บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ปัญหาการกัดกร่อนเป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับรถไฟกระแสตรง เนื่องจาก กระแสไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟจะไหลกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนผ่านรางวิ่ง ส่วนหนึ่งของ กระแสย้อนกลับจะไหลลงสู่พื้นดินไปยังโครงสร้างเสริมแรง โครงสร้างของเสายกระดับหรืออุโมงค์ใน บริเวณใกล้เคียงกับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ในกระแสย้อนกลับในส่วนนี้ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกัด กร่อนของโลหะ ส่งผลต่อการลดอายุการใช้งานของรางวิ่งและอุปกรณ์ของระบบการต่อลงดิน อีกทั้ง ก่อให้เกิดปัญหาด้านศักย์ไฟฟ้าที่รางที่เป็นอันตรายในเรื่องความปลอดภัยของผู้โดยสาร ดังนั้น จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางวิ่งและกระแสไฟฟ้ารั่วเพื่อสร้าง ความปลอดภัยให้กับบุคคลและโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นโลหะผ่านทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ถูกกล่าวอ้างใน บทนี้

3.2 กระแสรั่วกัดกร่อน



รูปที่ 3.1 เส้นทางการกัดกร่อนสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง ที่มาภาพ : (Memon and Fromme., 2014)

ในระบบขนส่งมวลชนกระแสตรงผ่านตัวนำต่าง ๆ ที่วิ่งตามเส้นทางของระบบขนส่งมวลชน ตามหลักการแล้วกระแสย้อนกลับควรกลับไปที่สถานีย่อยผ่านรางวิ่ง อย่างไรก็ตามเนื่องจากไม่มีฉนวน ที่สมบูรณ์แบบและเพราะรางมีความต้านทานจำกัด เปอร์เซ็นต์ของกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับที่รั่วลงสู่ พื้นโลก และใช้เส้นทางที่มีความต้านทานน้อยที่สุดระหว่างทางไปยังสถานีย่อย เส้นทางที่มีความ ต้านทานน้อยที่สุดที่กระแสไฟฟ้าย้อนกลับนี้อาจรวมถึงอุปกรณ์โลหะ การเสริมแรงในโครงสร้างโลหะ อื่นๆ และดิน กระแสไฟฟ้านี้ที่รั่วและพบเส้นทางที่มีความต้านทานน้อยที่สุดเรียกว่า กระแสไฟฟ้ารั่ว และการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นระหว่างทางไปยังสถานีย่อยเรียกว่าการกัดกร่อนของกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้ารั่วนั้นตรวจจับได้ยากเพราะไม่ปกติ เนื่องจากรางมีการจราจรแบบไดนามิก ดังนั้น วิธีการทั่วไป คือ การบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าในท่อพื้นที่ที่น่าสงสัยเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง รูปที่ 3.1 แสดงเส้นทางของกระแสไฟฟ้าย้อนกลับในระบบขนส่งกระแสตรง เป็นแบบจำลองวงจร อย่างง่ายแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบพื้นฐานที่มีผลต่อระดับของกระแสไฟฟ้ารั่วที่เกิดจากระบบไฟฟ้า แรงฉุดลากกระแสตรง การกัดกร่อนมักถูกกำหนดเป็นการเสื่อมสภาพของวัสดุที่เรียกกันทั่วไปว่าขึ้น สนิม เพราะว่าปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็น อากาศ น้ำ หรือดิน ในเงื่อนไขทั่วไป กระบวนการ กัดกร่อนเป็นสารเคมีธรรมชาติปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับสิ่งรอบข้างซึ่งโลหะถูกออกซิไดซ์ (สูญเสีย อิเล็กตรอน) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถึงคุณสมบัติของโลหะ แนวโน้มการกัดกร่อนจะแตกต่างกัน ไปตามโลหะต่าง ๆ และขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมโดยรอบ

กระบวนการกัดกร่อนต้องใช้องค์ประกอบ 4 อย่าง ได้แก่ อิเล็กโทรไลต์ แอโนด แคโทด และ เส้นทางนำไฟฟ้า การเกิดออกซิเดชัน (การสูญเสียอิเล็กตรอน) เกิดขึ้นที่ขั้วบวก เกิดเป็นไอออนใน ขณะที่ลดลง (ได้รับอิเล็กตรอนหรือลดลงในสถานะออกซิเดชัน) เกิดขึ้นที่แคโทดซึ่งทำให้แอโนด ละลายในขณะที่แคโทดยังคงไม่บุบสลาย อิเล็กโทรไลต์ถูกกำหนดให้เป็นสารละลายของกรด เบส หรือ เกลือที่มีไอออนอิสระผ่านซึ่งกระแสไฟฟ้าไหล ในกรณีของอิเล็กโทรไลซิสของโครงสร้างใต้ดิน ความชื้นในดินพร้อมกับกรดที่ละลาย เกลือ และด่างทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ในขณะที่ท่อยูทิลิตี้ โลหะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด

3.2.1 การเกิดกระแสรั่ว

ในกรณีส่วนใหญ่ความต้านทานของรางต่อพื้นดิน (track-to-earth) นั้นเป็นส่วน หนึ่งของกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับที่จะไหลผ่านพื้นดิน จึงทำให้ดินทำหน้าที่เหมือนอิเล็กโทรไลต์ เมื่อ โลหะที่สัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ ไม่ว่าจะเป็นดินที่มีความชื้น จะแสดงปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งปกติจะอยู่ใน ภาวะสมดุล และกระแสไฟฟ้านำไปสู่การรบกวนของภาวะสมดุลนี้ กล่าวคือกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากราง สู่พื้นดินก่อให้เกิดการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี ในกรณีนี้ใช้โลหะที่เป็นเหล็ก ดังนั้นปฏิกิริยาทางเคมีและ ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ทำให้กระบวนการที่เกิดขึ้น เกิดขึ้น 2 กระบวนการพร้อมกัน ดังรูปที่ 3.2 และ สมการที่ (3.1), (3.2) ตามลำดับ เกิดปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction) หรือ ออกซิเดชัน (oxidation) คือ ปฏิกิริยาการให้อิเล็กตรอน

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \tag{3.1}$$

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

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$$
(3.2)



รูปที่ 3.2 กระบวนการกัดกร่อนของกระแสไฟฟ้ารั่ว ที่มาภาพ : (Niasati and Gholami., 2009)

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

3.2.2 ผลกระทบกระแสรั่ว

ผลกระทบของกระแสรั่ว ส่งผลกระทบหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านความเสียหายของ อุปกรณ์หรือโครงสร้าง และด้านความปลอดภัยของบุคคล

(1) ความเสียหายการกัดกร่อนของกระแสรั่ว

ความเสียหายนี้สามารถมองเห็นได้เมื่อเวลาผ่านไป โดยทั่วไปแล้วกระแสรั่ว สามารถกัดกร่อนได้หลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นสายโทรศัพท์ สายไฟ หรือท่อนำส่งแก๊สทั้งหมด และที่ สำคัญสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง นั่นคือการกัดกร่อนโครงสร้างเสริมแรง โครงสร้างของเสาทาง ยกระดับ โครงสร้างอื่นของรถไฟ และส่วนประกอบที่มีการสัมผัสกับดินที่เป็นโลหะ เช่น สายเคเบิล ท่อลำเลียง เป็นต้น ดังรูปที่ 3.3 แสดงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับท่อโลหะที่อยู่ใต้ดินและรูปที่ 3.4 แสดง การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟ 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

ความปลอดภัยทางไฟฟ้าไม่ได้ถูกกำหนดขึ้นเฉพาะการป้องกันอุปกรณ์หรือ บริภัณฑ์ที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบไฟฟ้าเท่านั้น ด้านความปลอดภัยด้านบุคคลของประชาชนที่มาใช้ บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่อาจจะส่งผลกระทบต่อความเสี่ยงของการ ได้รับอันตรายจากแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch voltage) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ยอมให้ผ่านได้ที่ระบุไว้ใน มาตรฐาน EN 50122-1 และ HD 637 S1 สำหรับอันตรายจากไฟฟ้าช็อตต่อมนุษย์นั้นขึ้นอยู่กับการ ตรวจวัด การตรวจสอบความต้านทานของร่างกายอย่างละเอียดและผลกระทบของกระแสที่มีผลต่อ ร่างกาย (IEC 60 479-1) ซึ่งมีค่ามาตรฐานที่ระบุไว้แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.1

เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า และผู้โดยสาร ทุกคนไม่ได้ทราบถึงความรู้ด้านไฟฟ้า การป้องกันอันตรายทางไฟฟ้าด้านความปลอดภัยของบุคคลจึง ต้องได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษ ดังนั้นวิธีที่ง่ายที่สุด คือ ต้องมีระยะห่างขั้นต่ำระหว่างตำแหน่งของ ผู้โดยสารกับตัวนำที่ใกล้ที่สุดของระบบรถไฟฟ้า กรณีหากไม่สามารถเว้นระยะห่างได้ สามารถมีเพิ่ม อุปกรณ์เสริมได้ ไม่ว่าจะเป็นเส้นรั้ว ประตูหรือฉากกั้น เป็นต้น (กุลวรวานิชพงษ์., 2557)



รูปที่ 3.6 แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ Ut ตามมาตรฐาน EN 50122-1 และมาตรฐาน HD 637 S1 ที่มาภาพ : (Friedrich et al., 2009)

ระยะเวลา (t)	แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ (permissible voltage)							
(s)	ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (V)	ระบบไฟฟ้ากระแสตรง (V)						
0.02	940	940						
0.05	935	770 660 535 480						
0.1	842							
0.2	670							
0.3	497							
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						

ตารางที่ 3.1 แรงดันที่ยอมให้ผ่านได้ Ut ตามมาตรฐาน EN 50122-1

3.3 การประเมินกระแสไฟฟ้ารั่ว

ตามมาตรฐาน EN 50122-2 ปริมาณกระแสรั่วที่กำหนดเป็นค่าอ้างอิงสำหรับรถไฟฟ้าควรมี ค่าไม่เกิน 2.5 mA/m/track (EN50122-1., 2011), (EN50122-2., 2010) แต่ปัญหาที่พบ คือ การวัด กระแสรั่วจากทางวิ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ ทำได้เพียงวัดผลที่เกิดจากกระแสรั่วเท่านั้น ซึ่งจะเป็น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทางวิ่งนั่นเอง ตามมาตรฐาน EN 50122-2 สามารถคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางได้ จะ ขึ้นอยู่กับค่าต่าง ๆ ดังสมการที่ (3.3), (3.4) และ (3.5) ตามลำดับ

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

$$R_c = \sqrt{\frac{R_R'}{G_{RE}'}}$$
(3.3)

$$L_{C} = \frac{1}{\sqrt{R_{R} \times G_{RE}}}$$
(3.5)

โดย $U_{
m RE}$ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง (V)

- G'_RE คือ ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางกับดิน (S/km)
- *I_{tr}* คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าวงจรไหลกลับของส่วนที่พิจารณาสนใจ
 ในช่วงที่มีโหลดสูงสุด (A)
- *L* คือ ค่าความยาวที่สนใจพิจารณาของเส้นทาง (km)
- *R*[']_R คือ ค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาว (Ω/km)

การใช้ศักย์ไฟฟ้าที่รางและค่าความนำของรางวิ่งเทียบกับดินเพื่อคำนวณหาค่ากระแสรั่วต่อ หน่วยความยาวสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.6) เมื่อ I'_s คือ กระแสไฟฟ้ารั่วไหลที่จากรางวิ่งเมื่อ เทียบกับความยาว

$$I'_{\rm S} = U_{\rm RE} \times G'_{\rm RE} \tag{3.6}$$

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

$$I'_{\rm S} = 0.5 \times \frac{R_{\rm C}}{L_{\rm C}} \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_{\rm C}}\right)}\right) \tag{3.7}$$

สำหรับการประเมินกระแสรั่วมีความจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ของความต้านทานของราง วิ่ง และค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับดินเป็นสำคัญเพื่อใช้ในการประมาณค่า ศักย์ไฟฟ้าที่ราง กระแสรั่วลงดินและค่าแรงดันตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรง สำหรับการ ทดสอบแบบระบบเปิด สมมุติฐานว่ามีค่าอนันต์ตามความยาวของอุโมงค์ในแต่ละส่วนที่สนใจพิจารณา นอกจากนี้จะไม่ลดผลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถไฟที่อยู่ติดกันและค่าความนำต่อหน่วยความยาว ของโครงสร้างอุโมงค์กับดิน ค่าจากการคำนวณอาจมีค่าสูงมากกว่าความเป็นจริงได้

3.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าปัจจัยสำคัญ คือ ตำแหน่ง ความเร็ว และอัตราเร่งในระหว่างการ เคลื่อนที่เชิงเส้นของรถไฟฟ้าขบวนเดียว การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจะถูกต้านด้วยปัจจัยอื่น ๆ เช่น แรง ต้านของราง ความลาดชันของราง แรงโน้มถ่วง และแรงต้านทางอากาศ เป็นต้น ความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรเหล่านี้จะอยู่ภายใต้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) (กุลวรวา นิชพงษ์., 2558) (Steimel A., 2008) เมื่อพิจารณจากรูปที่ 3.7 แสดงรถไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่บนพื้นผิว รางที่ลาดเอียง สมการที่ใช้อธิบายของแรงกระทำทั้งหมดที่กระทำต่อรถไฟฟ้าดังสมการที่ (3.8)



รูปที่ 3.7 การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าบนรางลาดเอียง

$$F_{T} - F_{R} - F_{G} = M_{eff} a = (M_{t}(1 + \lambda_{w}) + M_{l})a$$

$$F_{R} = F_{RR} + F_{D}$$

$$F_{G} = M_{eff} g \sin \theta$$
(3.8)

โดย	$F_{\scriptscriptstyle T}$ คือ แรงฉุดของหัวรถจักร	(N)
	F _R คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า	(N)
	$F_{_{G}}$ คือ แรงต้านทานเกรเดียนต์	(N)
	$F_{_D}$ คือ แรงต้านอากาศ	(N)
	$_{m{\mathcal{g}}}$ คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, 9.8 m/s 2	
	heta คือ องศามุมเอียงเทียบกับเส้นในระนาบ	
	<i>a</i> คือ อัตราเร่ง	(m/s²)
	<i>M</i> , คือ น้ำหนักรถเปล่า	(kg)
	$\lambda_{_{\!W}}$ คือ ตัวประกอบน้ำหนักผู้โดยสาร	
	M, คือ น้ำหนักของผู้โดยสาร	(kg)

1) แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

นอกเหนือจากแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟ แรงต้านทานเกรเดียนต์ และแรงต้าน อากาศที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว แรงต้านทั้งหมดสามารถกำหนดได้โดยสมการเดวี (Davis's equation) ดังสมการที่ (3.9)

$$F_R = A + Bv + Cv^2 \tag{3.9}$$

โดย F_R คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ (N) u คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (km/h) A,B,C คือ สัมประสิทธิ์เดวี (kN.kNh/km.kNh²/km²)

ผู้ผลิตรถไฟฟ้าต่าง ๆ ทั่วโลกได้มีการพัฒนาสมการเดวีเพื่อนำมาใช้คำนวณแรงต้านการ เคลื่อนที่ให้เหมาะสมกับการให้บริการเดินรถของประเทศนั้น ๆ ดังสมการที่ (3.10) นำเสนอสมการเด วีของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) ตามมาตรฐาน JIS E 6002 (มาตรฐานทางอุตสาหกรรมของ ประเทศญี่ปุ่น)

$$F_{R} = (1.65 + 0.0247v)W_{m} + (0.78 + 0.0028v)W_{t} + \{0.78 + 0.0078(n-1)\}v^{2}$$
(3.10)

(kgf)

โดย

- $F_{_R}^{}$ คือ แรงต้านการเคลื่อนของรถu คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (km/h)
- *W_m* คือ น้ำหนักทั้งหมดของตู้มอเตอร์ในรถไฟ (ton)
- $oldsymbol{W}_{_{t}}$ คือ น้ำหนักทั้งหมดของตู้รถไฟ (ton)
- *n* คือ จำนวนตู้ในขบวนรถไฟ
- 2) แรงต้านทานเกรเดียนต์

โดยทั่วไประดับความชั่นหรือเกรเดียนต์ของเส้นทางการเดินรถไฟฟ้าจะมีน้อย และมี การเปลี่ยนแปลงระดับความชั่นบ่อย ดังรูปที่ 3.7 แรงต้านทานเกรเดียนต์หรือแรงที่เกิดจากความลาด เอียงของการเคลื่อนที่ สามารถหาได้ดังสมการที่ (3.11)

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

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

3) แรงฉุดและแรงเบรกของขบวนรถไฟฟ้า

แรงฉุดขบวนรถไฟฟ้าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยโดยเฉพาะน้ำหนักและความเร็วของรถไฟฟ้า ผู้ผลิตรถไฟฟ้าจะทำการทดสอบและนำเสนอในรูปของแรงฉุดขบวนรถไฟฟ้าเทียบกับความเร็วของ รถไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.8 แสดงกราฟลักษณะสมบัติแรงฉุดและแรงเบรกของโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)





4) การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเพื่อรับส่งผู้โดยสารระหว่างสถานีผู้โดยสารนั้น จะมีรูปแบบการ เคลื่อนที่ภายใต้โหมดการทำงาน 5 โหมด ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว (Acceleration mode) ทำหน้าที่ เริ่มต้นในการคำนวณและใช้สำหรับการควบคุมความเร็วขณะรถเคลื่อนที่ โดยมีการควบคุมความเร็ว ในโหมดนี้แบ่งเป็น 2 เงื่อนไข คือ เมื่อความเร็วต่ำกว่าความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ให้รถไฟเข้าสู่โหมดเร่ง ความเร็ว แต่ถ้าความเร็วสูงกว่าความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ให้รถไฟเข้าสู่โหมดควบคุมความเร็วคงที่ โหมดความเร็วคงที่ (Cruising mode) โหมดแล่นด้วยแรงเฉื่อยของรถไฟ (Coasting mode) โหมด การเบรก (Deceleration mode) ทำหน้าที่ลดความเร็วของรถไฟเพื่อเข้าจอดที่สถานี และโหมดหยุด ที่สถานี ทำหน้าที่นับเวลาหยุดที่สถานีให้ครบตาม dwell time โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาเพียง 3 โหมดการทำงานเท่านั้น ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว โหมดความเร็วคงที่ และโหมดการเบรก ดังรูปที่
 3.9 แสดงโหมดการทำงานของรถไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.9 โหมดการทำงานของรถไฟฟ้ากระแสตรง

5) การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่

โดยพื้นฐานแล้ว ระยะทางและความเร็วของรถไฟฟ้าในเวลาชั่วขณะนั้นจะต้องมีการวน ซ้ำในรอบถัดไปของโปรแกรมการจำลองผล ดังสมการที่ (3.12)

$$v_{i+1} = v_i + a\Delta t$$

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

กำลังไฟฟ้าจริงที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าเสริมที่เกิดจาก

ระบบแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับแรงฉุดของรถไฟฟ้า ความเร็วรถไฟฟ้า และประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังสมการที่ (3.13)

$$P_{tr} = \frac{TEv_{t+1}}{\eta} + P_{aux} \tag{3.13}$$

3.5 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง

วิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า (Current Injection Method: CIM) ในการคำนวณการไหลของ กำลังไฟฟ้าระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง ใช้หลักการคำนวณด้วยวิธีโนดจากสมการที่ได้จากการใช้กฎ กระแสไฟฟ้าของเคอร์ซอฟฟ์ ดังสมการที่ (3.14) หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ เมื่อ ใช้วิธีการคำนวณรอบ จะได้สมการที่ (3.15) อยู่ในสมการเมตริกซ์ [*G*][*V*]=[*I*]

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

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

1) สถานีจ่ายไฟฟ้า สามารถคำนวณการไหลได้ 2 รูปแบบ คือ สถานีจ่ายไฟฟ้าวงจรเรียง กระแส (Rectifier substation) ไหลได้ทางเดียวและสถานีจ่ายไฟฟ้าแบบสองทิศทาง (Inventing substation) ไหลได้ 2 ทาง ดังรูปที่ 3.10 โดยในแบบจำลองที่นำไปสร้างแบบจำลอง เพื่อวิเคราะห์ ประเมินใช้รูปแบบสถานีจ่ายไฟฟ้าวงจรเรียงกระแส (Rectifier substation) ดังรูปที่ 3.10 (ก)



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

 สายส่งสถานี้จ่ายไฟฟ้า ประกอบด้วย ความต้านทานสายส่งต่อหน่วยความยาวและความ ต้านทานรางต่อหน่วยความยาว 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)



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

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

กำหนดให้ $V_T^{(1)}$ และ $\epsilon \geq \epsilon_{\max}$ จะได้สมการที่ (3.17) และ (3.18) ตามลำดับ สามารถ แก้สมการโดยใช้วิธีโนด (Node) โดยการสร้างบัสต่าง ๆ

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

$$V_T^{(1)} \Rightarrow I_T^{(1)} = \frac{P_T}{V_T^{(1)}}$$
 (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 $[G]_{\scriptscriptstyle bus}$ (ก) กรณีต่อกับโนด (ข) กรณีต่อลงดิน

$$\begin{aligned} G_{ii}^{(\text{new})} &= G_{ii}^{(\text{old})} + \frac{1}{R_x} \\ G_{jj}^{(\text{new})} &= G_{jj}^{(\text{old})} + \frac{1}{R_x} \\ G_{ij}^{(\text{new})} &= G_{ij}^{(\text{old})} - \frac{1}{R_x} \\ G_{ji}^{(\text{new})} &= G_{ij}^{(\text{new})} = G_{ji}^{(\text{old})} - \frac{1}{R_x} \\ G_{ii}^{(\text{new})} &= G_{ii}^{(\text{old})} + \frac{1}{R_x} \end{aligned}$$
(3.19)
(3.19)
(3.20)



รูปที่ 3.14 การสร้าง [I]_{bus}

$$\boldsymbol{I}_{i}^{(\text{new})} = \boldsymbol{I}_{i}^{(\text{old})} + \boldsymbol{I}_{S} - \boldsymbol{I}_{T}$$
(3.21)

3.6 แบบจำลองการติดตั้งระบบเพื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในระบบปกติ และแบบจำลองการ ติดตั้งระบบเพื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว โดยใช้ระบบการติดตั้ง 2 ประเภท คือ แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ และแบบจำลองการติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทาน เชิงลบ

3.6.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติ

แบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติ กล่าวคือระบบการเคลื่อนที่ของ รถไฟฟ้าแบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริม โดยใช้แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น (Two-layer grounding model: TGM) สำหรับแบบจำลองพื้นฐานของการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติ ซึ่งเป็น แบบจำลองที่อยู่บนพื้นฐานตามมาตรฐาน EN 50122-2 เป็นแบบจำลองที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับการ พิจารณาศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินโดยการพิจารณาโครงสร้างทางยกระดับได้ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งประกอบไปด้วยรางวิ่งจะแสดงด้วยการใช้ตัวต้านทานของราง ความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความ ยาวรางวิ่งไปยังดิน



รูปที่ 3.15 แบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น สำหรับแบบจำลองพื้นฐานของการเคลื่อนที่รถไฟฟ้า ระบบปกติ

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าระบบตัวนำไฟฟ้าสามระดับต่อหนึ่งบัสเป็นระบบ ที่ใช้กับแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นในแบบจำลองพื้นฐานของการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติ สามารถหาเมตริกซ์ย่อยของความนำไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยเมตริกซ์ย่อยที่บัสสถานี ไฟฟ้าขับเคลื่อนและสายส่ง ดังนั้นการหาเมตริกซ์ย่อยของความนำไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่บัสสถานี ไฟฟ้าขับเคลื่อนของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้นได้ โดยพิจารณาตามรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แบบจำลองกรณีที่มีสายส่งและรางของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น

จากรูปที่ 3.16 และสมการที่ (3.22) สามารถหาเมตริกซ์ย่อยที่บัสสถานีย่อยแบบ

สามระดับต่อหนึ่งบัสได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} I_{S}^{(C)} \\ I_{S}^{(R)} \\ I_{S}^{(S)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{S}^{(C,C)} & G_{S}^{(C,R)} & G_{S}^{(C,S)} \\ G_{S}^{(R,C)} & G_{S}^{(R,R)} & G_{S}^{(R,S)} \\ G_{S}^{(S,C)} & G_{S}^{(S,R)} & G_{S}^{(S,S)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S}^{(C)} \\ V_{S}^{(R)} \\ V_{S}^{(S)} \end{bmatrix}$$
(3.22)

โดย

 $I_{s}^{(C)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกรางที่สามที่บัสสถานีย่อย (A)

 $I_{s}^{\scriptscriptstyle (R)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกรางวิ่งที่บัสสถานีย่อย (A)

I_s คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกโครงสร้างที่บัสสถานีย่อย (A)

 $I_{\scriptscriptstyle N}^{\scriptscriptstyle (R)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกรางวิ่งที่โนดใด ๆ ที่บัสสถานีย่อย (A)

 $G_{s}^{\scriptscriptstyle (C,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของรางที่สามที่บัสสถานีย่อย (S)

 $G_{s}^{(C,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางที่สามและรางวิ่งที่บัสสถานีย่อย (S)

 $G_s^{(C,S)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางที่สามและโครงสร้างที่บัสสถานีย่อย (S)

 $G_{s}^{\scriptscriptstyle (R,C)}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งและรางที่สามที่บัสสถานีย่อย (S)

 $G_{s}^{\scriptscriptstyle (R,R)}$ 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 การหาเมตริกซ์ย่อยที่สายส่งจะพิจารณาเฉพาะเมตริกซ์ย่อยความนำ ไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากในส่วนของสายส่งไม่มีแหล่งจ่าย ซึ่งการต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบสามระดับ สามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าระหว่างโนด p และ q หา $\begin{bmatrix} G_{pq} \end{bmatrix}$ และ $\begin{bmatrix} G_{qp} \end{bmatrix}$ ได้จากสมการ (3.23)

$$[G_{pq}] = [G_{qp}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{dxR_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{dxR_r} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{dxR_s} \end{bmatrix}$$
(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 ใดๆ (S) $G_{pq}^{(R,R)}$ คือ ความนำไฟฟ้าของรางวิ่งระหว่างโนด p และ q ใดๆ (S) และสามารถหา $\begin{bmatrix} G_{pp} \end{bmatrix}$ และ $\begin{bmatrix} G_{qq} \end{bmatrix}$ ได้จากสมการ (3.24) $\begin{bmatrix} G_{pp} \end{bmatrix}_{SE} = \begin{bmatrix} G_{qq} \end{bmatrix}_{SE} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & dxG'_{RS} & -dxG'_{RS} \\ 0 & -dxG'_{RS} & dxG'_{RS} + dxG'_{SE} \end{bmatrix}$ (3.24)

จากนั้นทำการรวมสมการเมตริกซ์ย่อยเหล่านี้เพื่อสร้างเมตริกซ์ความนำไฟฟ้า และ สมการโนดสำหรับระบบ N_{bus} เขียนได้ดังสมการที่ (3.25)

$\begin{bmatrix} I_1^{(C)} \\ I_1^{(R)} \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} G_{11}^{(C,C)} \\ G_{11}^{(R,C)} \\ G_{11}^{(S,C)} \\ \end{bmatrix}$	$G_{11}^{(C,R)}$ $G_{11}^{(R,R)}$ $G_{11}^{(S,R)}$	$\begin{bmatrix} G_{11}^{(C,S)} \\ G_{11}^{(R,S)} \\ G_{11}^{(S,S)} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} G_{12}^{(C,C)} \\ G_{12}^{(R,C)} \\ G_{12}^{(S,C)} \\ G_{12}^{(S,C)} \end{bmatrix}$	$G_{12}^{(C,R)}$ $G_{12}^{(R,R)}$ $G_{12}^{(S,R)}$	$\begin{bmatrix} G_{12}^{(C,S)} \\ G_{12}^{(R,S)} \\ G_{12}^{(S,S)} \end{bmatrix}$				$\begin{bmatrix} G_{1N}^{(C,C)} \\ G_{1N}^{(R,C)} \\ G_{1N}^{(S,C)} \\ \end{bmatrix}$	$G_{1N}^{(C,R)}$ $G_{1N}^{(R,R)}$ $G_{1N}^{(S,R)}$	$\begin{bmatrix} G_{1N}^{(C,S)} \\ G_{1N}^{(R,S)} \\ G_{1N}^{(S,S)} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} V_1^{(C)} \\ V_1^{(R)} \end{bmatrix}$	
$\begin{bmatrix} I_1^{(S)} \\ I_2^{(C)} \\ I^{(R)} \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} G_{21}^{(C,C)} \\ G_{21}^{(R,C)} \\ G_{21}^{(S,C)} \end{bmatrix}$	$G_{21}^{(C,R)} \ G_{21}^{(R,R)} \ G_{21}^{(R,R)} \ G_{21}^{(S,R)}$	$G_{21}^{(C,S)}$ $G_{21}^{(R,S)}$ $G_{21}^{(S,S)}$		·.			·.			÷		$V_1^{(S)}$ $V_2^{(C)}$ $V_2^{(R)}$	(3.25)
$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_2^{(C)} \\ \vdots \\ I_N^{(C)} \end{bmatrix}$	=	L - 21	:	- 21							$\begin{bmatrix} G_{N-1,N}^{(C,C)} \\ G_{N-1,N}^{(R,C)} \\ G_{N-1,N}^{(S,C)} \end{bmatrix}$	$G^{(C,R)}_{_{N-1,N}}\ G^{(R,R)}_{_{N-1,N}}\ G^{(S,R)}_{_{N-1,N}}$	$egin{array}{c} G_{N-1,N}^{(C,S)} \ G_{N-1,N}^{(R,S)} \ G_{N-1,N}^{(S,S)} \end{array}$	$\left \begin{array}{c} V_2 \\ V_2^{(C)} \\ \vdots \\ V_N^{(C)} \end{array}\right $	
$\begin{bmatrix} I_N^{(R)} \\ I_N^{(S)} \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} G_{N1}^{(C,C)} \\ G_{N1}^{(R,C)} \\ G_{N1}^{(S,C)} \end{bmatrix}$	$G_{_{N1}}^{_{(C,R)}}$ $G_{_{N1}}^{_{(R,R)}}$ $G_{_{N1}}^{_{(S,R)}}$	$\left. \begin{array}{c} G_{N1}^{(C,S)} \\ G_{N1}^{(R,S)} \\ G_{N1}^{(S,S)} \end{array} \right]$				$\begin{bmatrix} G_{N,N-1}^{(C,C)} \\ G_{N,N-1}^{(R,C)} \\ G_{N,N-1}^{(S,C)} \end{bmatrix}$	$G^{(C,R)}_{N,N-1} \ G^{(R,R)}_{N,N-1} \ G^{(S,R)}_{N,N-1}$	$\left.\begin{array}{c}G_{N,N-1}^{(C,S)}\\G_{N,N-1}^{(R,S)}\\G_{N,N-1}^{(S,S)}\end{array}\right]$	$\begin{bmatrix} G_{\scriptscriptstyle NN}^{\scriptscriptstyle (C,C)} \\ G_{\scriptscriptstyle NN}^{\scriptscriptstyle (R,C)} \\ G_{\scriptscriptstyle NN}^{\scriptscriptstyle (S,C)} \end{bmatrix}$	$G_{_{NN}}^{_{(C,R)}}$ $G_{_{NN}}^{_{(R,R)}}$ $G_{_{NN}}^{_{(S,R)}}$	$\begin{bmatrix} G_{NN}^{(C,S)} \\ G_{NN}^{(R,S)} \\ G_{NN}^{(S,S)} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} V_N^{(R)} \\ V_N^{(S)} \end{bmatrix}$	

การหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและค่ากระแสไฟฟ้ารั่วของการเคลื่อนที่ของระบบปกติ

เมื่อรถไฟเคลื่อนที่จากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 1 (Substation 1) ไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับ เคลื่อนที่ 2 (Substation 2) กระแสไฟฟ้าขับเคลื่อนจะถูกส่งไปยังรถไฟผ่านทาง contact line หรือ รางจ่ายตัวนำที่สาม (3rd rail) ที่ขนานอยู่กับรางวิ่ง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่รถไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับ ระบบขับเคลื่อนของรถไฟ และกระแสไฟฟ้าของรางวิ่งจะไหลไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน และมี กระแสไฟฟ้ารั่วลงสู่พื้นดินกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน ดังรูปที่ 3.18 แสดงการทำงานของ ระบบ TRA-TPS







ในระบบ RET-TPS ตัวนำย้อนกลับถูกติดตั้งเพิ่มเติมจากแบบจำลองการเคลื่อนที่ รถไฟฟ้าระบบปกติ โดยทั่วไปจะใช้สายเคเบิลขนานกับรางวิ่งและเชื่อมต่อกับรางวิ่งตามระยะทางที่ กำหนด โดยไม่มีผลกับในส่วนตัวนำรางวิ่งกับโครงสร้าง (*G_{Rs}*) และตัวนำโครงสร้างกับดิน (*G_{se}*) โดย ที่ *R*[']_{RT} คือ ตัวต้านทานของสายเคเบิล (Ω/km) ที่ถูกนำมาติดตั้งในระบบตัวนำย้อนกลับนี้ ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของแบบจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ ระบบตัวนำไฟฟ้าสามระดับต่อหนึ่งบัสเช่นเดียวกันกับการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติ และมีการ เชื่อมต่อเพิ่มเข้าที่รางวิ่ง ดังนั้นการหาเมตริกซ์ย่อยของความนำไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่บัสสถานี ไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบตัวนำย้อนกลับได้ โดยพิจารณาตามรูปที่ 3.20 แสดงแบบจำลองกรณีที่มี สายส่งและรางของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น เมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อของตัวนำย้อนกลับ



รูปที่ 3.20 แบบจำลองกรณีที่มีสายส่งและรางแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น เมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อของตัวนำย้อนกลับ

สามารถหาเมตริกซ์ย่อยที่บัสสถานีย่อยแบบสามระดับต่อหนึ่งบัสได้ดังสมการที่ (3.22) ที่กล่าวไว้ข้างต้นได้เหมือนกับแบบจำลองการเคลื่อนที่ระบบปกติ จากรูปที่ 3.21 การหา เมตริกซ์ย่อยที่สายส่งจะพิจารณาเฉพาะเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าเท่านั้น ซึ่งการต่อตัวนำระหว่าง โนด p และ q ใด ๆ แบบสามระดับ สามารถหาเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าระหว่างโนด p และ q หา $\begin{bmatrix} G_{pq} \end{bmatrix}$ และ $\begin{bmatrix} G_{qp} \end{bmatrix}$ ได้จากสมการ (3.23) ที่กล่าวไว้ข้างต้นได้ โดยที่ $I_{Nn}^{(R)}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า ออกรางวิ่งที่โนดติดตั้งตัวนำย้อนกลับใด ๆ ที่บัสสถานีย่อย (A) ย้อนกลับ



รูปที่ 3.21 การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ

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

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

 $G^{\scriptscriptstyle (R,C)}_{\scriptscriptstyle ab}$ คือ ความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งและรางที่สามระหว่างโนด a และ b ใดๆ (S)

 $G^{(R,R)}_{ab}$ คือ ความนำไฟฟ้าของรางวิ่งระหว่างโนด a และ b ใดๆ (S)

เมื่อตัวนำย้อนกลับถูกติดตั้งขนานกับรางวิ่งและเชื่อมต่อกับรางวิ่งตามระยะทางที่ กำหนด ดังรูปที่ 3.22 กระแสไฟฟ้าที่รางส่วนใหญ่จะไหลกลับไปยังสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านทางตัวนำ ที่ถูกติดตั้ง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่รางจากรางลงสู่พื้นดินจะลดลง ความนำไฟฟ้าของรางวิ่งระหว่างโนด a และ b ใด ๆ ($G_{ab}^{(R,R)}$) สามารถพิจารณาแยกตามตำแหน่งของรถไฟฟ้าที่อยู่ในจุดเชื่อมต่อนั้น ๆ เนื่องจากเกิดเส้นทางใหม่และค่าความต้านทานระหว่างโนด a และ b ของรางวิ่งจะถูกพิจารณาเป็น ระยะของเส้นทางใหม่นั้น



รูปที่ 3.22 ระบบ RET-TPS

เมื่อรถไฟฟ้าอยู่ที่ตำแหน่งส่วนราง ดังรูปที่ 3.23(ก) และรูปที่ 3.23(ข) จะเห็นได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่รางออกจากรถไฟฟ้า และไหลไปที่สถานีย่อยผ่านรางวิ่งด้วยเส้นทางที่มีความต้านทาน น้อยที่สุด นั่นคือผ่านตัวต้านทาน *R_{RT}* ของสายเคเบิลที่เชื่อมต่อขนานกับรางวิ่งที่ใกล้ตำแหน่งรถไฟ มากที่สุดด้วยระยะ *dx* ใด ๆ





รูปที่ 3.23 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่รางของระบบตัวนำย้อนกลับ (ก) ตำแหน่งรถไฟที่ระยะ $dx_1 - dx$ (ข) ตำแหน่งรถไฟที่ระยะ $dx_1 - dx_2$

(ข)

3.6.3 แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

ในระบบ NEG-TPS ภาพไดอะแกรมของระบบที่ถูกเพิ่มในแบบจำลองการเคลื่อนที่ รถไฟฟ้าระบบปกติ ดังตารางที่ 3.2 อุปกรณ์เสริมติดตั้งของระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ Negative Resistance Converter (*NRCs*), Feeder Cable (*FCAs*) และ Switch Unit (*SUs*) ถูกเพิ่มเข้าไปยังระบบ TRA-TPS

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

ในแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ โดยไม่พิจารณาการต่อลงดินแบบสลับไขว้ (Cross Bounding), Impedance Bounding และ Track Circuit โดยที่ *NRCs* เป็นอุปกรณ์ตัว ปรับผลรวมความต้านทานของเส้นทางนั้นให้เป็นศูนย์ *FCAs* เป็นค่าความต้านทานของสายเคเบิลที่ ถูกติดตั้งขนานกับรางวิ่ง โดยใช้ค่าเดียวกันกับระบบตัวนำย้อนกลับ และ *SUs* เป็นอุปกรณ์ตรวจจับ ตำแหน่งของรถไฟจะมีการใช้งานเมื่อรถไฟวิ่งผ่าน (แบบอุดมคติ) ดังรูปที่ 3.24



ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์เสริมติดตั้งของระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ



รูปที่ 3.24 ระบบ NEG-TPS

การหาเมตริกซ์ย่อยของความนำไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่บัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ของระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ โดยพิจารณาตามรูปที่ 3.25 แบบจำลองกรณีที่มีสายส่งและ รางของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น เมื่อเพิ่มอุปกรณ์ของระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ



รูปที่ 3.25 แบบจำลองกรณีที่มีสายส่งและรางแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น เมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อของตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

สามารถหาเมตริกซ์ย่อยที่บัสสถานีย่อยแบบสามระดับต่อหนึ่งบัสได้ดังสมการที่ (3.22) ที่กล่าวไว้ข้างต้นได้เหมือนกับแบบจำลองการเคลื่อนที่ระบบปกติ จากรูปที่ 3.25 การหา เมตริกซ์ย่อยที่สายส่งจะพิจารณาเฉพาะเมตริกซ์ย่อยความนำไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากในส่วนของสาย ส่งไม่มีแหล่งจ่าย ซึ่งการต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ใด ๆ แบบสามระดับ สามารถหาเมตริกซ์ย่อย ความนำไฟฟ้าระหว่างโนด p และ q หา $\begin{bmatrix} G_{pq} \end{bmatrix}$ และ $\begin{bmatrix} G_{qp} \end{bmatrix}$ ได้จากสมการ (3.23) ที่กล่าวไว้ข้างต้น ได้เหมือนกับแบบจำลองการเคลื่อนที่ระบบปกติ แบบจำลองสายส่งแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น กรณีเพิ่มอุปกรณ์ของระบบตัวแปลงความ ต้านทานเชิงลบ



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 $R_{\scriptscriptstyle NEG}$ คือ ค่าความต้านทานรวมของเส้นทางลูปนั้น

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

ระบบ NEG-TPS รางวิ่งจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ โดยเป็นเส้นทางที่สั้นกว่าของ กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าในลูปเป็นศูนย์ แรงดันเอาต์พุตของ NRCs จะถูก ควบคุมให้มีค่าตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 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 *NRC*1 และ *NRC*2 ดังรูปที่ 3.28 จะมีเฉพาะ *SU*1 เท่านั้นที่ปิดวงจร *SU*2 และ *SU*3 เปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าของลูปที่ 1 (u_{r1}) ของลูปความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ *NRC*1 (u_{NRC1}) และแรงดันไฟฟ้าที่ *FCA*1 (u_{FCA1}) จะถูกควบคุมให้เป็นผลรวมศูนย์ตามอุดมคติ ในทำนองเดียวกันแรงดันไฟฟ้าของลูปที่ 2 (u_{r2}) ของ ลูปความต้านทานเป็นศูนย์ เนื่องจากส่วนรางที่ 2, 3 และ 4 ถูกลัดวงจรโดยลูปความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ 2, 3 และ 4 ถูกลัดวงจรโดยลูปความต้านทานเป็นศูนย์ เนื่องจากส่วนรางที่ 2, 3 และ 4 ถูกลัดวงจรโดยลูปความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ *NRC*2 (u_{NRC2}) และ แรงดันไฟฟ้าที่ *FCA*2, *FCA*3 และ *FCA*4 ($u_{FCA2}, u_{FCA3}, u_{FCA4}$) จะถูกควบคุมให้เป็นผลรวมศูนย์ตามอุดมคติดังสมการที่ (3.28) ดังนั้นจะมี กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนเฉพาะในส่วนลูปที่ 1 (u_{r1}) และลูปที่ 2 (u_{r2}) สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานรวมลูปต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (3.29)



รูปที่ 3.28 รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 1 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

$$u_{r1} = u_{NRC1} + u_{FCA1} = 0$$

$$u_{r2} = u_{NRC2} + (u_{FCA2} + u_{FCA3} + u_{FCA4}) = 0$$
(3.28)

เกิดจากผลรวมความต้านทานเป็นศูนย์

$$R_{1} = R_{NRC1} + R_{FCA1} = 0$$

$$R_{2} = R_{NRC2} + R_{FCA2} + R_{FCA3} + R_{FCA4} = 0$$
(3.29)

เมื่อรถไฟอยู่ตำแหน่งส่วนรางที่ 2 รถไฟอยู่ระหว่าง SU1 และ SU2 ดังรูปที่ 3.29 จะมีเฉพาะ SU1 และ SU2 เท่านั้นที่ปิดวงจร SU3 เปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าของลูปที่ 1 (u_{r1}) ของ ลูปความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ NRC1 (u_{NRC1}) และแรงดันไฟฟ้าที่ FCA1 (u_{FCA1}) ถูก ควบคุมให้ผลรวมเป็นศูนย์ตามอุดมคติ ในทำนองเดียวกันแรงดันไฟฟ้าของลูปที่ 2 (u_{r2}) ของลูปความ ต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ NRC2 (u_{NRC2}) แรงดันไฟฟ้าที่ FCA3 และ FCA4(u_{FCA3}, u_{FCA4}) จะถูกควบคุมให้ผลรวมเป็นศูนย์ตามอุดมคติดังสมการที่ (3.30) ดังนั้นจะมี กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนเฉพาะในส่วนลูปที่ 1 (u_{r1}) และลูปที่ 2 (u_{r2}) สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานรวมลูปต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (3.31)



รูปที่ 3.29 รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 2 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

$$u_{r1} = u_{NRC1} + u_{FCA1} = 0$$

$$u_{r2} = u_{NRC2} + (u_{FCA3} + u_{FCA4}) = 0$$
(3.30)

เกิดจากผลรวมความต้านทานเป็นศูนย์

$$R_{I} = R_{NRCI} + R_{FCAI} = 0$$

$$R_{2} = R_{NRC2} + R_{FCA3} + R_{FCA4} = 0$$
(3.31)

เมื่อรถไฟอยู่ตำแหน่งส่วนรางที่ 3 รถไฟอยู่ระหว่าง SU2 และ SU3 ดังรูปที่ 3.30 เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนรางที่ 3 จะมีเฉพาะ SU2 และ SU3 เท่านั้นที่ปิดวงจร SU1 เปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าของลูปที่ 1 (u_{r1}) ของลูปความต้านทานเป็นศูนย์ และแรงดันไฟฟ้าที่ NRC1 (u_{NRC1}) แรงดันไฟฟ้าที่ FCA1 และ FCA2 (u_{FCA1}, u_{FCA2}) จะถูกควบคุมให้ผลรวมเป็นศูนย์ตามอุดมคติ ใน ทำนองเดียวกันแรงดันไฟฟ้าของลูปที่ 2 (u_{r2}) ของลูปความต้านทานเป็นศูนย์ และเรงดันไฟฟ้าที่ NRC1 (u_{SRC1}) และเรงดันไฟฟ้าที่ FCA1 และ FCA2 (u_{FCA1}, u_{FCA2}) จะถูกควบคุมให้ผลรวมเป็นศูนย์ตามอุดมคติ ใน ทำนองเดียวกันแรงดันไฟฟ้าของลูปที่ 2 (u_{r2}) ของลูปความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ NRC2 (u_{NRC2}) และแรงดันไฟฟ้าที่ FCA4 (u_{FCA4}) จะถูกควบคุมให้ผลรวมเป็นศูนย์ตามอุดมคติ ดังสมการที่ (3.32) เนื่องจากส่วนรางที่ 1 และส่วนรางที่ 2 ถูกลัดวงจรโดยลูปความต้านทานเป็นศูนย์ และส่วนรางที่ 4 ถูกลัดวงจรโดยลูปความต้านทานเป็นศูนย์ เช่นกัน ดังนั้นจะมีกระแสไฟฟ้าไหล ย้อนกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนเฉพาะในส่วนลูปที่ 1 (u_{r1}) และลูปที่ 2 (u_{r2}) สามารถ คำนวณหาค่าความต้านทานรวมลูปต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (3.33)



รูปที่ 3.30 รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 3 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

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

$$u_{r2} = u_{NRC2} + u_{FCA4} = 0$$
(3.32)

เกิดจากผลรวมความต้านทานเป็นศูนย์

$$R_{I} = R_{NRC1} + R_{FCA1} + R_{FCA2} = 0$$

$$R_{2} = R_{NRC2} + R_{FCA4} = 0$$
(3.33)

เมื่อรถไฟอยู่ตำแหน่งส่วนรางที่ 4 รถไฟอยู่ระหว่าง *SU3* และ *NRC2* ดังรูปที่ 3.31 จะมีเฉพาะ *SU3* เท่านั้นที่ปิดวงจร *SU*1 และ *SU2* เปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าของลูปที่ 1 (u_{r1}) ของลูปความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ *NRC*1 (u_{NRC1}) และแรงดันไฟฟ้าที่ *FCA*1, *FCA2* และ *FCA3* (u_{FCA1} , u_{FCA2} , u_{FCA3}) จะถูกควบคุมให้เป็นศูนย์ตามอุดมคติ ในทำนองเดียวกัน แรงดันไฟฟ้าของลูปที่ 2 (u_{r2}) ของลูปความต้านทานเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ *NRC*2 (u_{NRC2}) และ แรงดันไฟฟ้าที่ *FCA*4 (*u*_{FCA4}) จะถูกควบคุมให้เป็นศูนย์ตามอุดมคติดังสมการที่ (3.34) ดังนั้นจะมี กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนเฉพาะในส่วนลูปที่ 1 (*u*_{r1}) และลูปที่ 2 (*u*_{r2}) สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานรวมลูปต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (3.35)



รูปที่ 3.31 รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 4 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

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

$$u_{r2} = u_{NRC2} + u_{FCA4} = 0$$
(3.34)

เกิดจากผลรวมความต้านทานเป็นศูนย์

$$R_{I} = R_{NRC1} + R_{FCA1} + R_{FCA2} + R_{FCA3} = 0$$

$$R_{2} = R_{NRC2} + R_{FCA4} = 0$$
(3.35)

ไม่ว่ารถไฟจะอยู่ตำแหน่งไหนของรางวิ่งทั้งหมด ลูปความต้านทานเป็นศูนย์ของ NRCs, SUs และ FCAs จะควบคุมให้กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไหลไปในส่วนรางที่ไหลได้ เท่านั้น ไม่สามารถไหลไปตามส่วนรางที่ไม่ใช่ตำแหน่งรถไฟหรือส่วนรางที่ถูกลัดวงจร ดังนั้นเส้นทาง ย้อนกลับของกระแสไฟฟ้ารางจึงสั้นลงจากความยาวรางวิ่งทั้งหมด จึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้ารั่วลงสู่ พื้นดินน้อยลง

3.7 ศักยภาพการลดลงในระบบ (Reduction Performance)

ร้อยละการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าราง (₇) และกระแสไฟฟ้ารั่ว (*S*) สามารถคำนวณหาได้ จากสมการ (3.36) และ (3.37) โดยมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบศักยภาพการลดลงค่าศักย์ไฟฟ้าราง และกระแสรั่วของระบบ NEG-TPS เปรียบเทียบกับระบบ TRA-TPS และ RET-TPS

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

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

 π บบ TRA-TPS (%)

 η_{RT}
 คือ ร้อยละการลดลงของกระแสไฟฟ้ารั่วระหว่างระบบ NEG-TPS และ

 δ_{NT}
 คือ ร้อยละการลดลงของกระแสไฟฟ้ารั่วระหว่างระบบ NEG-TPS และ

 δ_{RT}
 คือ ร้อยละการลดลงของกระแสไฟฟ้ารั่วระหว่างระบบ RET-TPS และ

 δ_{RT}
 คือ ร้อยละการลดลงของกระแสไฟฟ้ารั่วระหว่างระบบ NEG-TPS และ

 δ_{VT}
 คือ ร้อยละการลดลงของกระแสไฟฟ้ารั่วระหว่างระบบ NEG-TPS และ

 δ_{RT}
 คือ ร้อยละการลดลงของกระแสไฟฟ้ารั่วระหว่างระบบ RET-TPS และ

 δ_{VT}
 คือ ร้อยละการลดลงของกระแสไฟฟ้ารั่วระหว่างระบบ RET-TPS และ

 δ_{RT}
 คือ ร้อยละการลดลงของกระแสไฟฟ้ารั่วระหว่างระบบ RET-TPS และ

3.8 สรุป

กระแสรั่วสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ โดยในระบบ รถไฟฟ้ากระแสตรงจะมีโอกาสเกิดขึ้นมากกว่า จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษางานวิจัยนี้ ในบทนี้ได้ กล่าวถึงสาเหตุและผลกระทบของกระแสรั่ว ไม่ว่าจะเป็นที่ส่งผลต่อโครงสร้างต่าง ๆ ที่เป็นโลหะของ ระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง และความปลอดภัยของผู้มาใช้บริการ โดยที่ศักย์ไฟฟ้าที่ราง อาจเป็น อันตรายต่อความปลอดภัยของบุคคลเกี่ยวกับแรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ไม่เกิน 120 V การจำลอง ผลของระบบขนส่งมวลชนกระแสตรง สายฉลองรัชธรรม MRT สายสีม่วง (เหนือ) ที่มีการเดินรถขบวน เดียวแบบไป-กลับ ที่มีการต่อลงดินสองชั้น (ตัวนำสามระดับ) ดังนั้นสมการในบทนี้สามารถนำไปใช้ วิเคราะห์และประเมินผลค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางให้เป็นไปตามมาตรฐาน EN50122-1 สามารถพิจารณาผล การจำลอง ซึ่งจะนำเสนอในบทถัดไป