

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

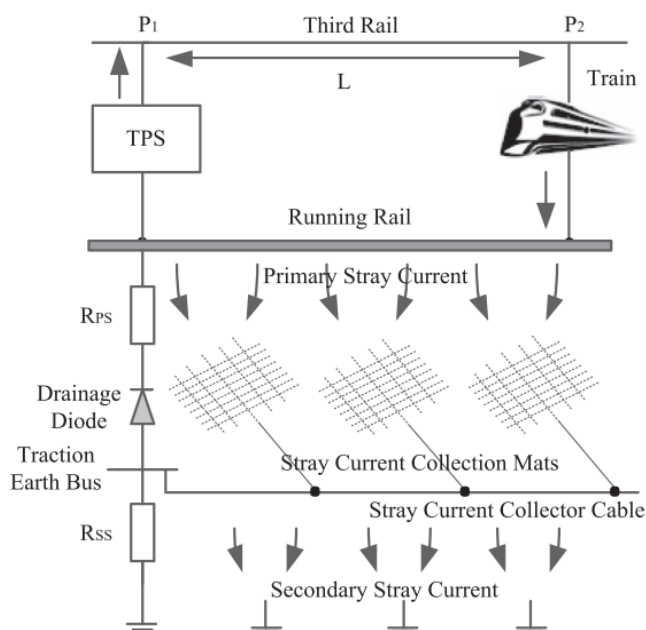
ระบบไฟฟ้า	แรงดันต่ำสุด ไม่ถาวร	แรงดันต่ำสุด ถาวร	แรงดันใช้งาน	แรงดันสูงสุด ถาวร	แรงดันสูงสุด ไม่ถาวร
600 V DC	400V	400 V	600 V	720 V	800 V
750 V DC	500 V	500 V	750 V	900 V	1000 V
1500 V DC	1000 V	1000 V	1500 V	1800 V	1950 V
3 kV DC	2 kV	2 kV	3 kV	3.6 kV	3.9 kV
15 kV AC, 16.7 Hz	11 kV	12 kV	15 kV	17.25 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) ระบบต่ายารรวบรวมกระแสรั่ว

การวิเคราะห์การรั่วของกระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปจะพิจารณาในส่วนของสถานีจ่าย กำลังไฟฟ้าระหว่างสองสถานีไฟฟ้าจุดกลาง (TPS) ดังรูปที่ 2.1 รถไฟฟ้าขบวนเดียวของระบบราง กระแสตรงพร้อมระบบต่ายารรวบรวมกระแสรั่ว ผ่านแนวยาวของรางวิ่ง กระแสรั่วสามารถเกิดขึ้นที่ ไตก็ได้ของรางวิ่ง (Running Rail) ต่ายารรวบรวมกระแสรั่ว (Stray current collector mats solution: SCCN) และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องได้รับการติดตั้งระหว่างการก่อสร้างระบบขนส่งทางรถไฟใน เขตเมือง

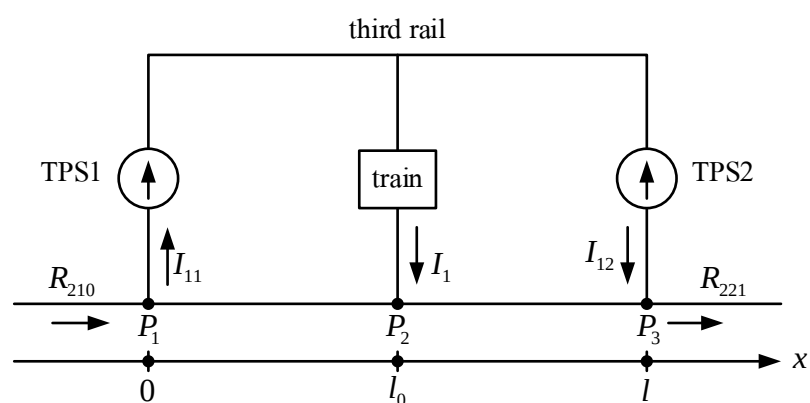


รูปที่ 2.1 รถไฟฟ้าขบวนเดียวของระบบรางกระแสตรงพร้อมระบบตาข่ายรวบรวมกระแสรั่ว
ที่มาภาพ : (Zaboli et al., 2017)

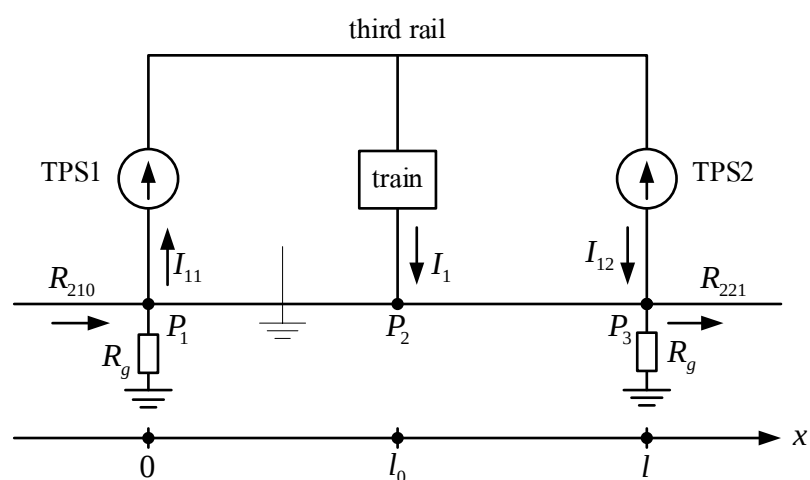
เนื่องจากความต้านทานของตาข่ายรวบรวมมีขนาดเล็กกว่าโครงสร้างพื้นฐานของระบบรถไฟฟ้า การติดตั้งระบบ SCCN จะไม่สามารถลดกระแสรั่วในชั้นปฐมภูมิได้ (Primary stray current) แต่จะลดกระแสรั่วในชั้นทุติยภูมิ (Secondary stray current) กระแสไฟฟ้าในส่วนน้อยที่มีการรั่วไหลจึงถูกรวบรวมและส่งกลับไปยังสถานีไฟฟ้าฉุดลาก ผ่านระบบ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

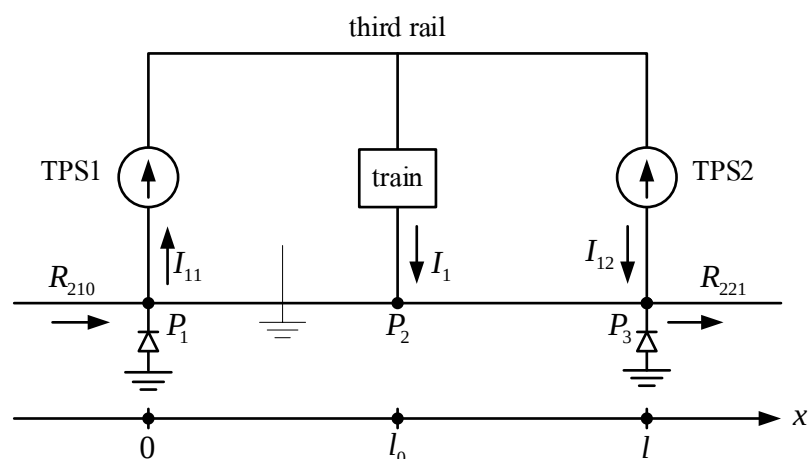
ต่อมาได้มีการพัฒนาแบบจำลองการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสสำหรับการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า โดยวิธีการไม่ต่อลงดิน (Ungrounded) วิธีการต่อลงดินโดยตรง (Solidly grounded) และวิธีการต่อลงดินด้วยไดโอด (Diode-grounded) ดังรูปที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 วิธีการไม่ต่อลงดิน



รูปที่ 2.3 วิธีการต่อลงดินโดยตรง

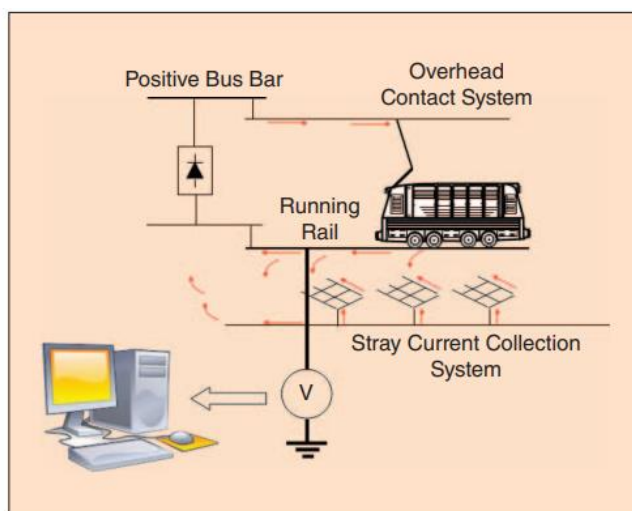


รูปที่ 2.4 วิธีการต่อลงดินผ่านไดโอด

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 ปริมาณกระแสรั่วที่กำหนดเป็นค่าอ้างอิงสำหรับรถไฟฟ้าควรมีค่าไม่เกิน 2.5 mA/m/track แต่ปัญหา คือ การวัดกระแสรั่วจากทางวิ่งเพียงอย่างเดียวเป็นไปไม่ได้ ในทางปฏิบัติจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางที่วัดได้ด้วย เมื่อศักย์ไฟฟ้าของโลหะอยู่เกินค่าเกณฑ์ตามมาตรฐาน IEC62128-1-2013 อุปกรณ์ป้องกันแรงดันไฟเกิน (Over-voltage protection devices: OVPDs) จะทำงาน จากนั้นศักย์ไฟฟ้าของโลหะจะลดลง การวัดศักย์ไฟฟ้าของรางเหล่านี้ ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะส่งไปยังผู้ปฏิบัติงานและผู้ควบคุมระบบเพื่อนำค่าเปรียบเทียบกับข้อมูลสภาพอ้างอิง ดังนั้นความพยายามดังกล่าวไม่ได้วัดค่าผลกระทบของกระแสไฟฟ้ารั่ว แต่ก็มุ่งความสนใจไปที่ที่มาของกระแสไฟฟ้ารั่ว ข้อเสียของระบบนี้อยู่ที่การระบุเงื่อนไขอ้างอิงที่เหมาะสมที่จะทำหน้าที่เป็นตัวชี้วัดสถานะ สำหรับองค์ประกอบที่เป็นกึ่งตัวกำหนด ไม่ว่าจะเป็นแนวโน้มกำหนดการรายวันหรือตามฤดูกาลสำหรับการตรวจสอบและป้องกัน สภาพอากาศ/สภาพแวดล้อม สภาพถนนราง และมลพิษทางรางที่สำคัญที่สุด คือ ความปลอดภัย ภาวะสุขภาพของผู้โดยสาร อุปกรณ์ตาข่ายรวบรวมกระแสรั่วที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้สามารถทำงานร่วมกับระบบตรวจสอบ-ป้องกัน ซึ่งเหมาะสำหรับการเฝ้าติดตามและป้องกันโลหะตามเวลาจริง อย่างไรก็ตาม กระแสไฟรั่วทั้งหมดอาจมีขนาดใหญ่กว่าแม้ว่ารางวิ่งจะลัดวงจรกับพื้นโลก โดย OVPDs ในบางพื้นที่ เพื่อให้สามารถตีความสัญญาณเตือนภัยใด ๆ ที่เกิดขึ้นภายใต้ค่าศักย์ไฟฟ้าของรางจะต้องอาศัยการผสมผสานของวิจารณ์ทางวิศวกรรมและต้องใช้ประสบการณ์ร่วมด้วย

บางพื้นที่จะตรวจสอบกระแสไฟฟ้าด้วย Virtual Instrument หรือการตรวจสอบกระแสรั่วอัตโนมัติ และตรวจสอบศักยภาพของอุปกรณ์ของท่อส่งก๊าซที่อยู่ใกล้เคียง หรือที่ถูกขนาบกับรางที่

ใช้ในการเคลื่อนที่ โดยนำเสนอแบบจำลองพารามิเตอร์แบบกระจายเพื่อคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว โดยคำนึงถึงด้านข้างของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและรถไฟ แบบจำลองสามารถแจกแจงกระแสรั่วและแรงดันไฟฟ้าที่รางในจุดที่รถไฟอยู่หรือในจุดที่ลัดวงจรที่ตำแหน่งใด ๆ พบว่ากระแสไฟฟ้ารั่วในระบบไฟฟ้ากระแสตรงจะสร้างความเสียหายอย่างมากให้กับท่อส่งก๊าซที่ฝังอยู่และยังเน้นให้เห็นว่าปัญหาการเกิดกระแสรั่วควรมีวิธีการป้องกันให้สอดคล้องกับการทำงานของรถไฟใต้ดินได้ (Valero and Sanz., 2013) อีกทั้งยังมีการพัฒนารูปแบบการตรวจวัดสำหรับใช้กับระบบรถไฟฟ้ามหานคร 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

จากงานวิจัยในอดีตที่มีการเสนอปัญหาของกระแสไฟฟ้ารั่วของระบบรถไฟฟ้ามหานครในปัจจุบัน ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นโดยไม่คาดคิดผ่านทางระบบต่อลงดินและโครงสร้างที่เป็นโลหะ กระแสไฟฟ้ารั่วนี้สามารถเกิดจากระบบรถไฟฟ้ามหานครและระบบรถไฟฟ้ามหานครสลับได้ พบว่ากระแสไฟฟ้ารั่วจากไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดขึ้นเพียงร้อยละ 1-5 ของการกักร้อนเมื่อเทียบกับปริมาณการกักร้อนที่เกิดขึ้นจากระบบไฟฟ้ากระแสตรง การป้องกันแคโทดิก (CP) เป็นเทคนิคที่ใช้ควบคุมการสักร้อนของผิวโลหะโดยการทำให้เป็นแคโทดทางไฟฟ้าเคมี 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)

TABLE 1. The Stray-Current-Mitigation Methods Used for Corrosion Control.		
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 และวิธีการตรวจสอบกระแสไฟรั่วของรางน้อยลงจากรางวิ่ง ด้วยวิธีการควบคุม-การป้องกัน ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าของรางและกระแสไฟรั่วจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2 วิธีการที่มีการใช้งานของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟรั่ว

ตารางที่ 2.2 วิธีการที่มีการใช้งานลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟรั่ว

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

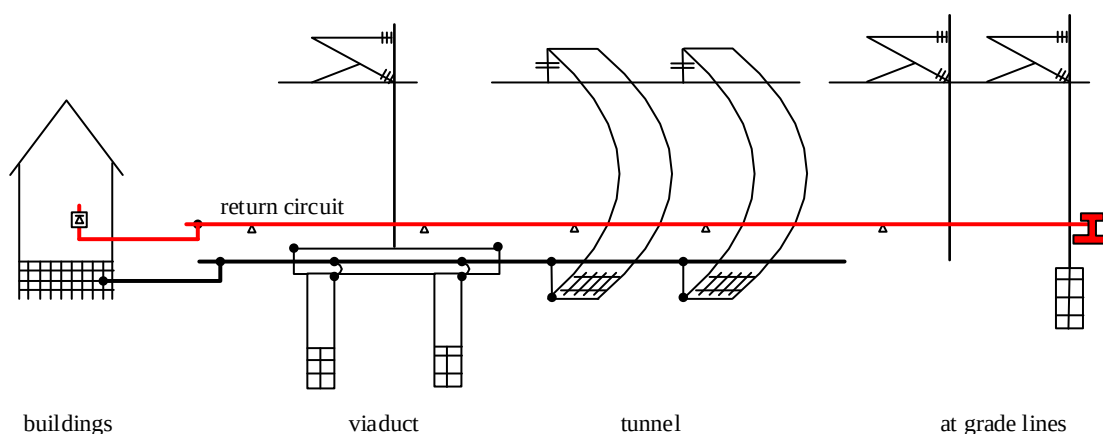
อย่างไรก็ตาม มีข้อบกพร่องบางประการในวิธีการควบคุมการป้องกัน โดยรุ่นที่มีฉนวนของวัสดุเคลือบและคอนกรีตผสมจะเสื่อมสภาพตามกาลเวลา การติดตั้งรางเสริมและการปรับเปลี่ยนส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องในรถไฟมักจะทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง และฉนวนของรางเสริมก็จะแยลงเมื่อเวลาผ่านไป ความต้านทานของสายเคเบิลมักจะสูงกว่ารางวิ่งมาก หากจำนวนสายเคเบิลไม่เพียงพอ ผลการลดลงไม่ชัดเจน ปริมาณและราคาของสายเคเบิลจำกัดการใช้งานด้านวิศวกรรม การปรับระยะห่างของแหล่งจ่ายไฟหรือแรงดันไฟฟ้าถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการขนส่งทางรถไฟในเขตเมืองใหม่ แต่ไม่เหมาะสำหรับการขนส่งทางรถไฟในเขตเมืองที่มีอยู่

2.4 การติดตั้งเพื่อลดศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว

วิธีการติดตั้งตัวนำย้อนกลับ RET-TPS และวิธีการใหม่ในการลดศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วด้วยระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ NEG-TPS หลักการของรถไฟฟ้ามอเตอร์และกระแสตรงกระแสสุดท้ายไหลกลับไปยังสถานีย่อย ผ่านวงจรย้อนกลับ สายสัมผัส และวงจรย้อนกลับบางส่วน

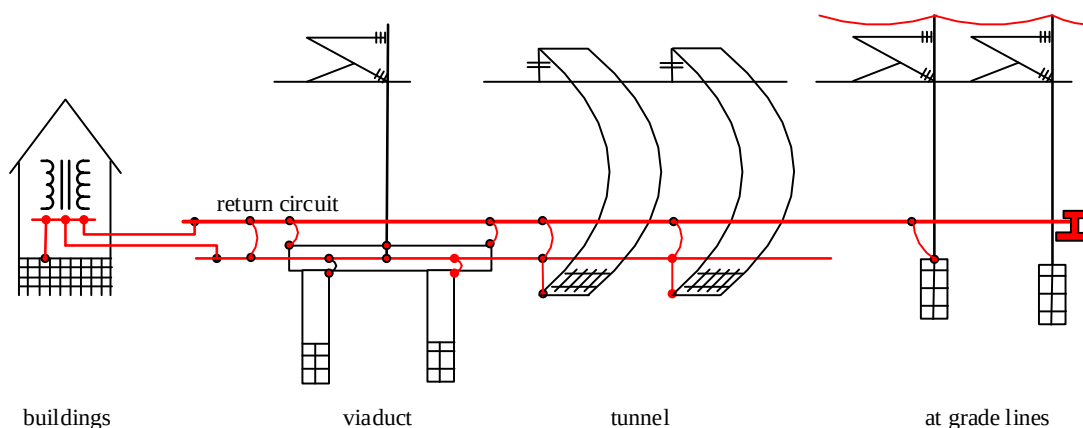
การใช้รางวิ่งเป็นวงจรรย้อนกลับเป็นลักษณะทั่วไปของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง มาตรการสำหรับการต่อสายดินและการเชื่อมต่อที่ใช้กับวงจรรย้อนกลับนั้นแตกต่างกันโดยพื้นฐานในระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสตรง รางวิ่งมีความทนทานต่อดินและระบบกราวด์สูง เพื่อหลีกเลี่ยงกระแสย้อนกลับทำให้กระแสรางวิ่ง สาเหตุเกิดการกัดกร่อนของกระแสไฟฟ้ารั่วของส่วนประกอบที่เป็นโลหะเมื่อสัมผัสกับพื้นดิน มีความเสี่ยงที่จะเกิดการแยกวงจรรย้อนกลับจากระบบกราวด์อย่างสมบูรณ์ ในรางวิ่งจะสร้างแรงดันไฟฟ้าระหว่างทางและดินระหว่างการดำเนินงานปกติและในกรณีที่ไฟฟ้าลัดวงจรเนื่องจากขาดการต่อสายดิน มีความเสี่ยงที่แรงดันไฟฟ้าสัมผัสจะเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดในกรณีที่เกิดกระแสสูงเป็นเวลานาน นอกจากแรงดันไฟตกที่เกิดขึ้นในระบบรางรถไฟไฟฟ้ากระแสตรงแล้วระบบกระแสสลับยังทำให้ตัวเหนี่ยวนำแรงดันตกซึ่งมีขนาดเกือบเท่ากัน ความถี่ในการทำงาน 16.7 Hz มากกว่าสองเท่าของค่าความถี่ที่ 50/60 Hz เมื่อรวมกับการจ่ายไฟฟ้าที่ยาวขึ้น จะนำไปสู่ศักย์ไฟฟ้าของรางที่สูงกว่าระบบกระแสตรง สำคัญแม้ว่าจะมีกระแสไฟทำงานน้อยกว่าเพื่อจำกัดศักย์ไฟฟ้าของรางให้เป็นค่าที่ยอมรับได้

จึงจำเป็นต้องเชื่อมต่อวงจรกับระบบกราวด์ กล่าวคือ เชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับตามราง รูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 วงจรรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง แสดงการเชื่อมต่อที่จำเป็นระหว่างวงจรรย้อนกลับและระบบสายดินสำหรับระบบกระแสตรงและกระแสสลับ ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 วงจรรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มาภาพ : (Chuchit., 2018)

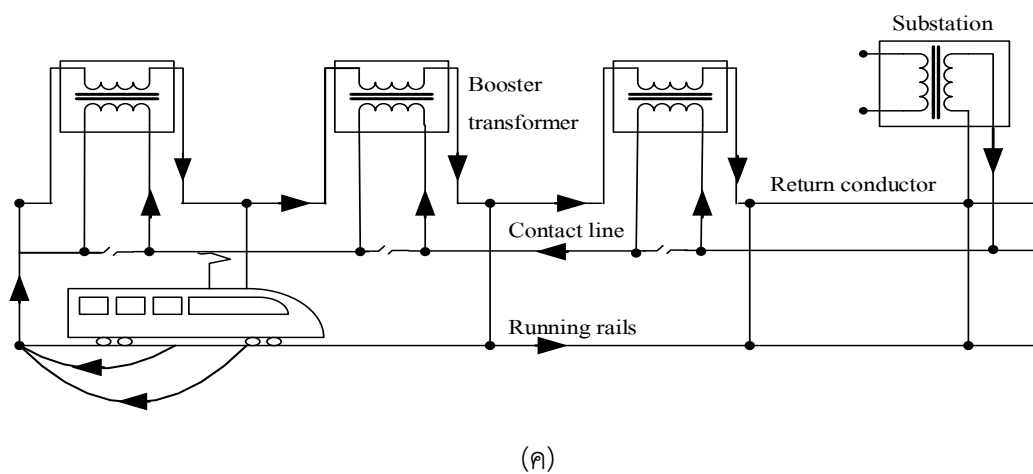
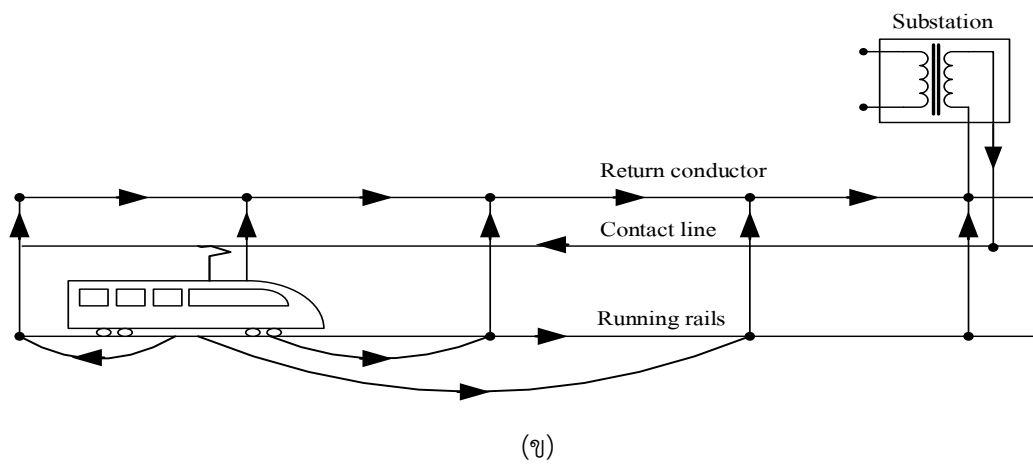
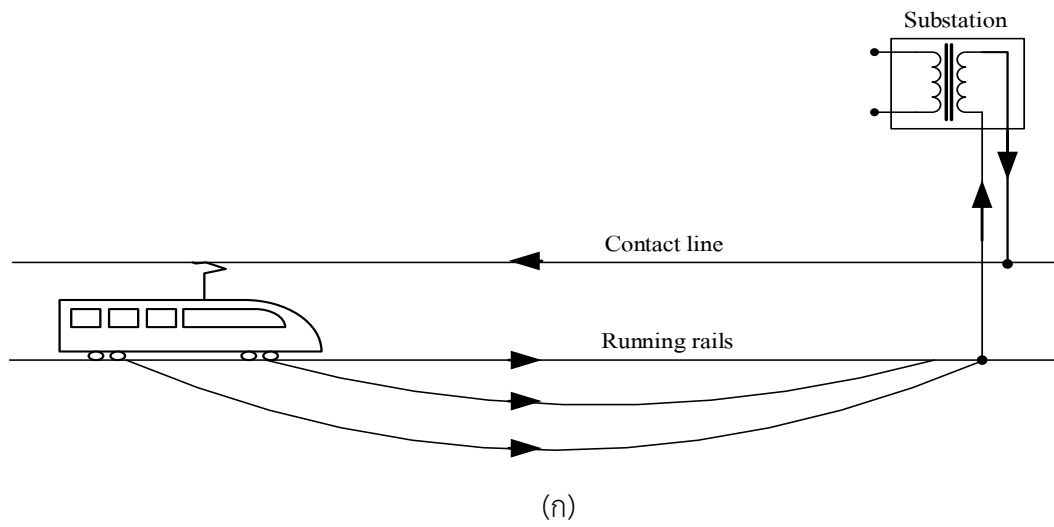


รูปที่ 2.8 วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ
ที่มาภาพ : (Chuchit., 2018)

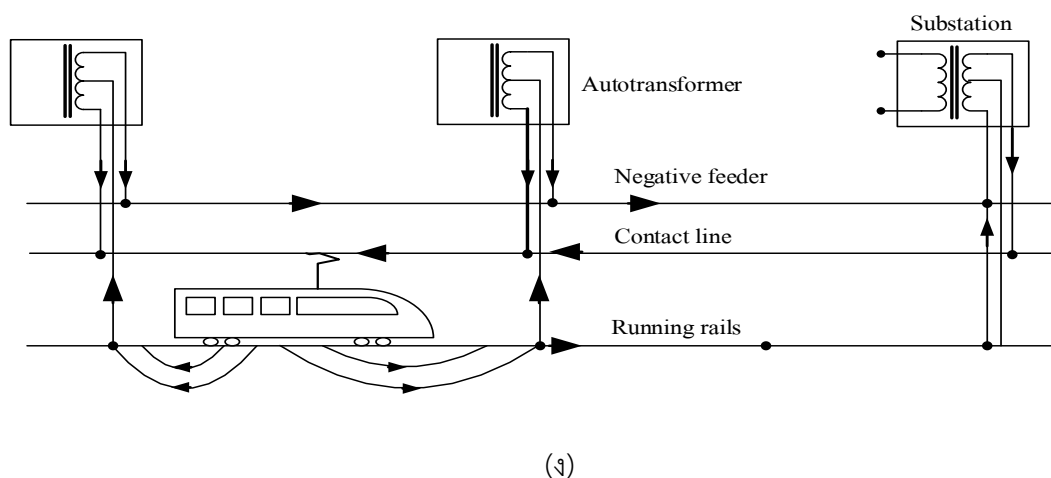
นอกจากกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านวงจรย้อนกลับแล้ว กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านระบบกราวด์ของอาคารอีกด้วย เนื่องจากการต่อลงกราวด์ของวงจรกระแสย้อนกลับทำให้เกิดการรบกวนกับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็กที่ไม่ต้องการบนอุปกรณ์ของรถไฟ และอาจทำให้เกิดการรบกวนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่งคลื่นของรถไฟกระแสตรง การแยกวงจรย้อนกลับและระบบสายดินอย่างสมบูรณ์เป็นหลักการระบบกระแสตรง การใช้งานจริงอาจแตกต่างกันไป

1) ระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ

จะกล่าวถึงการติดตั้งตัวนำย้อนกลับในระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสสลับ 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 รูปแบบการติดตั้งตัวนำย้อนกลับในระบบรถไฟกระแสสลับ



รูปที่ 2.9 รูปแบบการติดตั้งตัวนำย้อนกลับในระบบรถไฟกระแสสลับ (ต่อ)

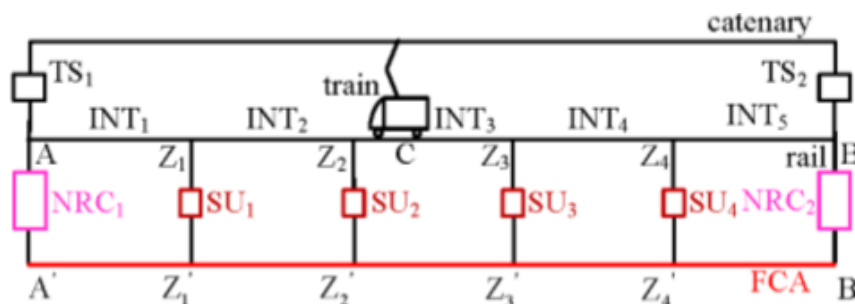
(ก) ระบบรางกลับ (ข) ระบบตัวนำย้อนกลับ

(ค) ระบบหม้อแปลงบูสเตอร์ (ง) ระบบหม้อแปลงไฟต์โนมตี

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

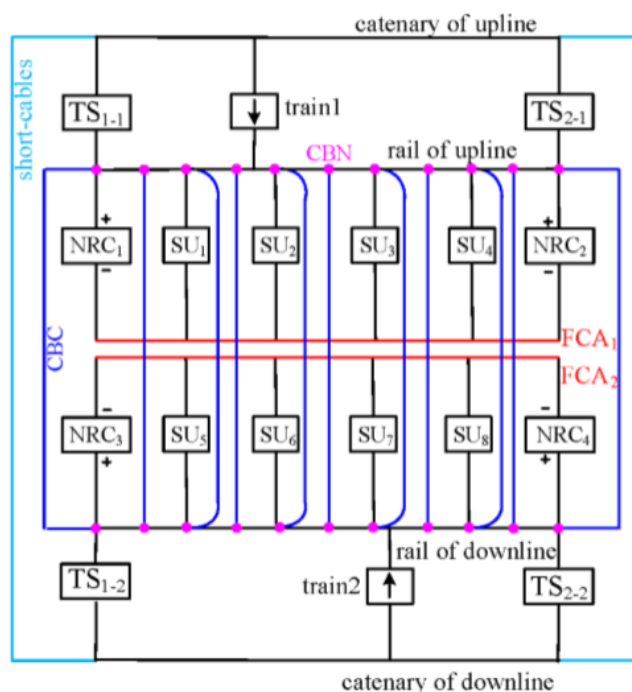
2) ระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ

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)

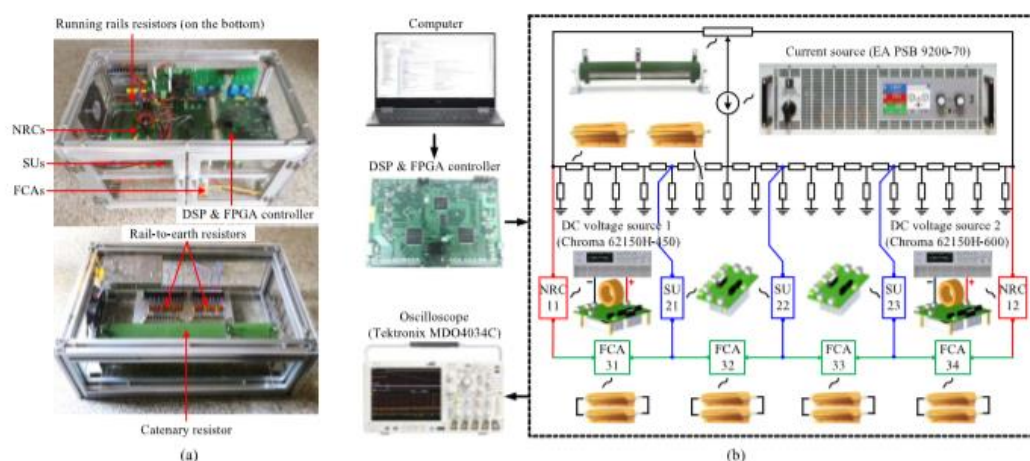
ในระบบ double-line ระหว่างสองสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 2.11 วงจรทั่วไประบบ NEG-TPS ระหว่างสองสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าหลายขบวน สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็นสถานีย่อยสองสถานี ตัวอย่างเช่น TS₁₋₁ และ TS₁₋₂ สำหรับการวิเคราะห์ในระบบ double-line จำนวนอุปกรณ์ NEG และ SU จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า และการทำงานของ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

ลบนี้นี้เป็นวิธีการที่เป็นไปได้และใช้งานได้จริงสำหรับปัญหาศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วในการขนส่งทางรถไฟในเขตเมือง (Gu et al., 2020)

2.5 วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง มีใช้งานอยู่ 5 รูปแบบ (กุลวร วานิพงษ์., 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

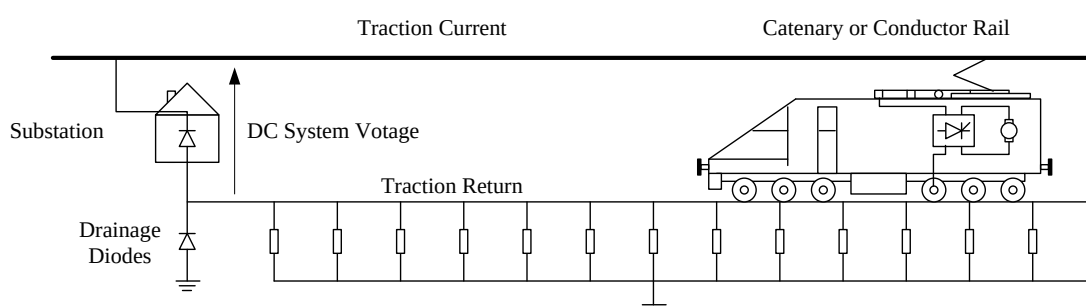
1) rail insulation system: RIS

ระบบ RIS เป็นระบบการต่อลงดินของแหล่งจ่ายไฟสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ล้อรถไฟฟ้าและรางวิ่งเป็นเส้นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปที่สถานีไฟฟ้า เนื่องจากระบบรถไฟฟ้าเดิมไม่มีการทำฉนวนไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับไม้หมอนรถไฟหรือส่วนที่รองรับรางวิ่งทำให้เกิดกระแสรั่ว (stray current) ไปยังส่วนอื่น ๆ ของโครงสร้างเกิดเส้นทางกระแสย้อนกลับอื่น ๆ ที่ซับซ้อนและสับสนยาก 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) ติดตั้งร่วมกับตัวนำลงดินที่สถานีไฟฟ้าดังรูปที่ 2.13 นอกจากนี้ในการติดตั้งจะมีอุปกรณ์อื่น ๆ ติดตั้งร่วมด้วย เช่น ตัวต้านทานจำกัดกระแส (current limiting resistor) และกับดักเสิร์จ (surge arrestor) เป็นต้น ถ้าไดโอดนำกระแสจะส่งผลให้แรงดันของรางวิ่งมีค่าเป็นศูนย์ ในกรณีไดโอดไม่นำกระแสหมายความว่าแรงดันที่รางจะมีค่าเป็นบวก รูปแบบที่ใช้ไดโอดนี้จะทำให้กระแสรั่วมีค่าน้อย และถ้าหากเกิดกระแสรั่วอันเนื่องมาจากความ

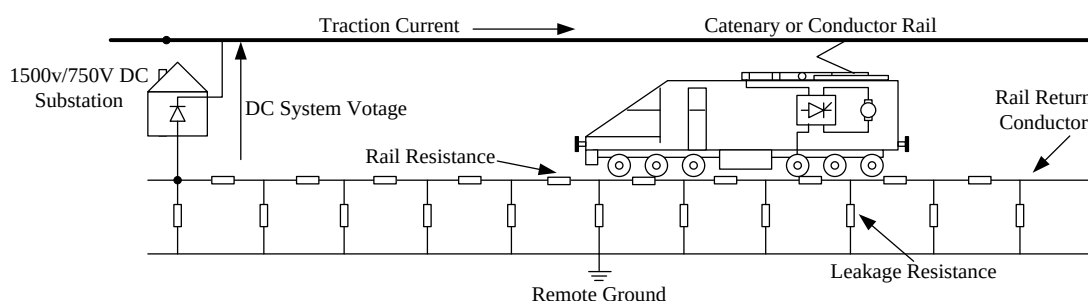
เสื่อมสภาพของการทำฉนวน ไดโอดจะทำหน้าที่นำกระแสกลับสู่สถานีจ่ายไฟโดยตรง อย่างไรก็ตาม การใช้ไดโอดต่อลงดินนี้จะเกิดปัญหาในกรณีที่รถไฟบางส่วนที่ทำการคืนพลังงานจากการเบรกเข้าสู่ระบบ (regenerative braking) จะเหนี่ยวนำให้รางวิ่งมีศักย์ไฟฟ้าติดลบไดโอดจะนำกระแสได้ในสถานการณ์นี้ ตัวอย่างระบบรถไฟที่ติดตั้งการต่อลงดินด้วยรูปแบบนี้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



รูปที่ 2.13 การต่อลงดินโดยใช้ไดโอด

3) floating negative return current system: FN RCS

ระบบ FN RCS จะไม่ต่อขั้วลบสับบาร์ลจากเอาต์พุตของสถานีเรียงกระแสลงดิน จะทำให้ที่สถานีไฟฟ้าไม่มีการต่อลงดิน ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วสับบาร์ลจะลอยอยู่และไม่จำเป็นต้องเท่ากับศูนย์ ทำให้รูปแบบนี้มีความเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันสัมผัสสูง (high touch voltage) ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานหรือต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยไม่ตั้งใจ ทำให้ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันที่รางวิ่ง (rail potential control device) เพิ่มเติม การติดตั้งรูปแบบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 ตัวอย่างของระบบรถไฟที่ใช้การต่อลงดินด้วยวิธีนี้ ได้แก่ Singapore MRT และ Hong Kong LRT

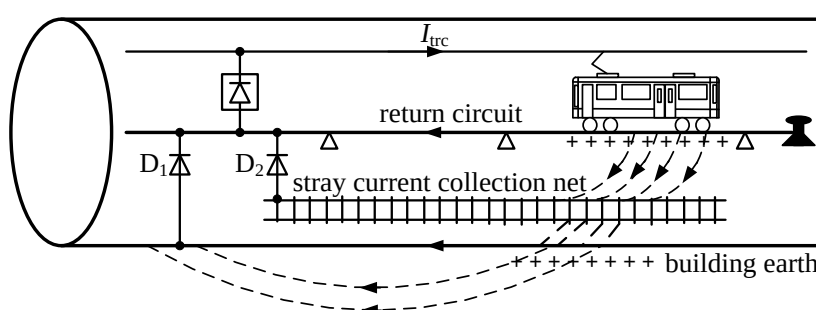


รูปที่ 2.14 Floating negative return current system

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 ทำให้การก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าบีทีเอสใช้การต่อเชื่อมกันของส่วนที่เป็นโลหะของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กกลองดินเท่านั้นโดยไม่มีการใช้ตาข่ายรวบรวมกระแสรั่วไหลและไดโอดแต่อย่างใด จากการศึกษาครั้งนี้ SIEMENS ได้ให้ข้อสังเกตเพิ่มเติมว่าไม่แนะนำให้ใช้ drainage diode เพื่อวัตถุประสงค์ในการป้องกันกระแสรั่ว

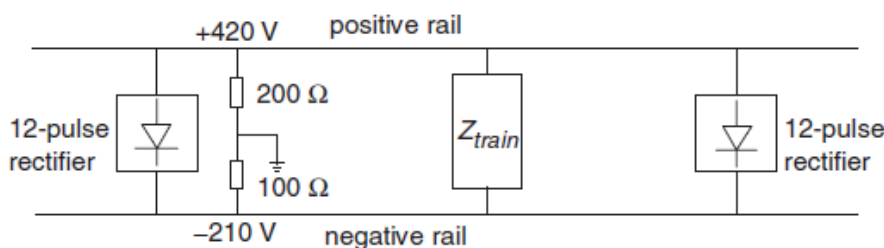


รูปที่ 2.15 ระบบ SCCN ที่ใช้ drainage diode

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 การประยุกต์ใช้งานในภาคปฏิบัติอาจจะแตกต่างเนื่องจากการติดตั้งตัวนำป้อนย้อนกลับที่เพิ่มเข้ามาจนนำไปกับรางโครงข่ายเก็บรวบรวมกระแสรั่วหรือการออกแบบที่แตกต่างกันของระบบการต่อลงดิน

2.6 สรุป

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