ข.3 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.6 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 8 จุดเชื่อมต่อ

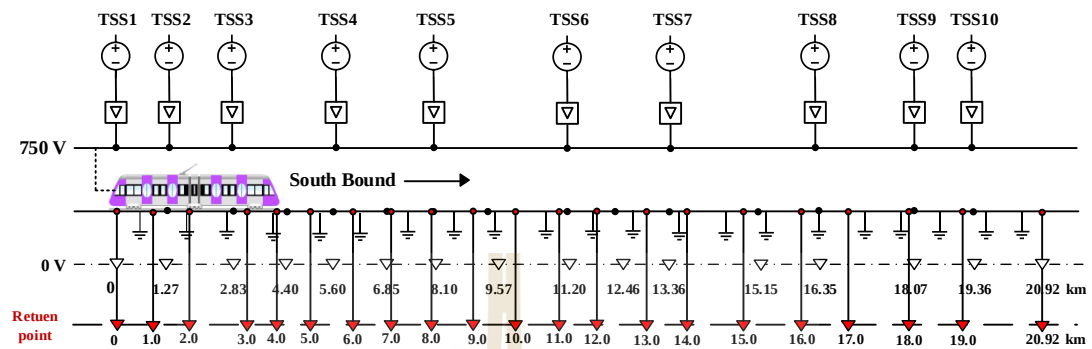
South Bound						
TSS	$P_{S,max}(MW)$	$V_{C,min}(V)$	$U_{RE,max}(V)$	$U_{RE,min}(V)$	$U_{SE,max}(V)$	$U_{SE,min}(V)$
TSS1	2.443	729.918	10.285	-0.777	0.050	-0.041
TSS2	2.286	731.240	12.094	-1.170	0.050	-0.041
TSS3	2.293	731.187	9.498	-0.777	0.046	-0.040
TSS4	2.432	730.010	10.780	-0.777	0.039	-0.039
TSS5	2.503	729.407	11.936	-0.802	0.032	-0.038
TSS6	2.481	729.599	11.793	-0.803	0.025	-0.035
TSS7	2.508	729.367	12.457	-0.801	0.020	-0.033
TSS8	2.422	730.094	12.371	-0.799	0.018	-0.030
TSS9	2.176	732.165	9.072	-0.798	0.015	-0.028
TSS10	2.407	730.219	12.301	-0.797	0.015	-0.027
North Bound						
TSS10	2.383	730.429	12.254	-0.795	0.013	-0.022
TSS9	2.169	732.230	8.659	-0.794	0.011	-0.020
TSS8	2.441	729.934	12.356	-0.793	0.011	-0.017
TSS7	2.499	729.444	12.404	-0.792	0.010	-0.011
TSS6	2.500	729.439	12.050	-0.791	0.010	-0.006
TSS5	2.506	729.382	12.130	-0.790	0.011	-0.008
TSS4	2.450	729.858	11.174	-0.790	0.012	-0.010
TSS3	2.290	731.205	9.881	-0.789	0.014	-0.011
TSS2	2.273	731.350	11.708	-0.855	0.018	-0.011
TSS1	0.859	743.062	2.415	-0.789	0.018	-0.012

ตารางที่ ข.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีย่อยไฟฟ้าของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ

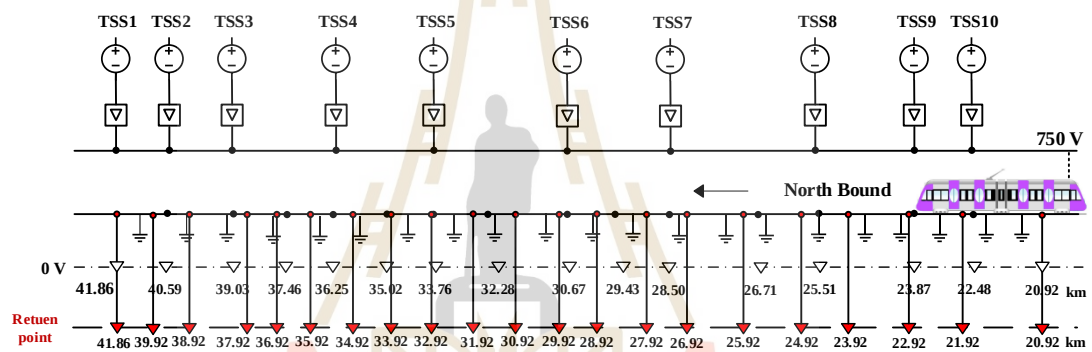
South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	19.84	PP15	20.88
PP02	20.16	PP14	17.92
PP03	24.95	PP13	18.61
PP04	59.33	PP12	42.41
PP05	20.85	PP11	23.63
PP06	51.58	PP10	39.88
PP07	21.91	PP09	22.38
PP08	56.69	PP08	56.38
PP09	20.04	PP07	26.32
PP10	39.34	PP06	51.70
PP11	21.35	PP05	27.13
PP12	42.22	PP04	60.35
PP13	23.05	PP03	28.32
PP14	21.81	PP02	19.77
PP15	25.29	PP01	0.98
PP16	41.79	สูงสุด	60.35
เฉลี่ย			31.19

ข1.5 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ

แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ



(ก)



(ข)

รูปที่ ข.4 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.8 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 21 จุดเชื่อมต่อ

South Bound						
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	2.402	730.267	10.040	-0.036	0.043	-0.036
TSS2	2.141	732.459	9.625	-0.036	0.043	-0.036
TSS3	2.270	731.378	9.466	-0.036	0.040	-0.036
TSS4	2.402	730.268	10.455	-0.035	0.033	-0.035
TSS5	2.426	730.062	10.388	-0.034	0.028	-0.034
TSS6	2.395	730.322	10.438	-0.031	0.023	-0.031
TSS7	2.404	730.246	10.615	-0.030	0.020	-0.030
TSS8	2.310	731.040	10.292	-0.027	0.016	-0.027
TSS9	2.123	732.609	8.743	-0.025	0.014	-0.025
TSS10	2.317	730.978	10.713	-0.024	0.014	-0.024
North Bound						
TSS10	2.265	731.423	10.068	-0.020	0.011	-0.020
TSS9	2.098	732.824	8.292	-0.018	0.010	-0.018
TSS8	2.325	730.911	10.235	-0.015	0.010	-0.015
TSS7	2.391	730.354	10.460	-0.010	0.009	-0.010
TSS6	2.391	730.360	10.147	-0.006	0.009	-0.006
TSS5	2.401	730.277	9.909	-0.007	0.010	-0.007
TSS4	2.412	730.179	10.602	-0.008	0.012	-0.008
TSS3	2.275	731.334	9.788	-0.009	0.013	-0.009
TSS2	2.131	732.549	9.405	-0.010	0.015	-0.010
TSS1	0.932	742.470	3.256	-0.010	0.016	-0.010

ตารางที่ ข.9 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	19.12	PP15	22.74
PP02	17.09	PP14	17.28
PP03	22.46	PP13	15.59
PP04	42.45	PP12	39.95
PP05	19.71	PP11	17.89
PP06	34.14	PP10	36.72
PP07	21.66	PP09	16.36
PP08	45.33	PP08	45.55
PP09	19.59	PP07	21.92
PP10	36.85	PP06	36.06
PP11	18.50	PP05	19.08
PP12	39.81	PP04	42.31
PP13	18.64	PP03	17.91
PP14	20.47	PP02	16.15
PP15	25.01	PP01	0.96
PP16	39.78	สูงสุด	45.55
เฉลี่ย			26.03

ข1.6 กรณีใช้สายเคเบิลที่มีความต้านทานเท่ากับค่าความต้านทานของรางวิ่ง

$$R_{RT} = 0.0175 \, \Omega/\text{km}$$

ตารางที่ ข.10 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง กรณีใช้ $R_{RT} = 0.0175 \, \Omega/\text{km}$

South Bound						
TSS	$P_{S,\max}(\text{MW})$	$V_{C,\min}(\text{V})$	$U_{RE,\max}(\text{V})$	$U_{RE,\min}(\text{V})$	$U_{SE,\max}(\text{V})$	$U_{SE,\min}(\text{V})$
TSS1	2.483	729.580	10.825	-0.868	0.051	-0.044
TSS2	2.287	731.235	12.186	-1.279	0.051	-0.043
TSS3	2.451	729.849	13.038	-1.641	0.047	-0.043
TSS4	2.495	729.482	11.933	-0.869	0.039	-0.042
TSS5	2.562	728.912	13.325	-2.297	0.033	-0.040
TSS6	2.506	729.389	12.590	-1.624	0.025	-0.038
TSS7	2.525	729.228	12.959	-2.744	0.022	-0.036
TSS8	2.433	729.999	12.354	-2.055	0.016	-0.032
TSS9	2.308	731.059	12.474	-5.060	0.018	-0.030
TSS10	2.420	730.111	12.236	-2.365	0.016	-0.028
North Bound						
TSS10	2.393	730.344	12.345	-1.954	0.012	-0.023
TSS9	2.316	730.989	12.454	-3.672	0.013	-0.021
TSS8	2.398	730.295	10.749	-0.879	0.011	-0.018
TSS7	2.533	729.160	13.626	-1.938	0.012	-0.012
TSS6	2.450	729.856	10.621	-0.872	0.010	-0.007
TSS5	2.569	728.851	13.680	-1.053	0.013	-0.008
TSS4	2.485	729.561	11.468	-0.821	0.012	-0.010
TSS3	2.435	729.986	13.269	-2.077	0.018	-0.011
TSS2	2.276	731.324	12.019	-1.345	0.019	-0.012
TSS1	0.894	742.779	3.496	-0.820	0.019	-0.012

$$R_{RT} = 0.047 \, \Omega/\text{km}$$

ตารางที่ ข.11 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง กรณิใช้ $R_{RT} = 0.047 \, \Omega/\text{km}$

South Bound						
TSS	$P_{S,max}(\text{MW})$	$V_{C,min}(\text{V})$	$U_{RE,max}(\text{V})$	$U_{RE,min}(\text{V})$	$U_{SE,max}(\text{V})$	$U_{SE,min}(\text{V})$
TSS1	2.483	729.580	10.825	-0.868	0.051	-0.044
TSS2	2.287	731.235	12.186	-1.279	0.051	-0.043
TSS3	2.451	729.849	13.038	-1.641	0.047	-0.043
TSS4	2.495	729.482	11.933	-0.869	0.039	-0.042
TSS5	2.562	728.912	13.325	-2.297	0.033	-0.040
TSS6	2.506	729.389	12.590	-1.624	0.025	-0.038
TSS7	2.525	729.228	12.959	-2.744	0.022	-0.036
TSS8	2.433	729.999	12.354	-2.055	0.016	-0.032
TSS9	2.308	731.059	12.474	-5.060	0.018	-0.030
TSS10	2.420	730.111	12.236	-2.365	0.016	-0.028
North Bound						
TSS10	2.393	730.344	12.345	-1.954	0.012	-0.023
TSS9	2.316	730.989	12.454	-3.672	0.013	-0.021
TSS8	2.398	730.295	10.749	-0.879	0.011	-0.018
TSS7	2.533	729.160	13.626	-1.938	0.012	-0.012
TSS6	2.450	729.856	10.621	-0.872	0.010	-0.007
TSS5	2.569	728.851	13.680	-1.053	0.013	-0.008
TSS4	2.485	729.561	11.468	-0.821	0.012	-0.010
TSS3	2.435	729.986	13.269	-2.077	0.018	-0.011
TSS2	2.276	731.324	12.019	-1.345	0.019	-0.012
TSS1	0.894	742.779	3.496	-0.820	0.019	-0.012

ข.2 แบบจำลองการติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าย่อย

ข.2.1 ผลการจำลองการติดตั้ง 4 จุดเชื่อมต่อ

ที่ตำแหน่ง 4.401, 9.578, 15.147, 20.924, 26.717, 32.286 และ 37.463 กิโลเมตร

ตามลำดับ

ตารางที่ ข.12 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ

South Bound						
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	2.474	729.655	10.526	-0.813	0.051	-0.042
TSS2	2.287	731.235	12.152	-2.335	0.051	-0.042
TSS3	2.437	729.972	12.559	-1.555	0.046	-0.041
TSS4	2.515	729.306	12.526	-1.838	0.039	-0.040
TSS5	2.551	729.002	12.898	-2.819	0.032	-0.039
TSS6	2.515	729.306	12.816	-2.369	0.025	-0.036
TSS7	2.530	729.179	13.103	-3.630	0.022	-0.034
TSS8	2.425	730.074	12.004	-1.404	0.016	-0.031
TSS9	2.308	731.059	12.460	-5.275	0.018	-0.029
TSS10	2.423	730.085	12.290	-2.858	0.016	-0.027
North Bound						
TSS10	2.390	730.368	12.138	-2.488	0.011	-0.023
TSS9	2.316	730.986	12.505	-5.291	0.013	-0.020
TSS8	2.449	729.868	12.085	-1.937	0.011	-0.017
TSS7	2.517	729.289	13.007	-3.128	0.010	-0.011
TSS6	2.529	729.188	12.868	-2.780	0.011	-0.009
TSS5	2.543	729.072	12.850	-2.421	0.011	-0.008
TSS4	2.520	729.270	12.515	-2.359	0.013	-0.010
TSS3	2.411	730.190	12.382	-1.236	0.015	-0.011
TSS2	2.276	731.328	11.888	-2.352	0.018	-0.011
TSS1	0.884	742.861	3.089	-0.817	0.018	-0.012

ตารางที่ ข.13 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	19.85	PP15	21.28
PP02	20.32	PP14	20.95
PP03	25.84	PP13	18.29
PP04	41.33	PP12	48.27
PP05	27.56	PP11	26.13
PP06	56.33	PP10	48.92
PP07	25.68	PP09	35.93
PP08	47.16	PP08	47.10
PP09	26.05	PP07	27.20
PP10	48.10	PP06	56.24
PP11	22.01	PP05	24.03
PP12	44.96	PP04	41.37
PP13	23.22	PP03	29.58
PP14	23.39	PP02	19.72
PP15	25.95	PP01	1.00
PP16	48.14	สูงสุด	56.33
เฉลี่ย			31.99

ข.2.2 ผลการจำลองการติดตั้ง 6 จุดเชื่อมต่อ

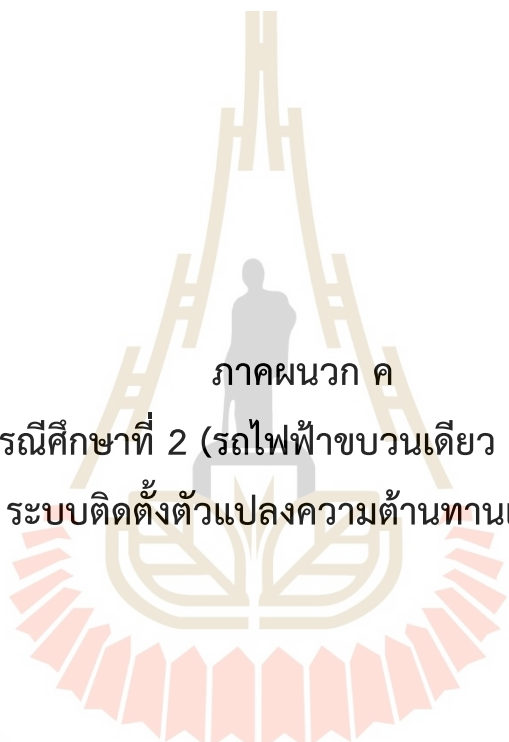
ที่ตำแหน่ง 4.401, 6.835, 9.578, 12.436, 15.147, 20.924, 26.717, 29.428
32.286, 35.029 และ 37.463 กิโลเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ ข.14 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ

South Bound						
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	2.474	729.657	10.514	-0.823	0.051	-0.042
TSS2	2.287	731.236	12.147	-2.532	0.051	-0.042
TSS3	2.430	730.025	12.525	-1.794	0.047	-0.042
TSS4	2.506	729.386	12.095	-0.824	0.039	-0.040
TSS5	2.526	729.213	12.296	-0.824	0.033	-0.039
TSS6	2.500	729.436	12.333	-0.825	0.025	-0.036
TSS7	2.502	729.420	12.163	-0.825	0.020	-0.035
TSS8	2.413	730.172	11.949	-1.469	0.016	-0.031
TSS9	2.308	731.060	12.457	-5.375	0.018	-0.029
TSS10	2.423	730.086	12.282	-3.092	0.016	-0.027
North Bound						
TSS10	2.390	730.369	12.130	-2.753	0.011	-0.023
TSS9	2.316	730.987	12.502	-5.336	0.013	-0.020
TSS8	2.438	729.964	12.030	-2.014	0.011	-0.017
TSS7	2.494	729.491	12.101	-0.819	0.009	-0.011
TSS6	2.511	729.344	12.355	-0.827	0.010	-0.007
TSS5	2.521	729.261	12.258	-0.828	0.011	-0.008
TSS4	2.508	729.371	12.085	-0.827	0.012	-0.010
TSS3	2.404	730.247	12.347	-1.504	0.016	-0.011
TSS2	2.276	731.329	11.883	-2.560	0.018	-0.011
TSS1	0.884	742.863	3.081	-0.827	0.018	-0.012

ตารางที่ ข.15 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย ของสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	19.84	PP15	21.28
PP02	20.31	PP14	20.94
PP03	25.59	PP13	18.17
PP04	38.99	PP12	46.95
PP05	24.20	PP11	21.61
PP06	35.99	PP10	32.37
PP07	25.53	PP09	35.82
PP08	42.19	PP08	42.18
PP09	23.33	PP07	23.89
PP10	32.30	PP06	35.70
PP11	21.59	PP05	24.18
PP12	42.43	PP04	39.16
PP13	23.20	PP03	29.55
PP14	23.39	PP02	19.64
PP15	25.93	PP01	1.00
PP16	48.04	สูงสุด	48.04
เฉลี่ย			28.55

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a stylized golden 'H' shape with a silhouette of a person standing inside it. Below this is a circular emblem with a red and white border and a central design. At the bottom, the university's name is written in Thai script.

ภาคผนวก ค

ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2 (รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วงเหนือ)
ระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค.1 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

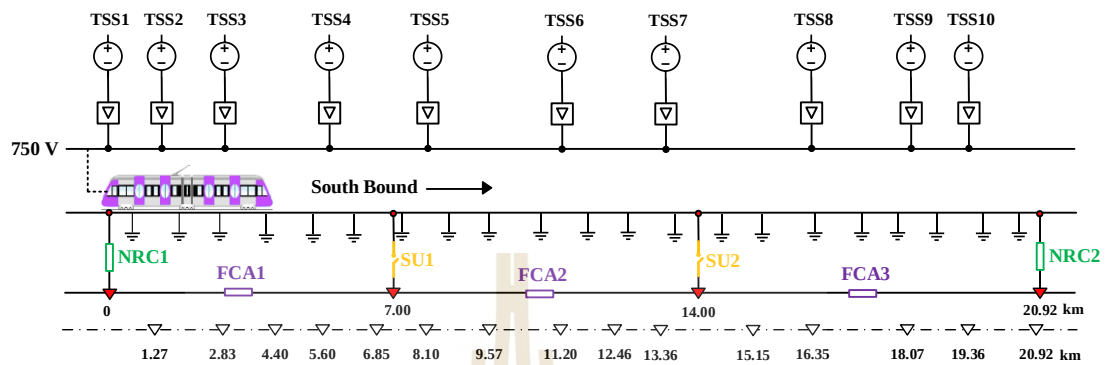
ค.1.1 ผลการจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ 3 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ ค.1 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 3 จุดเชื่อมต่อ

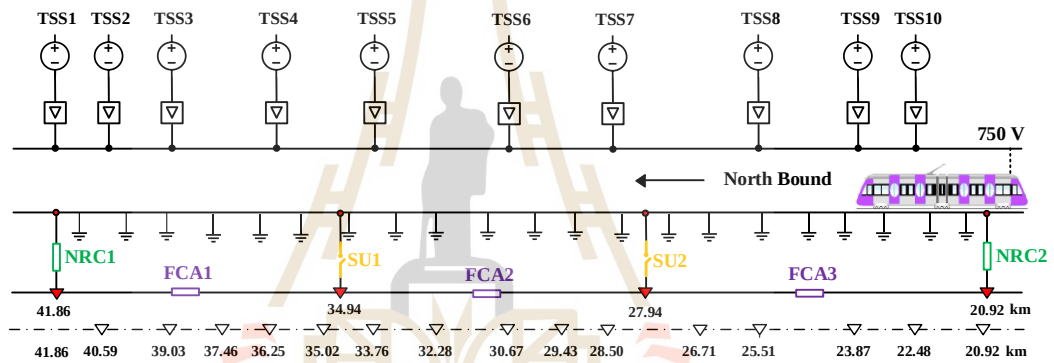
South Bound						
TSS	$P_{S,max}(MW)$	$V_{C,min}(V)$	$U_{RE,max}(V)$	$U_{RE,min}(V)$	$U_{SE,max}(V)$	$U_{SE,min}(V)$
TSS1	2.431	730.017	45.363	-6.193	0.788	-0.300
TSS2	2.285	731.248	40.321	-7.952	0.776	-0.299
TSS3	2.459	729.782	35.536	-8.292	0.750	-0.295
TSS4	2.555	728.970	27.393	-6.183	0.684	-0.285
TSS5	2.567	728.870	20.107	-6.182	0.611	-0.273
TSS6	2.477	729.628	12.087	-9.920	0.509	-0.255
TSS7	2.546	729.044	13.925	-14.499	0.433	-0.240
TSS8	2.460	729.773	13.511	-12.181	0.325	-0.215
TSS9	2.308	731.057	12.337	-10.594	0.268	-0.199
TSS10	2.430	730.029	11.121	-9.228	0.221	-0.185
North Bound						
TSS10	2.400	730.283	11.422	-9.423	0.120	-0.148
TSS9	2.317	730.984	12.447	-16.233	0.078	-0.130
TSS8	2.484	729.568	13.654	-17.150	0.033	-0.107
TSS7	2.535	729.142	13.809	-17.233	0.011	-0.063
TSS6	2.477	729.632	11.690	-17.217	0.010	-0.083
TSS5	2.562	728.911	13.008	-17.202	0.026	-0.135
TSS4	2.559	728.939	14.091	-17.197	0.063	-0.169
TSS3	2.435	729.984	17.419	-17.195	0.100	-0.197
TSS2	2.277	731.323	22.508	-17.198	0.115	-0.207
TSS1	0.856	743.089	27.456	-17.203	0.122	-0.212

ค1.2 แบบจำลองและผลการจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำ 4 จุดเชื่อมต่อ

แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ



(ก)



(ข)

รูปที่ ค.1 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อ

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound

ตารางที่ ค.2 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 4 จุดเชื่อมต่อ

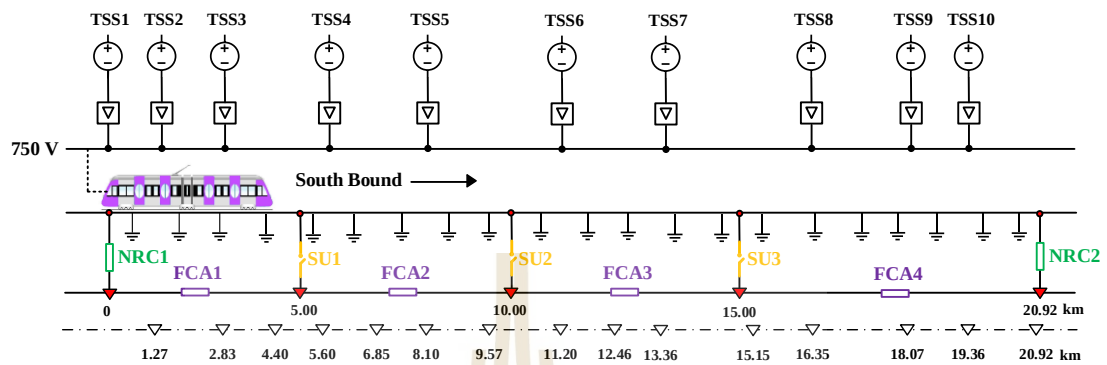
South Bound						
TSS	$P_{S,max}(MW)$	$V_{C,min}(V)$	$U_{RE,max}(V)$	$U_{RE,min}(V)$	$U_{SE,max}(V)$	$U_{SE,min}(V)$
TSS1	2.393	730.340	45.365	-7.551	0.787	-0.326
TSS2	2.285	731.253	40.323	-7.558	0.775	-0.324
TSS3	2.459	729.782	35.538	-7.566	0.749	-0.320
TSS4	2.508	729.371	27.395	-9.885	0.683	-0.309
TSS5	2.529	729.193	20.109	-14.986	0.610	-0.295
TSS6	2.540	729.095	13.541	-18.004	0.508	-0.274
TSS7	2.513	729.328	9.177	-15.897	0.432	-0.256
TSS8	2.455	729.820	12.828	-12.434	0.324	-0.227
TSS9	2.308	731.058	12.263	-10.518	0.267	-0.209
TSS10	2.430	730.029	11.112	-8.905	0.220	-0.192
North Bound						
TSS10	2.400	730.283	11.411	-9.421	0.119	-0.150
TSS9	2.317	730.985	12.360	-16.231	0.077	-0.129
TSS8	2.478	729.618	12.859	-17.147	0.032	-0.102
TSS7	2.506	729.386	9.902	-17.232	0.008	-0.070
TSS6	2.553	728.986	13.661	-17.228	0.011	-0.083
TSS5	2.515	729.305	12.815	-17.214	0.035	-0.136
TSS4	2.516	729.299	11.739	-17.206	0.073	-0.170
TSS3	2.435	729.984	17.872	-17.203	0.109	-0.198
TSS2	2.275	731.335	21.615	-17.204	0.123	-0.208
TSS1	0.839	743.227	25.244	-17.208	0.130	-0.213

ตารางที่ ค.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้ง 4 จุดเชื่อมต่อ

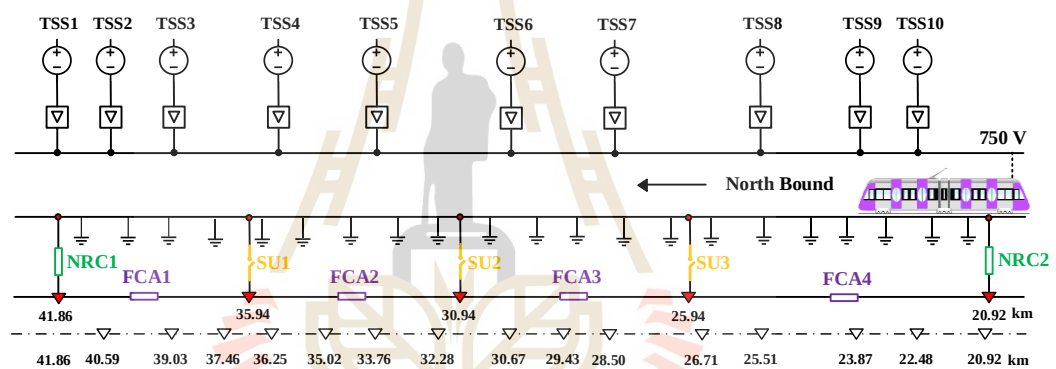
South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	16.22	PP15	20.85
PP02	19.60	PP14	20.85
PP03	28.85	PP13	19.45
PP04	61.19	PP12	60.23
PP05	20.63	PP11	24.39
PP06	36.65	PP10	47.04
PP07	28.84	PP09	23.77
PP08	70.38	PP08	70.05
PP09	25.78	PP07	23.67
PP10	46.06	PP06	26.99
PP11	16.17	PP05	27.54
PP12	59.02	PP04	62.00
PP13	23.49	PP03	29.68
PP14	23.00	PP02	16.89
PP15	24.06	PP01	0.28
PP16	47.28	สูงสุด	70.38
เฉลี่ย			32.93

ค1.3 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ 5 จุดเชื่อมต่อ

แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ



(ก)



(ข)

รูปที่ ค.2 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound

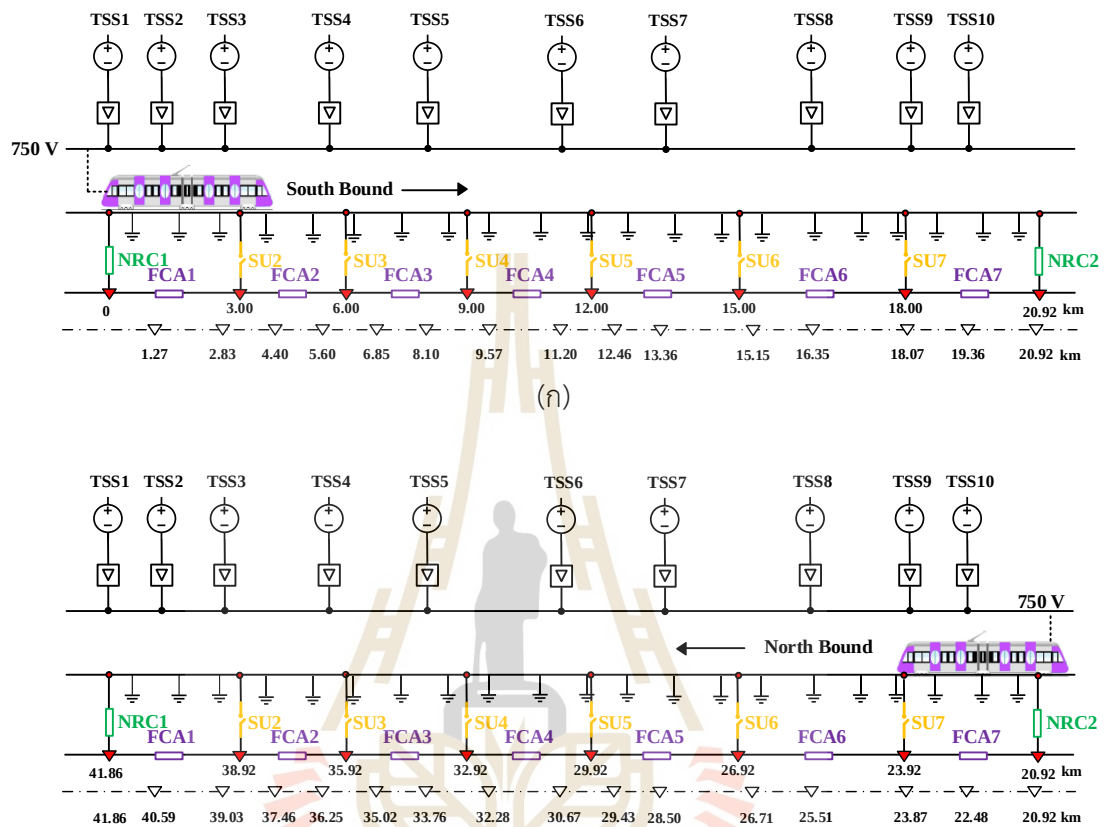
ตารางที่ ค.4 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 5 จุดเชื่อมต่อ

South Bound						
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	2.349	730.716	45.360	-21.709	0.790	-0.673
TSS2	2.285	731.249	40.318	-21.829	0.779	-0.667
TSS3	2.443	729.918	35.532	-21.918	0.752	-0.654
TSS4	2.435	729.982	27.389	-21.501	0.686	-0.619
TSS5	2.571	728.836	20.103	-14.280	0.614	-0.577
TSS6	2.477	729.633	11.054	-11.668	0.512	-0.516
TSS7	2.517	729.295	10.229	-15.742	0.436	-0.469
TSS8	2.436	729.980	11.371	-11.496	0.328	-0.394
TSS9	2.249	731.558	8.913	-10.625	0.270	-0.350
TSS10	2.429	730.039	10.680	-11.455	0.224	-0.310
North Bound						
TSS10	2.400	730.283	11.377	-11.446	0.123	-0.217
TSS9	2.316	730.991	12.096	-16.236	0.081	-0.175
TSS8	2.419	730.119	10.236	-17.153	0.036	-0.126
TSS7	2.533	729.159	12.875	-17.239	0.008	-0.043
TSS6	2.445	729.905	12.327	-17.225	0.022	-0.080
TSS5	2.570	728.843	17.500	-17.200	0.099	-0.132
TSS4	2.559	728.939	21.666	-17.183	0.153	-0.166
TSS3	2.435	729.984	26.328	-17.170	0.201	-0.194
TSS2	2.276	731.323	29.102	-17.165	0.220	-0.204
TSS1	0.855	743.094	31.794	-17.164	0.228	-0.209

ตารางที่ ค.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ
5 จุดเชื่อมต่อ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	16.35	PP15	20.88
PP02	19.76	PP14	20.98
PP03	26.30	PP13	20.47
PP04	41.84	PP12	66.72
PP05	27.07	PP11	26.17
PP06	55.10	PP10	48.39
PP07	23.60	PP09	18.50
PP08	47.12	PP08	63.03
PP09	17.03	PP07	27.66
PP10	39.32	PP06	57.01
PP11	18.54	PP05	28.67
PP12	47.45	PP04	62.82
PP13	21.93	PP03	29.56
PP14	20.99	PP02	16.57
PP15	23.80	PP01	0.26
PP16	47.28	สูงสุด เฉลี่ย	66.72 32.29

ค1.4 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ
แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ



รูปที่ ค.3 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ
(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound

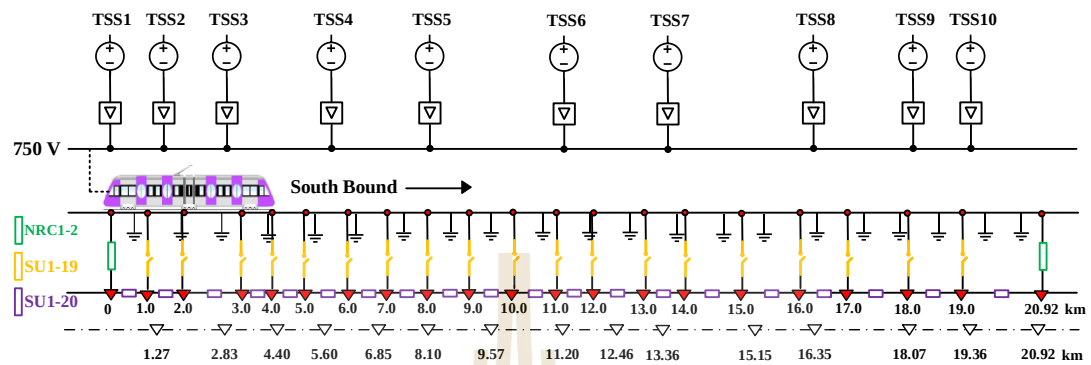
ตารางที่ ค.6 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 8 จุดเชื่อมต่อ

South Bound						
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	2.241	731.625	45.155	-11.283	0.780	-0.539
TSS2	2.287	731.235	40.114	-11.458	0.769	-0.536
TSS3	2.142	732.457	35.328	-11.420	0.743	-0.530
TSS4	2.519	729.275	27.186	-11.539	0.677	-0.512
TSS5	2.547	729.040	19.900	-11.649	0.605	-0.490
TSS6	2.506	729.387	12.413	-11.789	0.503	-0.456
TSS7	2.517	729.295	10.229	-11.889	0.428	-0.428
TSS8	2.436	729.980	11.371	-12.032	0.323	-0.381
TSS9	2.249	731.558	8.913	-12.111	0.270	-0.352
TSS10	2.429	730.039	10.679	-12.173	0.227	-0.324
North Bound						
TSS10	2.399	730.294	10.912	-12.211	0.131	-0.254
TSS9	2.250	731.550	8.415	-16.462	0.093	-0.220
TSS8	2.456	729.806	11.176	-17.286	0.051	-0.175
TSS7	2.505	729.390	10.421	-17.228	0.001	-0.091
TSS6	2.520	729.270	9.687	-19.158	0.011	-0.082
TSS5	2.543	729.075	11.636	-19.060	0.057	-0.133
TSS4	2.527	729.207	20.355	-18.501	0.120	-0.165
TSS3	2.164	732.271	30.144	-17.836	0.178	-0.192
TSS2	2.277	731.315	35.966	-17.443	0.202	-0.202
TSS1	0.780	743.708	41.612	-17.065	0.213	-0.206

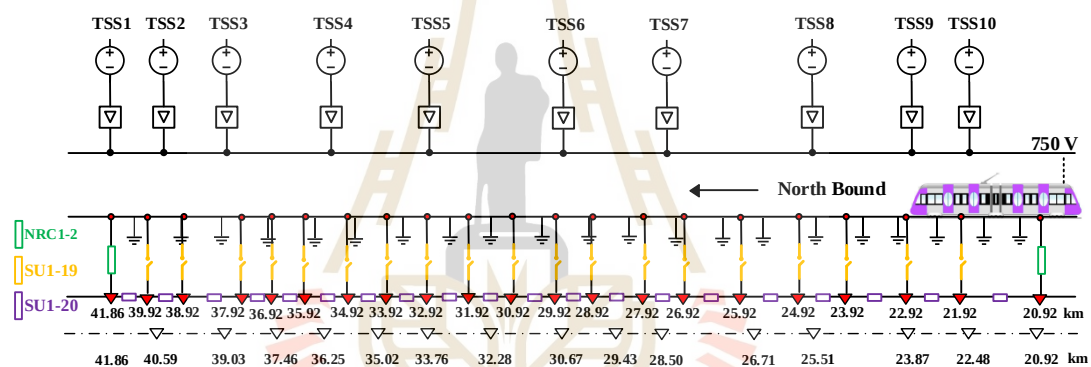
ตารางที่ ค.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ
8 จุดเชื่อมต่อ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	16.62	PP15	19.81
PP02	19.59	PP14	16.84
PP03	24.64	PP13	17.41
PP04	56.34	PP12	47.69
PP05	21.62	PP11	22.46
PP06	50.00	PP10	39.89
PP07	18.52	PP09	19.74
PP08	57.17	PP08	56.88
PP09	17.41	PP07	28.44
PP10	39.32	PP06	50.21
PP11	18.31	PP05	25.03
PP12	47.45	PP04	57.54
PP13	21.93	PP03	15.89
PP14	20.99	PP02	17.52
PP15	23.8	PP01	0.22
PP16	47.07	สูงสุด เฉลี่ย	57.54
			30.20

ค1.5 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ
แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ



(ก)



(ข)

รูปที่ ค.4 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ

(ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound

ตารางที่ ค.8 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 21 จุดเชื่อมต่อ

South Bound						
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	2.260	731.458	37.502	-7.085	0.481	-0.494
TSS2	2.049	733.233	32.573	-11.476	0.474	-0.493
TSS3	2.340	730.784	27.892	-15.304	0.460	-0.487
TSS4	2.407	730.223	19.927	-16.775	0.423	-0.469
TSS5	2.422	730.098	13.450	-15.481	0.382	-0.445
TSS6	2.426	730.060	9.009	-17.433	0.324	-0.407
TSS7	2.449	729.864	6.836	-19.254	0.279	-0.372
TSS8	2.381	730.438	7.329	-15.466	0.213	-0.316
TSS9	2.242	731.617	7.516	-15.981	0.177	-0.282
TSS10	2.396	730.319	8.472	-15.628	0.146	-0.251
North Bound						
TSS10	2.343	730.766	7.057	-16.199	0.078	-0.203
TSS9	2.243	731.608	7.168	-20.297	0.050	-0.185
TSS8	2.398	730.295	7.367	-19.006	0.019	-0.159
TSS7	2.434	729.993	7.133	-18.868	0.001	-0.104
TSS6	2.427	730.057	9.534	-18.342	0.014	-0.090
TSS5	2.399	730.286	13.916	-13.687	0.076	-0.101
TSS4	2.398	730.297	17.446	-14.311	0.120	-0.116
TSS3	2.318	730.976	22.990	-13.319	0.159	-0.131
TSS2	2.051	733.219	28.735	-9.050	0.175	-0.135
TSS1	1.149	740.689	34.306	-6.560	0.181	-0.136

ตารางที่ ค.9 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ
21 จุดเชื่อมต่อ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	17.26	PP15	14.63
PP02	13.02	PP14	14.69
PP03	16.36	PP13	13.18
PP04	33.28	PP12	39.65
PP05	16.09	PP11	16.56
PP06	32.35	PP10	32.01
PP07	17.44	PP09	24.95
PP08	37.70	PP08	37.91
PP09	16.46	PP07	18.11
PP10	31.67	PP06	30.43
PP11	14.24	PP05	18.51
PP12	39.62	PP04	33.57
PP13	15.17	PP03	21.27
PP14	17.97	PP02	13.38
PP15	22.51	PP01	0.44
PP16	39.38	สูงสุด	39.65
		เฉลี่ย	22.89

ค.2 แบบจำลองการติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าย่อย

ค.2.1 ผลการจำลองการติดตั้ง 4 จุดเชื่อมต่อ

ที่ตำแหน่ง 4.401, 9.578, 15.147, 20.924, 26.717, 32.286 และ 37.463 กิโลเมตร

ตามลำดับ

ตารางที่ ค.10 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ

South Bound						
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	2.346	730.735	45.795	-25.323	0.827	-0.808
TSS2	2.286	731.244	39.178	-25.434	0.818	-0.802
TSS3	2.416	730.146	34.482	-25.525	0.795	-0.786
TSS4	2.479	729.610	26.513	-25.030	0.739	-0.744
TSS5	2.567	728.869	20.640	-19.664	0.675	-0.693
TSS6	2.509	729.357	14.710	-19.199	0.584	-0.620
TSS7	2.537	729.120	11.689	-17.898	0.513	-0.562
TSS8	2.430	730.028	11.598	-16.938	0.409	-0.478
TSS9	2.308	731.060	12.148	-16.098	0.351	-0.434
TSS10	2.432	730.013	11.277	-12.300	0.301	-0.392
North Bound						
TSS10	2.398	730.297	11.249	-12.286	0.190	-0.293
TSS9	2.316	730.988	12.206	-16.215	0.142	-0.247
TSS8	2.454	729.824	11.615	-17.081	0.089	-0.190
TSS7	2.525	729.223	11.690	-17.623	0.008	-0.098
TSS6	2.523	729.241	14.860	-20.044	0.030	-0.080
TSS5	2.559	728.934	20.873	-20.549	0.122	-0.135
TSS4	2.485	729.562	26.448	-24.922	0.186	-0.182
TSS3	2.390	730.369	34.479	-25.465	0.243	-0.224
TSS2	2.276	731.324	39.268	-25.380	0.265	-0.240
TSS1	0.821	743.375	44.806	-25.282	0.275	-0.246

ตารางที่ ค.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย ของสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	16.53	PP15	20.76
PP02	19.80	PP14	20.64
PP03	23.43	PP13	17.75
PP04	36.99	PP12	46.47
PP05	27.25	PP11	25.24
PP06	55.02	PP10	47.74
PP07	22.13	PP09	35.91
PP08	46.99	PP08	48.75
PP09	25.63	PP07	25.92
PP10	46.98	PP06	54.87
PP11	20.07	PP05	24.31
PP12	42.88	PP04	39.96
PP13	22.90	PP03	29.26
PP14	22.96	PP02	17.20
PP15	24.41	PP01	0.30
PP16	47.12	สูงสุด	55.02
เฉลี่ย			30.84

ค.2.2 ผลการจำลองการติดตั้ง 6 จุดเชื่อมต่อ

ที่ตำแหน่ง 4.401, 6.835, 9.578, 12.436, 15.147, 20.924, 26.717, 29.428
32.286, 35.029 และ 37.463 กิโลเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ ค.12 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ

South Bound						
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	2.346	730.735	45.343	-23.092	0.805	-0.781
TSS2	2.286	731.244	39.950	-23.937	0.795	-0.776
TSS3	2.416	730.146	35.228	-24.715	0.773	-0.761
TSS4	2.469	729.699	27.193	-25.603	0.718	-0.723
TSS5	2.520	729.266	20.886	-19.656	0.655	-0.676
TSS6	2.500	729.437	14.873	-20.062	0.564	-0.606
TSS7	2.499	729.444	10.672	-18.873	0.495	-0.551
TSS8	2.430	730.028	11.649	-17.413	0.393	-0.476
TSS9	2.308	731.060	12.162	-16.529	0.335	-0.432
TSS10	2.432	730.013	11.243	-12.646	0.287	-0.390
North Bound						
TSS10	2.398	730.297	11.275	-12.557	0.178	-0.291
TSS9	2.316	730.988	12.216	-16.136	0.131	-0.245
TSS8	2.454	729.824	11.597	-17.047	0.080	-0.188
TSS7	2.490	729.524	10.199	-18.006	0.006	-0.103
TSS6	2.512	729.334	14.458	-20.456	0.027	-0.081
TSS5	2.516	729.305	20.555	-20.138	0.118	-0.133
TSS4	2.474	729.658	26.615	-25.056	0.181	-0.179
TSS3	2.390	730.369	34.712	-24.236	0.238	-0.217
TSS2	2.276	731.324	39.527	-23.462	0.260	-0.231
TSS1	0.821	743.375	44.198	-22.683	0.270	-0.237

ตารางที่ ค.13 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด (V)
PP01	16.53	PP15	20.63
PP02	19.67	PP14	20.64
PP03	23.43	PP13	17.42
PP04	36.02	PP12	46.47
PP05	19.95	PP11	20.94
PP06	36.88	PP10	35.02
PP07	21.55	PP09	34.07
PP08	45.96	PP08	47.64
PP09	20.32	PP07	22.71
PP10	32.33	PP06	38.45
PP11	18.66	PP05	22.58
PP12	42.92	PP04	38.50
PP13	22.90	PP03	29.26
PP14	22.87	PP02	17.25
PP15	24.41	PP01	0.29
PP16	47.12	สูงสุด	47.64
เฉลี่ย			27.85

ภาคผนวก ง
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- P. Hanrob and T. Ratniyomchai, Assessment of Rail Potential and Stray Current Mitigation by Using NEG-TPS in DC Electrified Railway, **Proceeding of International Conference on Power, Energy and Innovation (ICPEI)**, 2021, pp. 81-84.
- P. Hanrob, T. Kullworawanichpong, C. Sumpavakup and T. Ratniyomchai, Evaluation of Rail Potential and Stray Current Reduction by Using NEG-TPS in DC Railway System, **The 4th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems (CEES 2022)**, 2-4 Aril, Tokyo Japan, 2022. pp. 1166-1174.



Reducing Rail Potential and Stray Current with NEG-TPS in DC Electrified Railways

Panida Hanrob
School of Electrical Engineering,
Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology,
Thailand
e-mail: panidah20@gmail.com

Thanatchai Kulworawanichpong
School of Electrical Engineering,
Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology,
Thailand
e-mail: thanatchai@sut.ac.th

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

Abstract— This article contains an NEG-TPS that provides zero-resistance loops, to reduce the rail potential and stray current in DC electrified railways. The NEG-TPS are built by directly adding power electronic devices in a traditional traction power system without altering the trains, rails, or tunnels. As the results, obtained from the simulations based on the case study. The percentage of rail potential that is reduced ranges from 81.2% to 100% when compared to TRA-TPS, and ranges from 0.9% to 26.3% when compared to RET-TPS, and the reduction percentage of stray current mainly ranges from 90.6% to 100% when compared to TRA-TPS, and ranges from 1.0% to 26.4% when compared to RET-TPS.

Keywords—Rail potential, Stray current, Negative resistance converter (NRC), DC electrified railways, Return conductor.

NOMENCLATURE

NEG-TPS	Negative resistance converter traction power system.
TRA-TPS	Traditional traction power system.
RET-TPS	Return conductor traction power system.
NRC	Negative resistance converter.
FCA	Feeder cable.
SU	Switch unit.
U_r	Voltage of zero-resistance loop.
U_{NRC}	Output voltage of NRC.
U_{FCA}	Voltage across FCA.
U_{SU}	Conducting voltage drop of SU.
U_{rT}	Rail potential of TRA-TPS.
U_{rR}	Rail potential of RET-TPS.
U_{rN}	Rail potential of NEG-TPS.
i_{rT}	Stray current of TRA-TPS.
i_{rR}	Stray current of RET-TPS.
i_{rN}	Stray current of NEG-TPS.
η	Reduction percentage of rail potential.
δ	Reduction percentage of stray current.

I. INTRODUCTION

At present the DC electrified railways systems are widely used for transportation especially in the Bangkok, Thailand because they can handle with the crowded passengers during peak times. Most of the main transportation with railways in Bangkok are the DC electrified railways which is high opportunity to occur the problems of the rail potential and the stray

current. These problems are danger to the building structures at the substations and the substations nearby where is constructed with the metal. The problem of stray current into the ground is an unavoidable problem [1]. The rail current returns to the substation through the running rail. Some of the reverse currents leak into the earth and the metal construction. It is a significant factor in the corrosion of the track's metal which affect the reduction of running track life, grounded equipment, and strengthen buildings. Every year, 1 A of stray current may corrode 9 kg of steel, 34 kg of lead, and 34 kg of copper, according to research [2]. One of the performed solutions, nowadays, Parallel conductors were placed along the running rails to share the rail current and minimize the longitudinal resistance of rails, lowering the rail potential and stray current. This system has limitations on an amount of the cable length and cost. The effect of the rail potential and stray current is not as apparent as it should be if the number of cables is insufficient [3].

Therefore, this paper presents a new method to decrease the rail potential and the stray current which is called the NEG – TPS by using zero resistance in a loop to reduce the rail current's return path on the running rails [4]. The rail potential and the stray current are effectively decreased by the NEG-TPS. It also provides an DC electrified railways safety without reconstruction the existing structure.

The remainder of this article is arranged in the following manner. the configuration and operation principles of NEG-TPS are discussed in depth in section II. The case study model is discussed in Section III. The modeling results and reduction performance of rail potential and stray current are shown in Section IV. Finally, Section V has the conclusion.

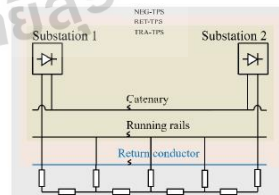


Fig. 1. Configuration of TRA-TPS, RET-TPS and NEG-TPS.

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

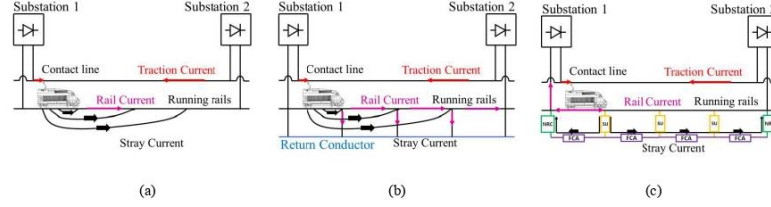


Fig. 2. Rail return current configurations between two substations. (a) TRA-TPS (b) RET-TPS (c) NEG-TPS.

II. CONFIGURATIONS AND OPERATION PRINCIPLES

Traction power systems are made up of traction substations, contact lines/catenary, and running rails, with the arrangement varying of TRA-TPS, RET-TPS and NEG-TPS are shown in Fig. 1 and Fig. 2. The rail potential and stray current calculations on the running rails when the train moves from the traction substation 1 (TS1) to the traction substation 2 (TS2) as shown in Fig. 3, are obtained by the Kirchhoff's current law (KCL) and the Kirchhoff's voltage law (KVL) [4].

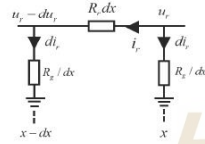


Fig. 3. Differential circuit of running rails.

A. Traditional Traction Power System

In TRA-TPS, as shown in Fig. 2(a). When the train moves from TS1 to TS2, the traction current supplies to the train via the contact line or the third rail located parallel to the running rail. The electricity will flow into the electric train to supply the traction system and the rail current will then return to the substation. The stray current also flows through the earth back to the substation.

Regarding Fig. 3, the rail potential, u_r and the stray current, i_{sR} in TRA-TPS, where A_k and B_k are parameters determined by using KVL and KCL boundary conditions, are calculated as follows:

$$\begin{cases} u_{rT(k)} = R_g (A_k e^{x\sqrt{\frac{R_g}{R_s}}} + B_k e^{-x\sqrt{\frac{R_g}{R_s}}}), & 2 \leq k \leq n \\ i_{sT} = \frac{1}{2R_g} \int_0^L \sum_{k=2}^n |u_{rT(k)}| dx = \frac{u_{rT(k)}}{R_g} \end{cases} \quad (1)$$

B. Return Conductor Traction Power System

In RET-TPS, as shown in Fig. 2(b). The return conductors are installed parallel to the running rail and connected to the running track for the specified distance. The most of the rail currents are consequently returned to substations via the return conductors [5]. Therefore, the rail current that leaked from the rail to the ground is reduced.

Considering Fig. 2, the rail potential, u_{rN} and the stray current, i_{sN} in RET-TPS, where G_k and H_k are parameters determined by using KVL and KCL boundary conditions are expressed as follows:

$$\begin{cases} u_{rN(k)} = R_g (G_k e^{x\sqrt{\frac{R_g}{R_s}}} + H_k e^{-x\sqrt{\frac{R_g}{R_s}}}), & 1 \leq k \leq n \\ i_{sR} = \frac{1}{2R_g} \int_0^L \sum_{k=1}^n |u_{rN(k)}| dx = \frac{u_{rN(k)}}{R_g} \end{cases} \quad (2)$$

C. Negative Resistance Converter Traction Power System

In NEG-TPS, as shown in Fig. 2(c). NRCs, FCAs and SUs are added to the TRA-TPS. SUs at both ends of a rail segment are activated when a train passes through is activated, providing a shorter path of the return current. To get the voltage in the loop to zero, the output voltage of NRCs is controlled to equal the polar opposite of the voltage between FCAs and SUs on this new return path. The resistance of the turned-on SUs to NRCs should then be zero ideally.

The NRC is a negative equivalent output resistance bipolar full-bridge DC-DC converter and a flexible controllable output voltage as shown in Fig. 4(a). SU stands for a bidirectional switch, which is two IGBTs linked in reverse series shown in Fig. 4(b). FCA stands for parallel cables, which is comparable to resistors in parallel shown in Fig. 4(c). NRCs and SUs are devices that allow energy to flow in both directions.

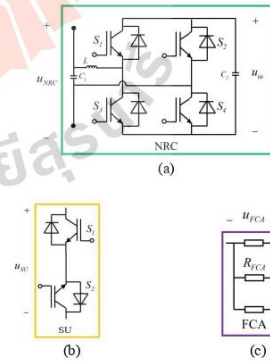


Fig. 4. Operation devices in NEG-TPS. (a) NRC. (b) SU. (c) FCA.

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

The length of each rail section is determined by the various rail potential and stray current reduction requirements. In this article, there are four rail sections in the running rails to make the simplified analysis which the output resistances of NRCs are calculated as in (3) and (4). Regarding Fig. 3, the rail potential, u_{rN} and the stray current, i_{sN} in NEG-TPS, where G_k and H_k are parameters determined by using KVL and KCL boundary conditions, are obtained as in (5).

$$u_{NRC1} = \begin{cases} -u_{FCA1} - u_{SU1}, & k=1 \\ -\sum_{j=1}^{j=k-1} u_{FCAj} - u_{SU(k-1)}, & 2 \leq k \leq n \end{cases}$$

$$\text{So } R_{NRC1} = \frac{u_{NRC1}}{i_{NRC1}} \quad (3)$$

$$R_{NRC1} = \begin{cases} -R_{FCAj} - R_{SU1}, & k=1 \\ -\sum_{j=1}^{j=k-1} R_{FCAj} - R_{SU(k-1)}, & 2 \leq k \leq n \end{cases}$$

$$u_{NRC2} = \begin{cases} \sum_{j=k+1}^{j=n} u_{FCAj} - u_{SU(k)}, & 1 \leq k \leq n-1 \\ u_{FCA(n)} - u_{SU(n-1)}, & k=n \end{cases}$$

$$\text{So } R_{NRC2} = \frac{u_{NRC2}}{i_{NRC2}} \quad (4)$$

$$R_{NRC2} = \begin{cases} -\sum_{j=k+1}^{j=n} R_{FCAj} - R_{SU(k)}, & 1 \leq k \leq n-1 \\ -R_{FCA(n)} - R_{SU(n-1)}, & k=n \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{rN(k)} = R_g (G_k e^{x\sqrt{\frac{R_r}{R_g}}} + H_k e^{-x\sqrt{\frac{R_r}{R_g}}}), & 1 \leq k \leq n \\ i_{sN} = \frac{1}{2R_g} \int_0^L \sum_{k=1}^{k=n} u_{rN(k)} dx = \frac{u_{rN(k)}}{R_g} \end{cases} \quad (5)$$

III. CASE STUDY MODELLING

In this article, the DC electrified railway system of the case study includes a single train running on the track section and three substations located at a position of 0, 5, and 10 km, respectively. TABLE. I. lists the modelling parameters of the typical equivalent circuit of the case study as shown in Fig. 5. The substation voltage rated at 1500 V which traction current is also constant at 1667 A. The simulation results are obtained by applying MATLAB program.

TABLE I. MODELLING PARAMETERS

Parameters	Variables	Values	Units
Substation voltage rated	u_{mbe}	1500	V
Train current	i_L	1667	A
Catenary resistance (OCS)	R_C	75	mΩ/km
Running rail resistance	R_r	9	mΩ/km
SU resistance	R_{SU}	0.002	mΩ/km
FCA resistance	R_{FCA}	0.00225	mΩ/km
Rail-to-earth resistance	R_g	2	Ω/km
Distance	L	10	km

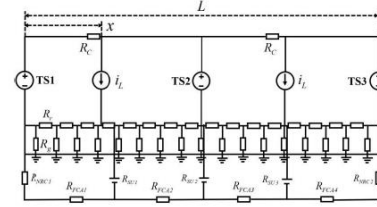


Fig. 5. Typical equivalent circuit of TRA-TPS, RET-TPS and NEG-TPS.

Considering the models of NEG-TPS, RET-TPS, and TRA-TPS shown in Fig. 2, the rail potential and the stray current are obtained from (1), (2), and (5), respectively. The assessments of the reduction performance of NEG-TPS in terms of the distribution of the rail potential and the stray current are reasonably examined in the next section.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

A. Rail Potential and Stray Current Distributions

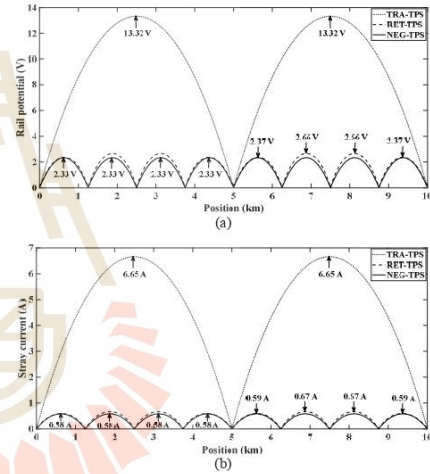


Fig. 6. Case study results. (a) Rail potential in TRA-TPS, RET-TPS and NEG-TPS. (b) Stray current in TRA-TPS, RET-TPS and NEG-TPS.

From Fig. 6, x is represented the train position. In TRA-TPS, the maximum rail potential, u_{rT} is 13.32 V as presented in Fig. 6(a), where x are at 2.50 km and 7.50 km. The train is now in the center of two substations where the maximum of u_{rT} occurs at these train locations. The maximum stray current, i_{sT} is 6.65 A as presented in Fig. 6(b), where x are at 2.50 km and 7.50 km. At this point, the train is also in the center between substations where the maximum of i_{sT} also occurs at these train locations.

In RET-TPS, the maximum rail potential, u_{rR} is 2.66 V as presented in Fig. 6(a), when the train is in the center of the rail-section 2, 3, 6 and 7, where x are at 1.88 km, 3.14 km, 6.88 km and 8.14 km, respectively. The maximum stray current, i_{sR} is 0.67 A as presented in Fig. 6(b), when

the train is also in the center of the rail-section 2, 3, 6 and 7, where x are at 1.88 km, 3.14 km, 6.88 km and 8.14 km, respectively.

In NEG-TPS, the maximum rail potential, u_{rN} is 2.33 V as presented in Fig. 6(a), when the train is in the center of each rail section where x are at 0.62 km, 1.88 km, 3.14 km, 4.38 km, 5.62 km, 6.88 km, 8.14 km and 9.38 km. Because the running rails are evenly divided into four rail sections, the rail potential distribution at the train site is same in each rail section. The maximum stray current, i_{sN} is about 0.58 A when the train is in the center of each rail section, as shown in Fig. 6(b). u_{rN} properly distributed in the rail section with a length of $L/8$. Whereas i_{sN} is dispersed across the whole running rails.

B. Reduction Performance of Rail Potential and Stray Current

The percentage of reduction of the rail potential, η and the stray current, δ are defined in (6) and (7) with the intention of examining NEG-TPS reduction performance during the train services, where η_{NT} is the percentage of reduction of the rail potential between NEG-TPS and TRA-TPS, η_{NR} is the percentage of reduction of the rail potential between NEG-TPS and RET-TPS, δ_{NT} is the percentage of reduction of the stray current between NEG-TPS and TRA-TPS and δ_{NR} is the percentage of reduction of the stray current between NEG-TPS and RET-TPS.

$$\eta = \begin{cases} \eta_{NT} = (1 - \frac{u_{rN}}{u_{rT}}) \times 100\% \\ \eta_{NR} = (1 - \frac{u_{rN}}{u_{rR}}) \times 100\% \end{cases} \quad (6)$$

$$\delta = \begin{cases} \delta_{NT} = (1 - \frac{i_{sN}}{i_{sT}}) \times 100\% \\ \delta_{NR} = (1 - \frac{i_{sN}}{i_{sR}}) \times 100\% \end{cases} \quad (7)$$

From the simulation results as shown in Fig. 7, the track range of 0-5 km are only used to analyze the percentage of reduction of the rail potential and the stray current, because the results of the assessment are the same as the second half of the track. In NEG-TPS, the maximum rail potential and stray current are reduced by 81.2% and 90.6% in comparison with TRA-TPS, respectively. In additions, the maximum rail potential and stray current are reduced by 26.3% and 26.4% in NEG-TPS in comparison with RET-TPS, respectively.

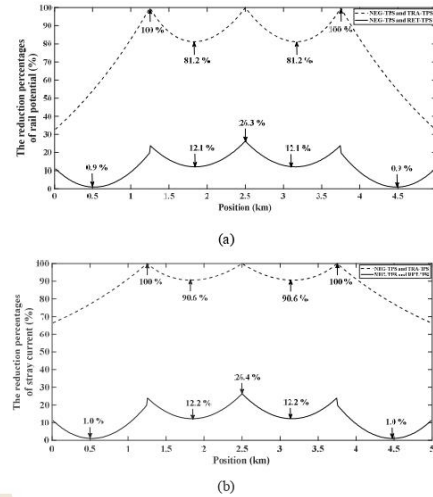


Fig. 7. Percentage of reduction. (a) Rail potential in TRA-TPS, RET-TPS and NEG-TPS. (b) Stray current in TRA-TPS, RET-TPS and NEG-TPS.

V. CONCLUSION

In DC electrified railways, the NEG-TPS system is proposed to reduce rail potential and stray current. The NEG-TPS system's running rails are split into four rail sections, and the rail current is zero in the section that is no train services. As a result, it is found that the rail potential and the stray current are reduced obviously in NEG-TPS. In the meantime, NEG-TPS requires no modifications to the trains, tracks, tunnels, or other infrastructure. The percentage of reductions are also used to verify the reduction performance of the rail potential and the stray current of the NEG-TPS. Furthermore, the NEG-TPS is possibly used in both the present and the future of DC electrified railways.

REFERENCES

- [1] T. Chuchit, "Study and assessment of stray current in DC rapid transit system", Thesis, electrical engineering, suranaree university of technology, 2018.
- [2] D. Paul, "DC stray current in rail transit systems and cathodic protection [history]," IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 22, no. 1, pp. 8–13, Jan./Feb. 2016.
- [3] N. M. J. Dekker, "Stray current control—An overview of options," in Proc. IEEE Seminar DC Traction Stray Current Control, Oct. 1999, p. 8.
- [4] Jingda Gu, Xiaofeng Yang, Trillion Q. Zheng, Zhan Shang, Zhijun Zhao, "Negative resistance converter traction power system for reducing rail potential and stray current in the urban rail transit," IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, early access.
- [5] M. Niasati and A. Gholami, "Overview of stray current control in DC railway systems," in Proc. IET Int. Conf. Railway Eng. (ICRE), Mar. 2008, pp. 1–6.

Available online at www.sciencedirect.com**ScienceDirect**

Energy Reports 8 (2022) 1166–1174

www.elsevier.com/locate/egy

2022 The 4th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems (CEES 2022),
2–4 April, 2022, Tokyo, Japan

Evaluation of rail potential and stray current reduction by using NEG-ETP in DC railway system

Panida Hanrob^a, Thanatchai Kulworawanichpong^a, Chaiyut Sumpavakup^b,
Tosaphol Ratniyomchai^{a,*}

^a School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

^b Research Centre for Combustion Technology and Alternative Energy – CTAE, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of
Technology North Bangkok, Bangkok 10800, Thailand

Received 3 June 2022; accepted 25 June 2022

Available online 6 July 2022

Abstract

The NEG-ETP system that providing zero resistance closed circuit reducing the reverse path of current on the running rail is presented in this article. The NEG-ETP system is created by installing additional electronics in conventional electrical systems. Without modifying trains, tracks, or tunnels. Using MATLAB program through models for MRT purple line (North), rail potential and stray current are assessed in accordance with EN 50122 standards of all three systems, including CON-ETP, REC-ETP, and NEG-ETP. According to the simulation, the percentage reduction of the rail potential was 9.14% when the REC-ETP versus the CON-ETP system was 32.99% when the NEG-ETP system compared to the CON-ETP system and 26.25% when the NEG-ETP system versus the REC-ETP system could be seen in this negative resistance converter system, which can reduce the cost of rails and leakage currents in the DC system. It can also be applied to new rail transport.

© 2022 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 4th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems, CEES, 2022.

Keywords: Rail potential; Stray current; Negative resistance converter (NEG); DC railways; Return conductor

1. Introduction

There are two electrical systems used to drive trains, namely the direct current system (DC) and the alternating current system (AC). As for the electricity supply system to drive the electric trains, there are two systems, namely the third rail system and overhead wire system. Which the overhead wire system, there will be a structure of the current feed system above the rails, often used for long-distance train journeys. The third rail system has advantages in terms of visual pollution effects. There is no cluttering power supply structure above the railroad tracks. But there are restrictions on use and safety. This system is often used on subways or mass transit systems. In this research, the focus is on the third rail direct current system due to case studies MRT purple line (North) organized in this.

* Corresponding author.

E-mail address: tosaphol@sut.ac.th (T. Ratniyomchai).

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.081>

2352-4847/© 2022 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 4th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems, CEES, 2022.

Nomenclature

NEG-ETP	Negative resistance converter electric traction power.
CON-ETP	Conventional electric traction power.
REC-ETP	Return conductor electric traction power.
NEG	Negative resistance converter.
FEC	Feeder cable.
SW	Switch unit.
u_r	Voltage of zero-resistance loop.
u_{NEG}	Output voltage of NEG.
u_{FEC}	Voltage across FEC.
u_{SW}	Conducting voltage drop of SW.
u_{rT}	Rail potential of CON-ETP.
u_{rR}	Rail potential of REC-ETP.
u_{rN}	Rail potential of NEG-ETP.
i_{rT}	Stray current of CON-ETP.
i_{rR}	Stray current of REC-ETP.
i_{rN}	Stray current of NEG-ETP.

The traction current flows back to the power substation through the track in DC electric propulsion systems such as electric trains, trams, and mass transit systems causing the rail potential. Part of the reverse current flows to the soil through the running rail. This section is called stray current [1]. In running rails and underground metallic pipes, stray current can cause substantial electrochemical corrosion and when people enter or exit the train, the rail potential might create an electrical shock [2].

However, this paper will focus on the rail potential and stray current reduction in DC electric train system by a new method called NEG-ETP. It is a new method in which additional equipment is installed in the old system as shown in Fig. 1. Whether it is a CON-ETP and a REC-ETP. It is a method of bringing the conductors parallel to the running track [3]. Extra tracks divide the current and reduce the equivalent resistance of running rail. However, installing extension rails and modifying relevant components in an electric train system can often be costly and constraints on cable quantity and cost. If the number of cables is not enough the result of the reduction would be unclear [4]. These two systems are the ones that are currently in use. The new method uses the principle by reducing the rail current that returns on the moving rails by applying zero resistance in a closed circuit [5].

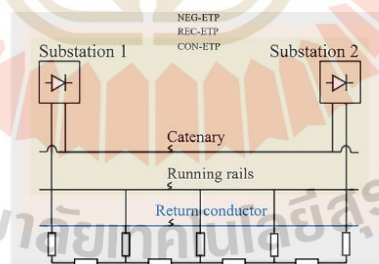


Fig. 1. Diagram of CON-ETP, REC-ETP and NEG-ETP.

The topics of this article are organized as follows: The operation principles and assessment are in-depth analysis in Section 2. Section 3 presents the model of case study. The simulation results and mitigation percentage of rail potential and conclusion are proposed in Section 4 and Section 5, respectively.

2. Operating principles and assessment

The power supply systems of electric traction substations include rail conductors or contact lines, and tracks or running rails, with CON-ETP, REC-ETP, and NEG-ETP layouts available presented in Fig. 1. and separated in Fig. 2. The classical mathematical model for double-side power supply is determined by a model for supplying power to the train, including power supply substation, trains, rail resistance and conductive unit length to make it easier to calculate as shown in Fig. 3, when I_{x1} and I_{x3} are currents flowing in and out at nodes a and c, respectively, and L_1 is the considered length of this section.

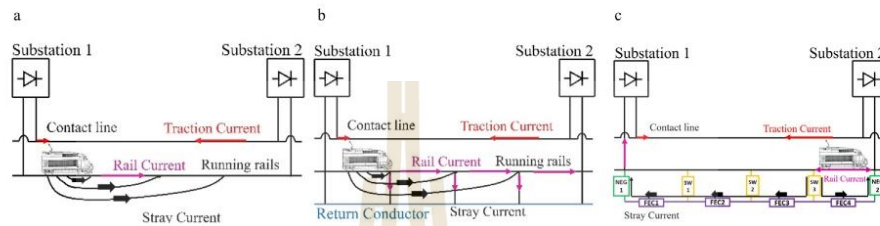


Fig. 2. Operation principles of return current to substations. (a) CON-ETP (b) REC-ETP (c) NEG-ETP.

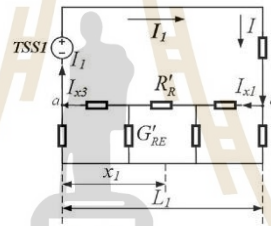


Fig. 3. Classical mathematical model for double-side power supply for calculation between considered nodes.

2.1. Conventional electric traction power system

Fig. 2(a) shows the configuration of CON-ETP as a train travelling between substation 1 and substation 2, traction current is delivered to the train via the overhead wire, which is parallel to the rails. Once the power supplies the electric traction motor on the train, the current will go to the wheel and running rail then back to substation. In addition, the stray current capably flows to the ground and returns to substation [6].

For the CON-ETP operation, the parameters A_k and B_k are obtained in terms of the summation of currents. It would be seen the mathematical model in Fig. 3. If the train moves a distance x_1 from node a to node c for a distance L_1 , rail potential, u_{rT} , and stray current, i_{sT} , are computed as follows in Eq. (1) when $\alpha = \sqrt{R'_R G'_{RE}}$

$$\begin{cases} u_{rT(k)} = R_g(A_k e^{x\alpha} + B_k e^{-x\alpha}), & 2 \leq k \leq n \\ i_{sT} = \frac{1}{2R_g} \int_0^L \sum_{k=2}^n |u_{rT(k)}| dx = \frac{u_{rT(k)}}{R_g} \end{cases} \quad (1)$$

According to the $x_1 = 0$ (node a) and $x_1 = L_1$ (node c). Substitution such values in Eq. (1) can be expressed in Eqs. (2) and (3), respectively.

$$I'_R(0) = A_k e^{\alpha(0)} + B_k e^{-\alpha(0)} = A_k + B_k \quad (2)$$

$$I'_T(L_1) = A_k e^{\alpha(L_1)} + B_k e^{-\alpha(L_1)} \quad (3)$$

When $I'_R(0) = I_{x3}$ and $I'_R(L_1) = I_{x1}$ ($B = I_{x3} - A$). From the above equation, it was found that the variables A_k and B_k which can be calculated according to as follows in Eq. (4):

$$\begin{aligned} A_k e^{\alpha L_1} + (I_{x3} - A_k) e^{-\alpha L_1} &= I_{x1} \\ A_k &= \frac{I_{x1} - I_{x3} e^{-\alpha L_1}}{e^{\alpha L_1} - e^{-\alpha L_1}} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2. Return conductor electric traction power system

Fig. 2(b) shows the configuration of REC-ETP. The parallel rails and the return conductors are connected at the definite distance for example every 5–6 km. The rail currents mostly return to substations through the return conductors [7]. As a result, the amount of rail current leaking to the ground is decreased.

The calculation in REC-ETP can be also calculated from Eq. (1) and considered mathematical model in Fig. 3. However, the model of REC-ETP is slightly different in comparison with CON-ETP with additional nodes of the next sections.

2.3. Negative resistance converter electric traction power system

Fig. 2(c) shows the schematic diagram of NEG-ETP. NEG, FECs, and SWs are included in the CON-ETP model. During a train running pass SWs in the closed circuit, SWs would be activated, enabling the return current to take a shorter path [8]. The output voltage of NEG is changed to match the negative equivalent voltage of FECs and SWs that makes the voltage summation in the new closed circuit to be zero. The zero resistance is ideally obtained from the turning-on SWs to NEG's connection.

As illustrated in Fig. 4(a), the NEG is a full-bridge bipolar-switching dc-dc converter with a adaptable tuning output voltage and output resistance. A bidirectional switch, or SW includes a couple IGBTs connected in series with reverse direction illustrated in Fig. 4(b). The model of FEC is configured the parallel of the rail resistors as shown in Fig. 4(c). Therefore, the return current can flow in both direction via NEG and SWs.

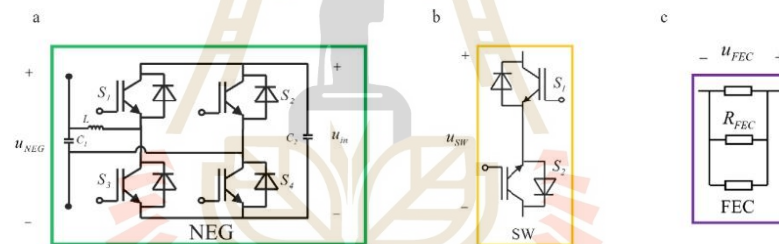


Fig. 4. Power electronic devices connected in NEG-ETP. (a) NEG. (b) SW. (c) FEC.

The mitigation of rail potential and stray current could be obtained by separated the rail to be a section with the specific length. To simplify the case study, the running rails would be separated into four sections, then the output resistances of NEG are determined in Eqs. (5) and (6). Rail potential, u_{rN} and stray current, i_{sN} in NEG-ETP shown in Fig. 3, are expressed in Eq. (7), where parameters G_k and H_k are derived from the proof of each consideration scope given in variable by applying KVL and KCL calculation.

$$\begin{aligned} u_{NEG1} &\equiv \begin{cases} -u_{FEC1} - u_{SW1}, & k=1 \\ -\sum_{j=1}^{j=k-1} u_{FECj} - u_{SW(k-1)}, & 2 \leq k \leq n \end{cases} \\ u_{NEG2} &= \begin{cases} \sum_{j=k+1}^{j=n} u_{FECj} - u_{SW(k)}, & 1 \leq k \leq n-1 \\ u_{FEC(n)} - u_{SW(n-1)}, & k=n \end{cases} \end{aligned}$$

$$\text{So } R_{NEG1} = \frac{u_{NEG1}}{i_{NEG1}} \quad (5)$$

$$\text{So } R_{NEG2} = \frac{u_{NEG2}}{i_{NEG2}} \quad (6)$$

$$R_{NEG1} = \begin{cases} -R_{FECj} - R_{SW1}, & k = 1 \\ -\sum_{j=1}^{j=k-1} R_{FECj} - R_{SW(k-1)}, & 2 \leq k \leq n \end{cases}$$

$$R_{NEG2} = \begin{cases} -\sum_{j=k+1}^{j=n} R_{FECj} - R_{SW(k)}, & 1 \leq k \leq n-1 \\ -R_{FEC(n)} - R_{SW(n-1)}, & k = n \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{rN(k)} = R_g(G_k e^{x\alpha} + H_k e^{-x\alpha}), & 1 \leq k \leq n \\ i_{sN} = \frac{1}{2R_g} \int_0^L \sum_{k=1}^{k=n} |u_{rN(k)}| dx = \frac{u_{rN(k)}}{R_g} \end{cases} \quad (7)$$

2.4. Assessment stray current for the MRT purple line

The stray current offered as a reference value for electric trains should be no more than 2.5 mA/m/track to assess stray current according to EN 50122-1 and EN 50122-2 [9,10], however the runway stray current measurement is a concern. Only the influence caused by stray current may be measured, which is essentially impossible. This will be the rail's own potential. The rail potential may be computed using EN 50122-2 determined in Eq. (8).

$$U_{RE} = 0.5 \times I_{tr} \times R_c \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_c}\right)}\right) \quad (8)$$

where, U_{RE} is the voltage value along the length (V), I_{tr} is the mean return current circuit of the section under consideration during peak load (A), R_c is the resistance characteristics of the rails per unit length (Ω/km), L is the length of interest to consider for the route (km), L_c is the length of the track (km). Which values R_c and L_c can be obtained from Eqs. (9) and (10)

$$R_c = \sqrt{\frac{R'_R}{G'_{RE}}} \quad (9)$$

$$L_c = \frac{1}{\sqrt{R'_R \times G'_{RE}}} \quad (10)$$

where, R'_R is the rail resistance per unit length (Ω/km), G'_{RE} is the conductivity per unit length between rail and ground (S/km).

3. Model of case study

The flow chart to evaluate the rail potential is presented in Fig. 5. Firstly, the detection of train location is obtained by the train movement calculation with obtaining the train position, train speed and train power. Secondly, REC-ETP and NEG-ETP calculate the rail potential for rail-section and CON-ETP is also calculated the rail potential. If a train travels to the end of the track, then the simulation will also be end. A train simulation program is carried out in MATLAB using a model of the train in MRT purple line for determining the rail potential. It includes 16 passenger stations and 10 traction substations. The train and system information of the MRT purple line (North) are presented in Table 1. and the station location information is shown in Table 2. The train is electrified through the third rail with a rated voltage of 750 V.

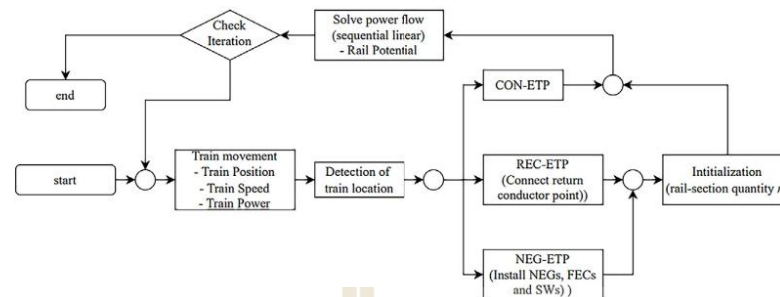


Fig. 5. Rail potential evaluation procedure: CON-ETP, REC-ETP and NEG-ETP.

Table 1. Train and system information of the MRT purple line (North) for simulation.

Specific data	Information	Value	Unit
Train parameters			
Movement feature	Max. speed	80	km/h
	Max. acceleration	1.2	m/s ²
	Max. deceleration	0.9	m/s ²
Weight	Train mass	135	ton
	Passenger mass	75	ton
Tractive effort curve	Maximum tractive effort	228.8	N
	Maximum braking effort	168.8	N
Efficiency	Motor power factor	0.86	–
Auxiliary power	Constant load	270	kW
Train resistance			
3rd Rail resistance		0.007	Ω/km
Track resistance		0.0175	Ω/km
Earth resistance		12	Ω
Rail-to-earth conductance		2	S/km
Substation parameter			
Voltage no-load		750	V
Short-circuit capacity		50	MW

4. Simulation results

4.1. Assessment stray current for the MRT purple line (North)

The stray current assessment for the MRT Purple Line (North) is calculated from (8), (9) and (10) mentioned above. It was found a rail potential of 48.97 V and a stray current of 0.0979 mA/m for a rating of 7106.413 A and compared with the simulation result of a single train movement as shown in Fig. 5, as shown in Table 3.

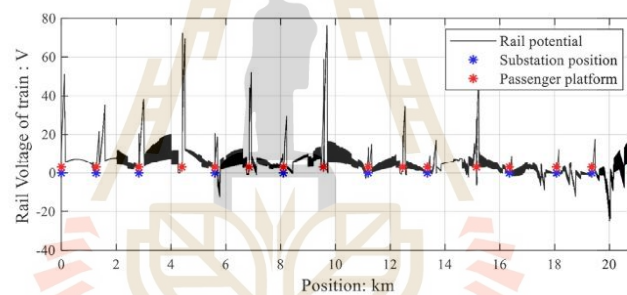
From Table 3, it is found that the rail potential is different. As a result of a single train simulation, there is stray current accumulated in the ground that flows back into the propulsion substation. However, both obtained rail potentials are standardized to the EN 50122-2 standard, i.e., the allowable voltage is no more than 120 V, and it is recommended that no damage to the railway up to 25 years, if stray current per unit is below 2.5 mA/m. The simulation results of CON-ETP, REC-ETP and NEG-ETP systems can be described in Figs. 6–8, respectively.

Table 2. Station location information.

Station code	Substation code	Station name	Station position (km)
PP01	TSS01	Khlong Bang Phai	0.00
PP02	TSS02	Talad Bang Yai	1.27
PP03	TSS03	Sam Yack Bang Yai	2.83
PP04	–	Bang Phlu	4.40
PP05	TSS04	Bang Rak Yai	5.60
PP06	–	Bang Rak Noi Tha It	6.85
PP07	TSS05	Sai Ma	8.10
PP08	–	Phra Nang Klao Bridge	9.57
PP09	TSS06	Yack Nonthaburi 1	11.20
PP10	–	Bang Krasor	12.46
PP11	TSS07	Nonthaburi Civic Center	13.36
PP12	–	Ministry of Public Health	15.15
PP13	TSS08	Yack Tiwanon	16.35
PP14	TSS09	Wong Sawang	18.07
PP15	TSS010	Bang Son	19.36
PP16	–	Tao Poon	20.94

Table 3. Comparison of stray current assessment results during single train motion simulations with rail potential calculations obtained from grounding models according to EN 50122-2.

Assessment procedure	Rail potential (V)
Simulation result of a single train movement	76.38
Calculation of rail potential according to EN 50122-2	48.97

**Fig. 6.** Rail potential of CON-ETP.

4.2. Conventional electric traction power system

Fig. 6 shows the rail potential of the CON-ETP system. At the passenger station 8 (PP08) located between substation 5 and substation 6 (TSS05-TSS06), the maximum rail potential of 76.38 V is obtained. Considering the other peaks of rail potential, they are occurred at passenger station located between substations during the train operation in accelerating mode. The rail potential would reduce when the train running in cursing and coasting modes.

4.3. Return conductor electric traction power system

As a case study, the connected points of the return conductor and the running rail are located at of 0, 5, 10, 15, 19.36 and 20.94 km. The maximum rail potential of 69.40 V is obtained at the passenger station 10 (PP10) located halfway between substation 6 and 7 (TSS06-TSS07) as shown in Fig. 7. It is pointed out that the peak rail

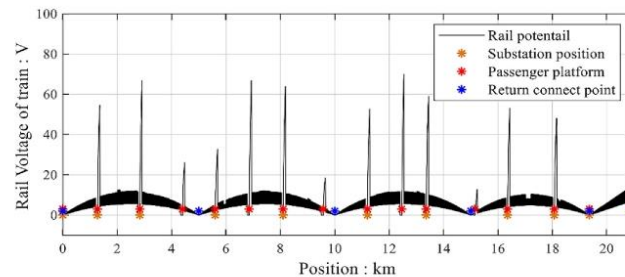


Fig. 7. Rail potential of REC-ETP.

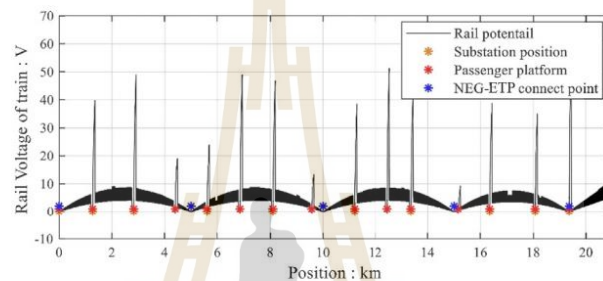


Fig. 8. Rail potential of NEG-ETP.

potential occurred at each passenger station located around middle between the connected points is higher than the passenger station located near the connected point. The maximum rail potential of REC-ETP system is lower than that of CON-ETP system of 9.14%.

4.4. Negative resistance converter electric traction power system

The connected points of the return conductor and the running rail are located at same position as the REC-ETP system. The rail potential of the NEG-ETP system is shown in Fig. 8. At passenger station 10 (PP010) located halfway between substation 6 and 7 (TSS06-TSS07), the maximum rail potential of 51.18 V is obtained. The peak rail potential occurred at each passenger station located around middle between the connected points is higher than the passenger station located near the connected point similar with the REC-ETP system, but a bit lower. The maximum rail potential of the NEG-ETP and the REC-ETP are reduced by 32.99% and 9.14% in comparison with the CON-ETP as shown in Table 4. Regarding the maximum rail potential evaluation, the NEG-ETP is lower than the REC-ETP by 26.25%.

Table 4. Percentage reduction of rail potential.

System	Rail potential (V)	Percentage decrease (%)
CON-ETP (Base case)	76.38	—
REC-ETP	69.40	9.14
NEG-ETP	51.18	32.99

5. Conclusion

In this paper, NEG-ETP is a new concept developed by installing additional power electronic equipment, there is no need to modify the original structure of the railway infrastructure, recommended in the urban rail transportation to mitigate rail potential and stray current. The configuration of NEG-ETP is separated into several rail-sections, with non-train rail-sections having zero rail current. From proposed method, this was applied to the mass rapid transit system namely MRT purple line (North), in Thailand simulated by the MATLAB/M-file. This was pointed out that rail potential and stray current would be evidently mitigated by NEG-ETP as a percentage reduction compared to CON-ETP and REC-ETP is 9.14% and 32.99% respectively.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

No data was used for the research described in the article.

Acknowledgements

This work and Research ID: 2536975 were supported by (i) Suranaree University of Technology (SUT), Thailand, (ii) Thailand Science Research and Innovation (TSRI), Thailand and (iii) National Science, Research and Innovation Fund (NSRF), Thailand.

References

- [1] Paul D. DC stray current in rail transit systems and cathodic protection [History]. *IEEE Industry Applications Magazine* 2015;22(1):8–13.
- [2] Chuchit T. Study and assessment of stray current in DC rapid transit system (Ph. D. Thesis, Electrical Engineering), Thailand: Suranaree University of Technology; 2018, p. 79–87.
- [3] Kulworawanichpong T. Optimising AC electric railway power flows with power electronic control (Ph.D. Thesis), UK: University of Birmingham; 2003, p. 8–11.
- [4] Dekker NMJ. Stray current control - an overview of options. *IEE Seminar. DC Traction Stray Current Control - 'Offer a Stray a Good Ohm?'*. 1999, 8–8.
- [5] Gu J, Yang X, Zheng TQ, Shang Z, Zhao Z, Guo W. Negative resistance converter traction power system for reducing rail potential and stray current in the urban rail transit. *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 2021;7(1):225–39.
- [6] Niasati M, Gholami A. Overview of stray current control in DC railway systems. In: *International Conference on Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age*. 2008, p. 1–6.
- [7] Kulworawanichpong T. Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method. *J Modern Transp* 2015;23(4):241–51.
- [8] Shang Z, Yang X, Gu J, Zheng TQ. Modeling of negative resistance converter traction power system. In: *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2020, p. 6367–71.
- [9] EN 50122-1. Railway applications – Fixed installation – Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 1: Protective provisions against electric shock. 2011.
- [10] EN 50122-2. Railway applications – Fixed installation – Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 2: Provisions against the effects of stray current caused by DC traction systems. 2010.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวปณิดา หาญรบ เกิดเมื่อวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2541 เกิดที่อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับ 2 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2562 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเมื่อ พ.ศ.2563 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้เป็นผู้ช่วยสอนในวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลงานตีพิมพ์ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ง

