ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า | วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา | **ภาควิชา**

เรื่อง การศึกษาการเกิดกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบโครงสร้างใต้ดิน

A Study of Stray Current in Mass Transit Rail Underground Structure

นามผู้วิจัย นายสุวิทย์ บัวเพชร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์วินัย พฤกษะวัน, Dr.Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ **เดือน** **พ.ศ.**

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการเกิดกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบโครงสร้างใต้ดิน

A Study of Stray Current in Mass Transit Rail Underground Structure

โดย

นายสุวิทย์ บัวเพชร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุวิทย์ บัวเพชร 2554: การศึกษาการเกิดกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบโครงสร้างใต้ดิน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วินัย พฤกษะวัน, Dr.Ing. 183 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาสาเหตุ ผลกระทบและการป้องกันการเกิดกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบโครงสร้างใต้ดิน เพื่อป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างระบบรถไฟฟ้าเอง และโครงสร้างใกล้เคียง ดังเหตุการณ์ที่เคยเกิดขึ้นกับท่อก๊าสและท่อน้ำมันใต้ดินในต่างประเทศ ศึกษาทฤษฎีจากมาตรฐาน (European Standard EN 50122-2, 1998) ว่าด้วยการป้องกันการเกิดกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการจำลองผลจากข้อมูลโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล หาวิธีลดค่าแรงดันตกคร่อมโครงสร้างลง โดยการปรับค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์ ปรับค่าเฉลี่ยของวงจรรางกระแสไหลกลับ และการปรับค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาวโดยการใช้รางที่สี่เพิ่มเข้ามาช่วยในการนำกระแสกลับ

ผลการศึกษาทำให้ทราบถึงสาเหตุการเกิดกระแสรั่วไหลที่มีผลกระทบต่อโครงสร้าง วิธีการป้องกันที่สอดคล้องกับมาตรฐาน ผลการคำนวณเทียบเคียงที่ 1 ได้ค่าแรงดันออกมาค่า 0.2131 โวลต์ เพื่อเป็นค่าอ้างอิงในการคำนวณอื่นต่อไป ผลการคำนวณเทียบเคียงที่ 2 ทำการปรับค่าความนำระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์จำนวนสามค่าคือ 0.5, 0.1, และ 0.025 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร แรงดันลดลงจนถึง 0.1079 โวลต์ ผลการคำนวณเทียบเคียงที่ 3 การปรับค่าเฉลี่ยของวงจรรางกระแสไหลกลับจาก 1000A, 900A และ 800A ได้ค่าแรงดันลดลงคือ 0.1705 โวลต์ ผลการคำนวณเทียบเคียงที่ 4 การใช้รางวิ่งที่สี่เพิ่มเข้ามาในการนำกระแสกลับได้แรงดันคือ 0.1478 โวลต์ จากผลการปรับค่าตามสมมติฐานหลายวิธีล้วนแล้วแต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงและได้ทำการตรวจวัดค่าแรงดันรางเพื่อป้องกันการเกิดกระแสรั่วไหลรวมถึงสามารถระบุจุดบกพร่องของฉนวนรองรางได้ ผลที่ได้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย จากการวิจัยสามารถนำความรู้ไปใช้ในการบำรุงรักษารถไฟฟ้าสายปัจจุบันและการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายที่กำลังเกิดขึ้นในอนาคตได้

________________ ลายมือชื่อนิสิต ________________ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ___ / ___ / ___

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Suwit Buapetch 2011: A Study of Stray Current in Mass Transit Rail Underground Structure. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Winai Plueksawan, Dr.Ing. 183 pages.

This thesis includes a study of cause, affect and protection for stray current in the MRT underground system. The objective of study is to protect the MRT structure and other relevant structures that may be damaged. For example, the incidents, which occurred in the other countries, were the cases of leak in the underground gas and oil pipes. Moreover, there is a study of standard theory concerning the protection of stray current in the MRT DC system such as European Standard EN 50122-2, 1998. This case study is using the information details of the MRT Chaloem Ratchamongkhon Line in order to find out the way that reduces the potential value towards the structure. The methods of study are by adjusting the conductivity value per unit length between track and tunnel, the average current value of return rail, and resistivity of track per unit length with using additionally the forth rail in order to take the current back.

The result of study is to know the cause of stray current affected to the structure, and the protection method conformed to the standard. The values of calculation include : Comparison I: the potential value is 0.2131 V for referring to other calculation. Comparison II: adjusting the conductivity value per unit length between track and tunnel as 0.5,0.1 and 0.025 S/km, potential reduced to 0.1079 V Comparison III: adjusting the average current value of return rail as 1000A, 900A and 800A., potential reduced to 0.1705 V. Comparison IV : additionally the forth rail in order to take the current back, potential reduced to 0.1478 V. Finally, being adjusted according to hypothesis in different methods, the value of voltage is reduced. For the summary of research, not only the measurement of rail voltage which is used to protect the stray current can help us operate safely, but also it helps the system operator take this knowledge to apply for the MRT maintenance of this line and other lines.

______________________________ ______________________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์วินัย พฤกษะวัน, Dr.Ing. ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย และการให้คำแนะนำแนวทางการวิจัยจนส่งผลสู่ความสำเร็จของงานวิจัยชิ้นนี้ และกราบขอบพระคุณ รศ.ณัฏฐกา หอมทรัพย์, Ph.D. ที่กรุณาเป็นประธานการสอบ ผศ.ประมุข อุณหเลขกะ, วศ.ด. ที่กรุณาเป็นผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ในการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และได้ให้คำแนะนำปรับปรุงเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์มากที่สุด

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดความรู้เพื่อให้ผู้วิจัยสามารถนำไปทำประโยชน์ให้กับประเทศชาติได้ต่อไป ขอขอบคุณหน่วยงานการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยและบริษัทรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลประกอบการทำวัจัยอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณครอบครัวที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในทุกๆอย่างตลอดมา

สุวิทย์ บัวเพชร

ตุลาคม 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	66
อุปกรณ์	66
วิธีการ	67
ผลและวิจารณ์	69
ผล	69
วิจารณ์	118
สรุปและข้อเสนอแนะ	119
สรุป	119
ข้อเสนอแนะ	119
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	120
ภาคผนวก	123
ภาคผนวก ก การเกิดการกัดกร่อน	124
ภาคผนวก ข ระบบการเชื่อมต่อลงดินของโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้า สายเฉลิมรัชมงคล	143
ภาคผนวก ค มาตรฐาน EN 50122-2	145
ภาคผนวก ง นำส่งข้อมูลประกอบการทำวิทยานิพนธ์	172
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	183

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าแรงดันเฉลี่ยสูงสุดที่การจำลองต่างๆกัน	54
2	ผลการคำนวณค่าแรงดันตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรงระบบราง U_T	103
3	ผลการคำนวณปรับค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์	104
4	ผลการคำนวณปรับค่าเฉลี่ยของวงจรรางกระแสไหลกลับของส่วนที่พิจารณาสนใจในช่วงเวลาที่มีโหลดสูงสุด	106
5	ผลการคำนวณปรับค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาวโดยการใช้รางที่สี่เพิ่มเข้ามาคือกลายเป็นรางนำกระแสกลับมีสามราง	107

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างทางวิ่ง	4
2	สถานี	4
3	ระบบราง	5
4	ระบบรถ	5
5	เส้นทางรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล	6
6	กระแสรั่วไหล(stray current)	8
7	แผนผังการตรวจวัดกระแสรั่วไหลแบบอัตโนมัติ	9
8	อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางและฉนวนรอง	10
9	แบบระบบการต่อลงดินผ่านไดโอด	10
10	แบบจำลองกระแสรั่วไหล	11
11	ส่วนที่เกิดกระแสรั่วไหลวิ่งออกจากรางวิ่ง	12
12	แผนผังตัวอย่างเหตุการณ์ของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับรถไฟฟ้าใต้ดิน	12
13	แผนผังแสดงระบบการไหลกลับของกระแสรั่วไหล	13
14	ระบบการต่อลงดินแบบง่ายสำหรับรถไฟสองขบวนประเภทแหล่งจ่ายกระแสตรง	14
15	เขตแนวการป้องกัน	15
16	การวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งสำหรับรางวิ่งความยาว 10 เมตร	37
17	การจัดเรียงการวัดค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว G'_{RT} ระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์	38
18	การหาค่าความนำต่อหน่วยความยาว G'_{RE} สำหรับส่วนของรางแบบในอากาศ	40
19	ขั้วการระบายไฟฟ้า	42
20	แรงการระบายกระแส	42
21	การใช้ระบบกระแสป้องกันแบบแคโทดิก	43
22	แบบจำลองวงจรไหลกลับและโครงสร้าง	46
23	แรงดันเฉลี่ยของรางที่สาม	51
24	แรงดันเฉลี่ยของรางวิ่ง	51

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	แบบจำลองวงจรไหลกลับและโครงสร้าง	52
26	การวางตัวของกับดักกระแสรั่วไหลสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์	52
27	ผังแสดงการเชื่อมต่อตามความยาวของกับดักกระแสรั่วไหล	53
28	ค่าผันแปรที่ 1 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง	55
29	ค่าผันแปรที่ 2 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง	56
30	ค่าผันแปรที่ 3 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง	57
31	31 ค่าผันแปรที่ 4 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง	58
32	ค่าผันแปรที่ 5 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง	59
33	ค่าผันแปรที่ 6 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงเกิดความผิดพร่อง	60
34	ค่าผันแปรที่ 6 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไม่เกิดความผิดพร่อง	61
35	ภาพแสดงหลักการของการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหล	62
36	ภาพแสดงของการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหล	63
37	ภาพแสดงของการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหล	63
38	การจัดเรียงการวัดค่าแรงดันโครงสร้าง	64
39	ลักษณะการเกิดกระแสรั่วไหลของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าแบบกระแสตรง	69
40	การวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งสำหรับรางวิ่งความยาว 10 เมตร	75
41	การจัดเรียงการวัดค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว G'_{RT} ระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างอุโมงค์	77
42	การหาค่าความนำต่อหน่วยความยาว G'_{RE} สำหรับส่วนของรางแบบเปิด	78
43	ลักษณะของโครงสร้างแบบอุโมงค์กับค่าต่างๆที่มาตรฐานกำหนด	81
44	ระบบนำกระแสกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนกระแสตรง ส่วนอุโมงค์	83
45	การติดตั้งกับดักกระแสรั่วไหลก่อนทำการวางรางวิ่งช่วงชานชลา	84
46	การติดตั้งกับดักกระแสรั่วไหลก่อนทำการวางรางวิ่งช่วงชานชลาพร้อมจุดทดสอบ	85
47	การติดตั้งกับดักกระแสรั่วไหลก่อนทำการวางรางวิ่งช่วงอุโมงค์	85

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
48	จุดทดสอบที่เตรียมไว้หลังจากเทคอนกรีตทับกับดักกระแสรั่วไหล	86
49	การเชื่อมต่อระบบต่างๆเข้ากับโครงสร้างอุโมงค์แต่แยกออกจากกันกับระบบขับเคลื่อน	86
50	ลักษณะของระบบกับดักกระแสรั่วไหลที่สัมพันธ์กับโครงสร้างอุโมงค์	87
51	แบบจำลองโครงสร้างและวงจรไหลกลับของกระแส	89
52	ลักษณะการจ่ายไฟของระบบขับเคลื่อน	89
53	แบบวงจรไฟฟ้าของระบบที่พิจารณา	90
54	ค่าแรงดันเฉลี่ย G'RS=0.1 S/km , G'SE=10 S/km , RE=0.5 Ohm	91
55	ระบบการเชื่อมต่อภายในโครงสร้างอุโมงค์	92
56	การจัดเรียงระบบกับดักกระแสรั่วไหลภายในอุโมงค์ช่วงการก่อสร้าง	93
57	ภาพแสดงการตรวจวัดค่าแรงดันรางเพื่อวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วไหล	93
58	ภาพแสดงผลของการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหลของซีเมนส์	94
59	ภาพแสดงของการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหลเพื่อรักษาระดับแรงดันไม่ให้เกินกำหนด	94
60	การจัดเรียงการวัดค่าแรงดันโครงสร้าง	95
61	แรงดันสัมผัสที่ได้จากการคำนวณช่วงการเดินรถที่ 300 วินาที	97
62	ลักษณะโครงสร้างอุโมงค์ที่เกิดแรงดันตกคร่อม U_T	101
63	ลักษณะกระแสที่เกิดการรั่วไหล I_S, I_E	102
64	ลักษณะรางจ่ายไฟ (รางที่สาม 3 rd.Rail) ระหว่างสองสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน	102
65	การใช้รางวิ่งที่มีความเป็นฉนวนอยู่รอบๆเพื่อไม่ให้โลหะสัมผัสกับโครงสร้างอุโมงค์เป็นการลดความนำลง	104
66	ผลการคำนวณปรับค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์	105
67	ผลการคำนวณปรับขนาดของกระแสที่จ่ายให้กระแสที่จ่ายให้ระบบขับเคลื่อน	105
68	ผลการคำนวณปรับค่าเฉลี่ยของกระแสส่วนที่พิจารณาในช่วงเวลาที่มีโหลดสูงสุด	106

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
69	การใช้รางวิ่งที่สี่เพิ่มเข้ามาในระบบ	107
70	ผลการคำนวณปรับค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาวโดยการใช้รางที่สี่เพิ่มเข้ามาทำให้รางนำกระแสกลับมีจำนวนสามราง	108
71	แสดงพฤติกรรมค่าแรงดันรางวิ่งที่แปรตามตำแหน่งของตัวรถไฟ	110
72	ระบบการตรวจวัดกระแสรั่วไหลโดยการวัดแรงดันรางวิ่งเทียบกับโครงสร้าง SITRAS ® SMS	111
73	รูปแบบการแสดงผลระดับแรงดัน	111
74	รูปแบบการแสดงผลแบบระยะทาง	112
75	แบบแสดงโครงสร้างของโปรแกรม	113
76	หน้าต่างโปรแกรมการตรวจวัด (SITRAS ® SMS)	113
77	หน้าต่างโปรแกรมการตรวจวัดที่จุดตรวจวัดที่ระยะทางต่างๆ	114
78	ค่าที่วัดได้ทันทีต่อเนื่องตลอดเวลา	114
79	ค่าที่วัดได้เฉลี่ยตามเวลาที่จุดตรวจวัดต่างๆ	115
80	ค่าเฉลี่ยที่วัดได้ตามแนวสายทางที่จุดตรวจวัดต่างๆ	115
81	ค่าเฉลี่ยที่วัดได้ตามแนวสายทางที่จุดวัดต่างๆ	116
82	โครงสร้างระบบตรวจวัด	117

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน เห็นได้ชัดเจนหลังจากดัดงอชิ้นงาน	128
ก2	การแตกร้าวจากแรงเค้นและการกัดกร่อนของเหล็กสมอยึดผนังอุโมงค์	128
ก3	การกัดกร่อนแบบกัลวานิกของท่อเหล็กที่ต่อกับข้อต่อทองเหลือง	129
ก4	การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดซุปเปอร์ออสเตไนท์(ปกติจะทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดอื่น) แบบสม่ำเสมอแบบหลุมและแบบบริเวณซอก	129
ก5	การกัดกร่อนแบบหลุมของวัสดุทางการแพทย์ที่ใช้ฝังในร่างกายเพื่อการรักษา	130
ก6	การกัดกร่อนของกระป๋องบรรจุอาหารบริเวณตะเข็บฝาและตะเข็บข้าง	130
ก7	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) แสดงการสูญเสียโคบอลต์ของซีเมนเตททังสเตนคาร์ไบด์เนื่องจากการกัดกร่อน	130
ก8	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของซีเมนเตททังสเตนคาร์ไบด์หลังจากการกัดกร่อน	131
ก9	การใช้ Bolt ยึดโลหะ	137
ก10	การเชื่อมยึดโลหะ	137
ก11	Cathodic protection ของท่อเหล็กโดยแบบใช้กระแสไฟฟ้า	138
ก12	ปฏิกิริยาแอโนดิก	142

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

U_T = ค่าแรงดันตกคร่อมตามแนวความยาวบนโครงสร้างเสริมแรงคอนกรีต หน่วยโวลต์

G'_{RT} = ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์ หน่วยซิเมนต์ต่อกิโลเมตร

I = ค่าเฉลี่ยของวงจรรางกระแสไหลกลับของส่วนที่พิจารณาสนใจในช่วงเวลาที่มีโหลดสูงสุด หน่วยแอมแปร์

L = ค่าความยาวที่พิจารณาตามเส้นทางช่วงสถานีจ่ายไฟฟ้า หน่วยกิโลเมตร

L_C = คุณลักษณะความยาวของระบบรางวิ่งโครงสร้าง

$R'_{R(2\ rails)}$ = ค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาว หน่วยโอห์มต่อกิโลเมตร

R'_T = ค่าความต้านทานของตัวนำต่อเชื่อมระหว่างโครงสร้างต่อหน่วยความยาว หน่วยโอห์มต่อกิโลเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาการเกิดกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบโครงสร้างใต้ดิน

A Study of Stray Current in Mass Transit Rail Underground Structure

คำนำ

การจราจรในเมืองใหญ่ที่เป็นเมืองหลวงของประเทศอย่างเช่นกรุงเทพฯของเราการจราจรด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลจะติดขัดในชั่วโมงเร่งด่วน ทางออกของคนเมืองในการเดินทางคือการมีระบบขนส่งมวลชนโดยรถไฟฟ้า การก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้าแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ แบบยกระดับและแบบใต้ดิน แบบยกระดับในบ้านเราที่เห็นได้ชัดคือ BTS โดยบริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) และแบบใต้ดินผู้ก่อสร้างโครงการ โครงการหลักคือการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย ส่วนผู้ให้บริการรถไฟฟ้า MRT สายเฉลิมรัชมงคล โดยบริษัทรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน)

การขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ตัวรถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือแบบกระแสสลับและกระแสตรง ระบบจะมีตัวนำสำหรับส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ติดตั้งบนโครงสร้างทางวิ่ง และมีตัวนำรับไฟเข้าตัวรถ เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านระบบขับเคลื่อนและระบบบริการภายในตัวรถแล้วกระแสไฟฟ้าจะไหลกลับแหล่งจ่ายโดยผ่านทางล้อของตัวรถไฟฟ้าลงบนรางแล้วไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า สำหรับโครงสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินรางวิ่งที่เป็นโลหะถูกติดตั้งบนฐานคอนกรีตซึ่งมีอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางที่เป็นโลหะอยู่ในอุโมงค์ที่ความลึกลงไปในชั้นดินประมาณ 25-30 เมตร โครงสร้างที่อยู่ภายใต้รางวิ่งจะมีค่าความนำไฟฟ้าอยู่ ในส่วนนี้หากการออกแบบและก่อสร้างไม่เป็นไปตามมาตรฐานหรือการบำรุงรักษาไม่ดีอาจก่อให้เกิดความเสียหายที่เกิดจากกระแสรั่วไหล(stray current)ที่รั่วไหลออกมาจากรางวิ่งและเข้าสู่วัตถุที่เป็นโลหะที่อยู่ใกล้เคียงผลคือเกิดการกัดกร่อนขึ้นทั้งรางวิ่งเองโครงสร้างอุโมงค์และสาธารณูปโภคโลหะที่อยู่ใกล้เคียง

การวิจัยนี้ทำการศึกษาสาเหตุของการเกิดกระแสรั่วไหลที่อาจจะเกิดขึ้นและผลกระทบ เพื่อศึกษาวิธีการป้องกันและลดปริมาณการเกิดกระแสรั่วไหลลง เนื่องจากอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อรางวิ่งของระบบรถไฟฟ้าและระบบสาธารณูปโภคที่อยู่ใต้พื้นผิวดินและบริเวณใกล้เคียง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการเกิดกระแสรั่วไหลที่อาจจะเกิดขึ้นในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแหล่งจ่ายกระแสตรงแบบโครงสร้างใต้ดิน พฤติกรรมของกระแสรั่วไหลที่อาจจะส่งผลกระทบต่อรางวิ่งและโครงสร้างโลหะของระบบรถไฟฟ้าเองและสาธารณูปโภคที่อยู่รอบข้าง จำลองวิธีการป้องกันและปรับปรุงระบบโครงสร้าง ทำการวัดแรงดันรางเพื่อการป้องกันการเกิดกระแสรั่วไหล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

รถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล (Metropolitan Rapid Transit Chaloem Ratchamongkhon line) เป็นรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของประเทศไทย ช่วงหัวลำโพง-ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์-บางซื่อ

1. ภาพรวมโครงการ

โครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล เป็นรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนใต้ดินสายแรกของประเทศไทย คณะรัฐมนตรีได้มีมติเมื่อวันที่ 12 กันยายน 2538 ให้ก่อสร้างโครงการฯ เป็นระบบใต้ดินตลอดสาย โดยให้ รฟม.ลงทุนก่อสร้างงานโยธาและเอกชนลงทุนงานระบบรถไฟฟ้า ทั้งนี้ให้ รฟม.ดำเนินการจ้างผู้รับเหมาดำเนินการออกแบบและก่อสร้างไปพร้อมกัน (DESIGN & BUILD) โดยในส่วนของเงินทุนให้กระทรวงการคลังและสำนักงบประมาณรับไปพิจารณา จัดหาจากแหล่งเงินกู้เงื่อนไขผ่อนปรน รฟม. ได้เร่งดำเนินการตามมติคณะรัฐมนตรีดังกล่าว และได้รับพระมหากรุณาธิคุณ จากพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้สมเด็จพระบรมโอรสาธิราชฯสยามมกุฎราชกุมารเสด็จฯ แทนพระองค์ทรงวางศิลาฤกษ์โครงการฯ ณ บริเวณหน้าสถานีรถไฟหัวลำโพง เมื่อวันที่ 19 พฤศจิกายน 2539

โครงการรถไฟฟ้ามีสถานีทั้งหมด 18 สถานีคือ 1. สถานีบางซื่อ 2.สถานีกำแพงเพชร 3.สถานีสวนจตุจักร 4.สถานีพหลโยธิน 5.สถานีลาดพร้าว 6.สถานีรัชดาภิเษก 7.สถานีสุทธิสาร 8.สถานีห้วยขวาง 9.สถานีศูนย์วัฒนธรรมแห่งประเทศไทย 10.สถานีพระราม9 11.สถานีเพชรบุรี 12.สถานีสุขุมวิท 13.สถานีศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ 14.สถานีคลองเตย 15.สถานีลุมพินี 16.สถานีสีลม 17.สถานีสามย่าน และ18.สถานีหัวลำโพง เปิดให้บริการเมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม 2547

ลักษณะโครงการ โครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล ให้รถไฟฟ้าขนาดใหญ่ (HEAVY RAIL) มีทางวิ่งเป็นอุโมงค์ใต้ดินตลอดสาย ระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร

โครงสร้างทางวิ่ง อุโมงค์คู่วางตามแนวราบ และซ้อนตามแนวดิ่ง เส้นผ่านศูนย์กลางภายในอุโมงค์ 5.7 เมตร ผนังอุโมงค์หนา 0.30 เมตร ความลึกของอุโมงค์ประมาณ 15 - 25 เมตร ทางเดินฉุกเฉิน กว้าง 0.6 เมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 1 โครงสร้างทางวิ่ง

ที่มา: การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (2552)

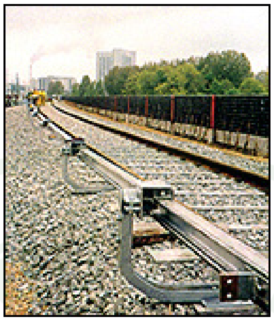
สถานี 18 สถานี มีทั้งแบบชานชาลากลาง ชานชาลาด้านข้าง และชานชาลาซ้อนกัน มีความยาวประมาณ 200 เมตร กว้าง 23 เมตร (สถานีมาตรฐาน) มีประตูชานชาลา (Platform Screen Door)

ภาพที่ 2 สถานี

ที่มา: การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (2552)

ระบบราง รางวิ่งขนาดมาตรฐาน (STANDARD GAUGE) กว้าง 1.435 เมตร โดยมีรางที่ 3 วางขนานกันไปกับรางวิ่ง สำหรับจ่ายไฟฟ้าให้ตัวรถ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 ระบบราง

ที่มา: การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (2552)

ระบบรถ รถไฟฟ้าขนาดใหญ่ (HEAVY RAIL) ใช้ล้อเหล็กวิ่งบนรางเหล็ก เป็นรถปรับอากาศ ขนาดกว้าง 3.2 เมตร ยาว 20-24 เมตร สูงประมาณ 3.7 เมตร ความจุ 320 คนต่อคัน วิ่ง 3 - 6 คันต่อขบวน ใช้ไฟฟ้า 750 โวลต์ กระแสตรง ป้อนระบบขับเคลื่อนรถ ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขับเคลื่อนตัวรถ ควบคุมการเดินรถด้วยระบบอัตโนมัติจากศูนย์ควบคุม ความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

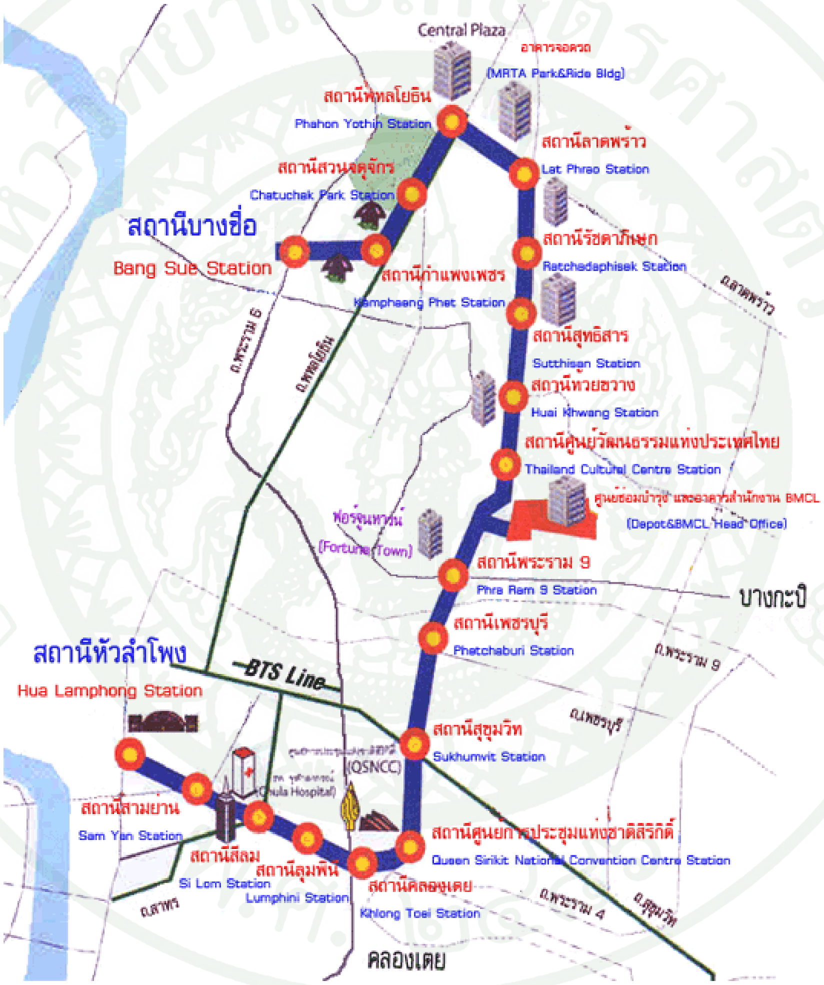
ภาพที่ 4 ระบบรถ

ที่มา: การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (2552)

ระบบเก็บค่าโดยสาร ใช้ระบบเก็บและตรวจตั๋วอัตโนมัติ และสามารถใช้ตั๋วร่วมกับระบบอื่นได้ ค่าโดยสารเก็บตามระยะทาง อัตราค่าโดยสารปีที่เปิดบริการ (ปี 2545) 14 - 36 บาท ค่าโดยสารปรับตามดัชนีผู้บริโภคทุก ๆ 2 ปี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การให้บริการ ให้สัมปทานเอกชนดำเนินการ 25 ปี ความถี่ชั่วโมงเร่งด่วน 2 - 4 นาทีต่อขบวนชั่วโมงปกติ 4 - 6 นาที/ขบวน ให้บริการ 5.00 - 24.00 น. ความเร็วในการเดินทางเฉลี่ย 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความจุคนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง : ให้บริการได้มากกว่า 50,000 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง



ภาพที่ 5 เส้นทางรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล

ที่มา: การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (2552)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

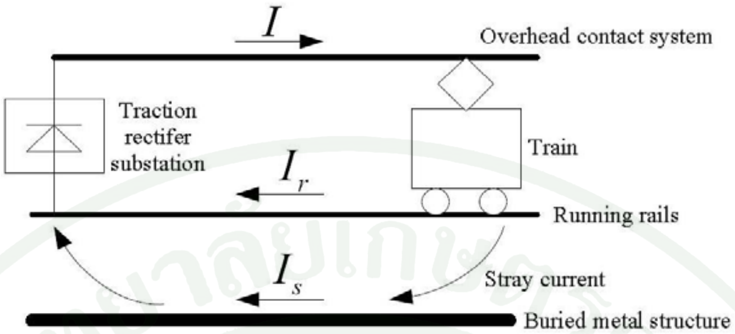
2. ระบบการจ่ายไฟฟ้า

โครงการจะรับไฟจากการไฟฟ้านครหลวงจากสองแหล่งคือจากสถานีไฟฟ้ารัชดาและสถานีไฟฟ้าบางกะปิที่ระดับแรงดัน 69kV โดยสถานีไฟฟ้าอยู่ที่ศูนย์ซ่อมบำรุง(Depot)และลดระดับแรงดันลงมาเป็น 24kV สองแหล่งจ่ายนี้จะวางสายเดินตลอดแนวสายทางของรถไฟฟ้าเพื่อความมีเสถียรภาพของระบบและยังมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองกำลังขับเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อสนับสนุนระบบอีกส่วนหนึ่ง เมื่อกระแสไฟฟ้า 24kV ถึงแต่ละสถานีจะถูกแยกใช้สำหรับงานบริการอาคารและสำหรับงานขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ในส่วนงานบริการอาคารแรงดันจะถูกแปลงที่ 380V เพื่อเข้าตู้ MDB และต่อใช้งานต่อไป ส่วนงานขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจะผ่านหม้อแปลงลดแรงดันและเรียงกระแสเป็นกระแสตรงที่ 750VDC จากนั้นขั้วบวกถูกต่อผ่านตัวนำเพื่อส่งจ่ายผ่านรางไฟฟ้าที่สาม (third rail) วางตัวตามแนวรางรถไฟฟ้าเพื่อส่งไฟเข้าสู่ตัวรถผ่านแผ่นรับกระแส (collector shoes)ไปยังระบบขับเคลื่อนและระบบบริการภายในรถ จากนั้นกระแสไฟฟ้าจะกลับไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าผ่านทางรางวิ่งทั้งสองของรถไฟฟ้าเรียกว่า Negative Return of Traction Power(MESC Association, n.d.)

3. กระแสรั่วไหล (stray current)

รางวิ่งที่ทำด้วยเหล็กมีความต้านทานต่อกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามระยะทาง(V=IR)ถ้าอยู่ห่างจากสถานีจ่ายไฟมากจะเพิ่มความต้านทานมากตามสัดส่วนของระยะทางที่เพิ่มขึ้น เป็นสัดส่วนกับปริมาณของกระแสขับเคลื่อนที่จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับน้ำหนักของรถ ปริมาณผู้โดยสารและอัตราเร่งของรถ ในปรากฏการณ์นี้ จะมีกระแสไฟขั้วลบบางส่วนที่พยายามหาทางลัดเลาะรั่วออกไปนอกรางตามทิศทางที่มีความต้านทานต่ำกว่ารางในขณะนั้น ผ่านอุปกรณ์รองราง ยึดราง(ซึ่งปกติจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวน)หาทางกลับไปสู่สถานีจ่ายไฟของตนเองโดยไหลผ่านโครงสร้างที่เป็นโลหะ หรือในระหว่างการใช้งานอาจจะมีบางจุดที่มีสิ่งสกปรกต่างๆมาเปื้อนทำให้มีความเป็นฉนวนไม่ได้กระแสเหล่านี้จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของการผุกร่อนที่เกิดอยู่แล้วในธรรมชาติให้มีอัตราของการผุกร่อนให้เร็วขึ้น สิ่งที่ตามมาคือการกัดกร่อนของโลหะและจะทำให้เกิดความเสียหายต่อสาธารณูปโภคที่อยู่ใกล้เคียงเช่นท่อน้ำ หรือการระเบิดของท่อแก๊ส ท่อน้ำมันดังที่เกิดในต่างประเทศ(สมเกียรติ, 2548)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 กระแสรั่วไหล(stray current)

ที่มา: Mu Longhua and Zhouwei (2007)

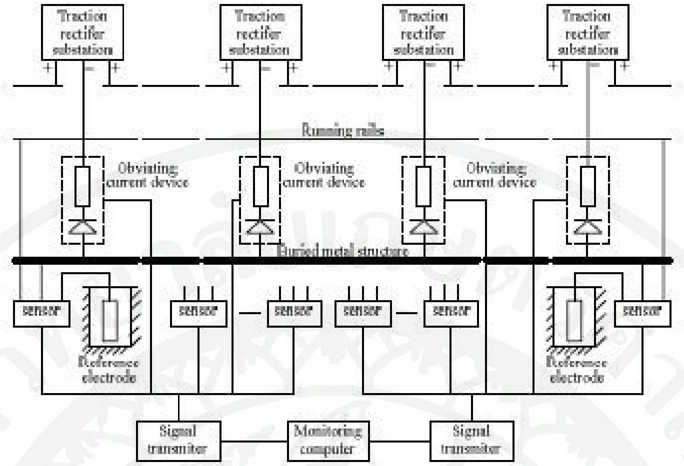
4. เอกสารที่เกี่ยวข้องจาก IEEE

4.1 Stray current automatic monitoring system and intelligent obviating current device in metro

Key word: stray current, track transportation, metro, intelligent obviating current and corrosion

เป็นการติดตั้งระบบตรวจจับกระแสรั่วไหลโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Intelligent obviating current device เพื่อตรวจจับค่าสามจุดคือที่รางวิ่ง(running rails) โครงสร้างโลหะที่ฝังอยู่ใต้ดิน และหลักดินอ้างอิง จากนั้นส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงสถานะ(Mu Longhua and Zhouwei, 2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 7 แผนผังการตรวจวัดกระแสรั่วไหลแบบอัตโนมัติ

ที่มา: Mu Longhua and Zhouwei (2007)

4.2 Analysis of stray current, track-to-earth potentials and substation negative grounding in DC traction electrification system

ส่วนแรก กล่าวถึง การออกแบบอุปกรณ์เหนี่ยวยึดรางให้มีความเป็นฉนวนมากที่สุด การพ่นเคลือบสีรางและสร้างความเป็นฉนวนระหว่างรางกับพื้นโครงสร้าง การเว้นระยะห่างจากรางกับโครงสร้างพื้น

ส่วนที่สอง เป็นการวิเคราะห์กระแสรั่วไหลโดยใช้ spherical electrode model กรณีที่กระแสรั่วผ่านฉนวนลงสู่ดิน(Kinh *et al*., 2001)

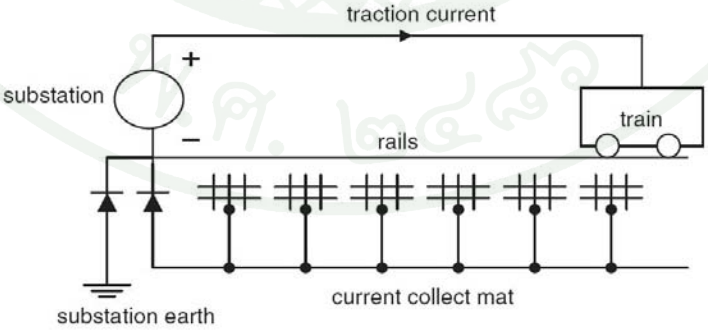
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 8 อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางและฉนวนรอง

ที่มา: Kinh *et al*. (2001)

4.3 Control scheme for reducing rail potential and stray current in MRT systems

รับกระแสรั่วไหลจาก current collect mat ที่ฝังอยู่ใต้โครงสร้างรางวิ่งและส่งผ่านไดโอดกลับคืนสู่สถานีไฟฟ้าของระบบ(Liu and Chen, 2005)



ภาพที่ 9 แบบระบบการต่อลงดินผ่านไดโอด

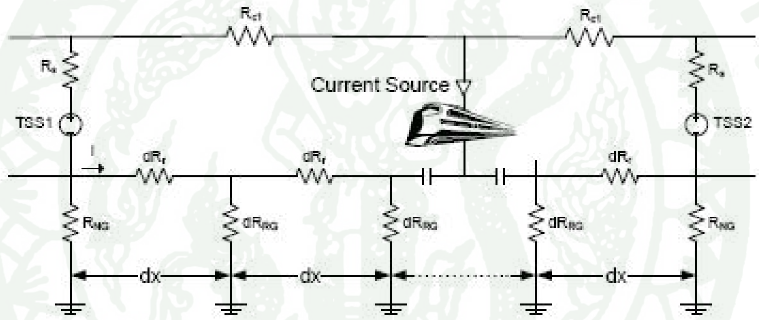
ที่มา: Liu and Chen (2005)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.4 Effects of different earthing schemes on the stray current in rail transit systems

Key word: DC electrified railways, dioded earthed schemes, floating schemes, solidly earthed schemes and stray current

เป็นการวิเคราะห์การเกิดกระแสรั่วไหลในโครงการ Tehran Metro Line3.(Iran)โดยใช้โปรแกรม MTS และ MATLAB(Jamali *et al.*, n.d.)



ภาพที่ 10 แบบจำลองกระแสรั่วไหล

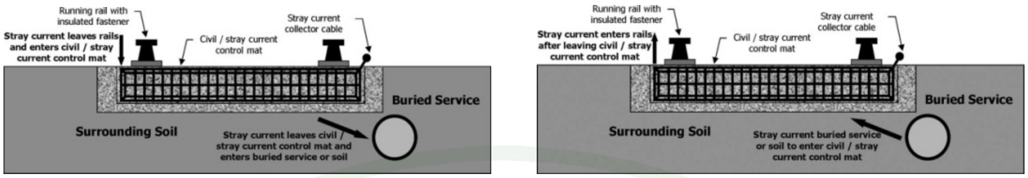
ที่มา: Jamali *et al.* (n.d.)

4.5 Stray current control in DC mass transit systems

Key word: corrosion, heavy rail, light rail, rail transportation, stray current and transit

การออกแบบระบบป้องกันการเกิดกระแสรั่วไหลโดยใช้หลักการความเป็นฉนวนของระบบรางและอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางร่วมกับโครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน(Ian *et al.,* 2005)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



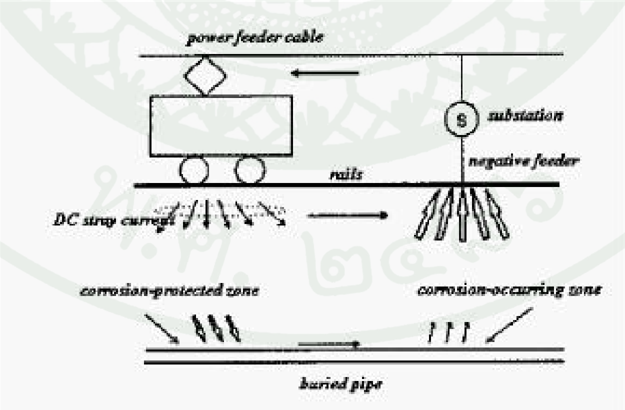
ภาพที่ 11 ส่วนที่เกิดกระแสรั่วไหลวิ่งออกจากรางวิ่ง

ที่มา: Ian *et al.* (2005)

4.6 Data logger apparatus for stray current measurement of subway and power line

Key word: interference, stray current, subway, power line and P/S potential

การวิเคราะห์การเกิดกระแสรั่วไหลที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างที่อยู่ใต้ดินเช่นท่อน้ำ ท่อก๊าซ และท่อน้ำมัน เกิดการกัดกร่อนและอาจทำให้ท่อก๊าซระเบิดได้(Jeong-Hyo *et al.*, 2004)



ภาพที่ 12 แผนผังตัวอย่างเหตุการณ์ของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับรถไฟฟ้าใต้ดิน

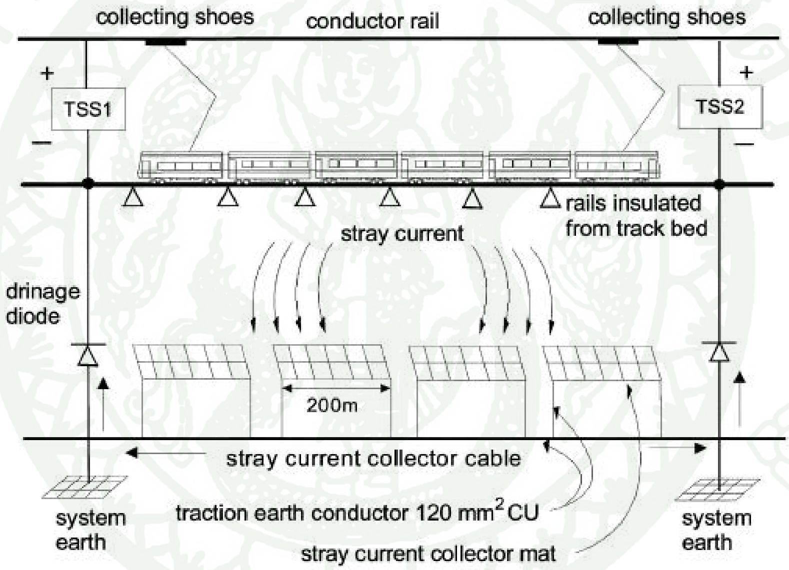
ที่มา: Jeong-Hyo *et al.* (2004)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.7 Evaluation of the maximum potential rise in Taipei rail transit systems

Key word: DC electrified railways, potential rise, stray currents and traction substation

การประเมินค่ากระแสรั่วไหลในโครงการรถไฟฟ้า Taipei(Chien-Hsing, 2005)



ภาพที่ 13 แผนผังแสดงระบบการไหลกลับของกระแสรั่วไหล

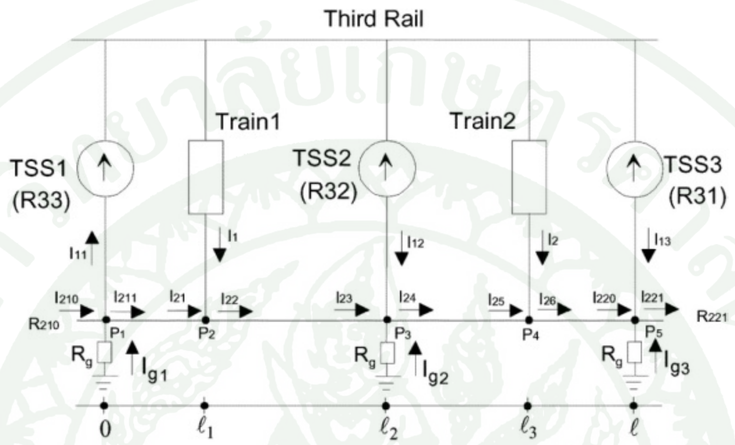
ที่มา: Chien-Hsing (2005)

4.8 Assessment of grounding schemes on rail potential and stray currents in a DC transit system

Key word: diode grounded, direct grounded, rail potential, stray currents and ungrounded

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วไหลบนค่าความต้านทานที่แตกต่างกันของกราวด์รางวิ่ง (running rails)(Chien-Hsing and Chien-Jung, 2006)



ภาพที่ 14 ระบบการต่อลงดินแบบง่ายสำหรับรถไฟสองขบวนประเภทแหล่งจ่ายกระแสตรง

ที่มา: Chien-Hsing and Chien-Jung (2006)

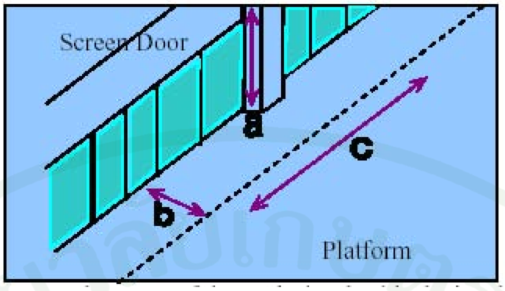
4.9 Influence of soil structures on corrosion performance of floating-DC transit systems การวิเคราะห์การไหลของ stray current ในรูปแบบชั้นดินที่แตกต่างกัน(Charalambos and Ian , 2007)

4.10 Touch voltage protection on Singapore MRT system

Key word: touch voltage protection, platform screen door(PSD), station platform, protection zone, stray current protection, bonding, insulation and isolation

การวิเคราะห์การเกิดอันตรายกับผู้โดยสารจากการสัมผัส(touch voltage) platform screen doors ที่เกิดจากกระแสรั่วไหล(Sim *et al.,* n.d.)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 15 เขตแนวการป้องกัน

ที่มา: Sim *et al.* (n.d.)

5. มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง(European Standard EN 50122-2, 1998)

มาตรฐานที่ใช้ประกอบการออกแบบและดำเนินการป้องกันการเกิดกระแสรั่วไหลของโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลใช้มาตรฐาน EN 50122-2 (Railway Applications Fixed Installations Protective Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems)

1. ขอบเขตของมาตรฐาน มาตรฐานนี้จะกล่าวถึงข้อกำหนดความต้องการที่จะป้องกันผลของกระแสรั่วไหลที่เป็นผลมาจากการเดินระบบของระบบขับเคลื่อนรูปแบบรางแหล่งจ่ายกระแสตรง มาตรฐานนี้นำไปใช้กับส่วนที่เป็นโลหะทั้งหมดที่ติดตั้งถาวรจากส่วนของระบบรางและรวมไปถึงส่วนประกอบที่เป็นโลหะที่ติดตั้งอยู่หลายๆตำแหน่งในบริเวณพื้นดิน ซึ่งจะเป็นส่วนที่นำพากระแสรั่วไหลจากการทำงานของระบบรถไฟฟ้า ให้ใช้มาตรฐานนี้กับรถไฟฟ้าระบบรางที่มีระบบขับเคลื่อนกระแสตรงในโครงการที่กำลังจะก่อสร้างในอนาคต และสามารถนำไปใช้พิจารณาหาสาเหตุของปัญหากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นในระบบรถไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่แล้ว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.1 ขอบเขตที่ครอบคลุม

1.1.1 รถไฟฟ้าระบบราง

1.1.2 ระบบขนส่งมวลชน เช่น รถราง, รถไฟยกระดับและใต้ดิน, รถไฟบนภูเขา, รถรางไฟฟ้า และระบบที่ใช้อำนาจแม่เหล็กลอย

1.1.3 ระบบขนส่งวัสดุ

1.2 ขอบเขตที่ไม่ครอบคลุม

1.2.1 ระบบรถรางในเหมืองที่อยู่ใต้ดิน

1.2.2 ปั้นจั่น, ระบบการเคลื่อนย้ายและอุปกรณ์ที่คล้ายกับการขนส่งบนราง, โครงสร้างชั่วคราวที่ไม่ได้รับไฟโดยตรงจากระบบสายถาวรและไม่ทำให้เกิดอันตรายจากระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าขับเคลื่อน

1.2.3 พาหนะโดยสารแบบห้อย

1.2.4 กระเช้าไฟฟ้าแบบเคลื่อนบนราง

1.2.5 งานบำรุงรักษา

2. กฎเกณฑ์ที่อ้างอิงถึง มาตรฐานนี้รวมเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันจากการอ้างอิง จากส่วนสาธารณะอื่นๆทั่วไปที่เหมาะสมสำหรับการอ้างอิงเพื่อพัฒนาหรือแก้ไขจากหลายๆแหล่งมาประยุกต์ที่มาตรฐานนี้คือ มาตรฐานยุโรป มาตรฐานนี้มีส่วนอ้างอิงมาจากมาตรฐานต่างๆดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1 EN 50122-1 Railway Applications Fixed installations Protective provisions relating to electrical safety and earthing

2.2 EN 50162*) Cathodic protections of buried or immersed metallic structures – General principles (Dealt by CEN/TC262/SC2/WG1)

2.3 IEC 60050(826) International Electrotechnical Vocabulary Chapter 826:Electrical installations of buildings

3. คำนิยามที่ใช้เป็นเป้าหมายและจุดประสงค์ของมาตรฐานนี้

3.1 กระแสรั่วไหล กระแสซึ่งไหลผ่านส่วนอื่นที่ไม่ใช่ส่วนที่เตรียมไว้

3.2 บริเวณกระแสรั่วไหล บริเวณที่ซึ่งกระแสมีการแลกเปลี่ยนเส้นทางการไหลระหว่างระบบแหล่งจ่ายขับเคลื่อนกระแสตรงกับโครงสร้างโลหะหรือดิน(บริเวณกระแสรั่วไหลสามารถขยายระยะทางได้มากกว่ากิโลเมตร)

3.3 การกัดกร่อน ปฏิกิริยาทางเคมีหรือไฟฟ้าเคมีของโลหะบริเวณสภาพแวดล้อม ผลที่ทำให้การก้าวสู่ความเสื่อมหรือการทำลาย(มาตรฐานนี้จะกล่าวถึงการเกิดการกัดกร่อนโดยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี)

3.4 การป้องกันโลหะจากการกัดกร่อนแบบแคโทดิก เป็นวิธีป้องกันโลหะจากการถูกกัดกร่อนโดยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงไหลจากภายนอกเข้าไปยังภายในผิวของโลหะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.4.1 ทิศทางการไหลของขั้วไฟฟ้า รูปแบบการไหลของกระแสรั่วไหลในส่วนการต่อระหว่างโครงสร้างที่ต้องการป้องกันและระบบขับเคลื่อนรวมถึงอุปกรณ์ทิศทางเดียวหรืออุปกรณ์เรียงกระแสหรืออุปกรณ์รีเลย์และอุปกรณ์หน้าสัมผัส

3.4.2 การบังคับการไหลของกระแส รูปแบบของการไหลซึ่งการต่อระหว่างโครงสร้างที่ต้องการป้องกันกับระบบขับเคลื่อนที่รวมถึงแหล่งจ่ายอิสระของกระแสตรง

3.4.3 การติดตั้งเน้นทิศทางกระแส อุปกรณ์เรียงกระแสหรือแหล่งจ่ายกระแสตรงอื่นๆที่จะป้องกันโครงสร้างในส่วนที่จำเป็นต้องป้องกันค่าความต่างศักดิ์

3.5 การป้องกันค่าความต่างศักดิ์โดยมากแล้วระดับค่าความต่างศักดิ์ของโครงสร้างโลหะจะมีค่าต่ำ กับการระบุตรงจุดขั้วอ้างอิงในสภาพแวดล้อมอิเล็กโตรไลติก ทำให้ค่าความต่างศักดิ์ลดลงในกรณีของผลการป้องกันแคโทดิกของโครงสร้าง

3.6 วงจรไหลกลับคือ ตัวนำทั้งหมดที่กำหนดให้เป็นส่วนสำหรับการไหลกลับของกระแสขับเคลื่อนและกระแสในสภาวะการลัดวงจร(ตัวนำในที่นี้คือ รางวิ่ง, รางตัวนำกระแสกลับ, ตัวนำกระแสกลับและสายตัวนำกระแสกลับ)

3.7 ระบบรางนำกระแสกลับ คือระบบรางวิ่งที่ทำอีกหน้าที่หนึ่งคือการเป็นตัวนำของวงจรนำกระแสกลับ

3.8 ตัวนำกระแสกลับ คือตัวนำที่วางตัวขนานไปกับรางและเชื่อมต่อกับรางวิ่งเป็นช่วงๆ

3.9 รางตัวนำกระแสกลับ คือรางตัวนำที่ใช้แทนรางวิ่งสำหรับการไหลกลับของกระแสขับเคลื่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.10 สายตัวนำนำกระแสกลับ คือตัวนำกระแสกลับที่มีฉนวนหุ้มเป็นส่วนของวงจรกระแสไหลกลับและต่อให้วงจรกระแสไหลกลับสู่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

3.11 ตัวนำแท่งกระแสไหลกลับ คือแท่งตัวนำในสถานีไฟฟ้าซึ่งต่อกับสายตัวนำนำกระแสกลับที่ขั้วต่อ

3.12 สถานีไฟฟ้าระบบขับเคลื่อนกระแสตรงคือ อุปกรณ์หลักที่ติดตั้งซึ่งเป็นส่วนที่จ่ายกระแสให้กับระบบตัวรถ มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและระดับแรงดันจากต้นทางการรับไฟจากผู้ผลิตไฟฟ้าสู่ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ตัวรถ

3.13 กระแสไหลกลับระบบขับเคลื่อน คือผลรวมของกระแสขับเคลื่อนที่ไหลกลับไปยังแหล่งจ่าย (แหล่งจ่ายอาจจะได้รับกระแสกลับด้วยการกำเนิดไฟฟ้าจากตัวรถไฟ)

3.14 การเชื่อมต่อราง คือการใช้ตัวนำต่อเพื่อให้มั่นใจว่ารางมีความต่อเนื่องถึงกันทางไฟฟ้า

3.15 ความเป็นฉนวนของรอยต่อราง คือลักษณะทางกลของการต่อรางตามแนวยาวที่มีการแยกกันและไม่ต่อเนื่องทางไฟฟ้า

3.16 การเชื่อมต่อรางสองข้างเข้าด้วยกัน คือความต่อเนื่องทางไฟฟ้าระหว่างรางเดี่ยวภายในรางวิ่งเดียวกัน

3.17 การเชื่อมต่อรางวิ่ง คือความต่อเนื่องทางไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งหนึ่งกับอีกรางวิ่งที่วางขนานกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.18 ดิน คือค่าความนำดินซึ่งค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ณ จุดต่างๆต้องมีค่าเป็นศูนย์ (IEC 50-826-04-01)

3.19 ขั้วต่อลงดิน คือส่วนของความนำหรือกลุ่มของความนำที่ต่อหน้าสัมผัสกับส่วนที่เตรียมไว้เพื่อการต่อถึงกันทางไฟฟ้าสู่ดิน

3.20 อุโมงค์ใต้ดิน คือความต่อเนื่องกันทางไฟฟ้าของแท่งโลหะต่อลงดินกับโครงสร้างโลหะเสริมแรงของคอนกรีตอุโมงค์ และสำหรับในกรณีโครงสร้างแบบอื่น เป็นการต่อเชื่อมให้เกิดความนำไฟฟ้าของโลหะที่เป็นส่วนของโครงสร้างอุโมงค์

3.21 โครงสร้างที่ต่อกับดิน คือการต่อเนื่องทางไฟฟ้าของแท่งโลหะต่อลงดินกับโครงสร้างโลหะเสริมแรงของคอนกรีตอุโมงค์และสำหรับในกรณีโครงสร้างแบบอื่นเป็นการเชื่อมให้เกิดความนำไฟฟ้าของโลหะที่เป็นส่วนโครงสร้างอุโมงค์ ตัวอย่างของโครงสร้างเสริมแรงระบบราง เช่น สะพาน ทางวิ่งยกระดับและโลหะเสริมแรงภายใต้รางวิ่ง

3.22 ค่าความต้านทานรางกับดิน คือค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดิน

3.22.1 สำหรับระบบขับเคลื่อนกระแสตรงในอุโมงค์ การวัดจะวัดที่ระว่างรางวิ่งกับอุโมงค์ใต้ดิน

3.22.2 ในมาตรฐานนี้ค่าคามต้านทานระหว่างรางกับดินจะอ้างอิงที่การติดตั้งรางเดี่ยว เว้นแต่จะมีการกำหนดในรายละเอียดที่ชัดเจนเป็นอย่างอื่น

3.23 ค่าความนำต่อหน่วยความยาว คือค่าส่วนกลับของความต้านทานที่วัดจากรางไปยังดินต่อหน่วยความยาว (ในมาตรฐานนี้ค่าความนำต่อหน่วยความยาวจะอ้างอิงที่การติดตั้งรางเดี่ยว เว้นแต่จะมีการกำหนดในรายละเอียดที่ชัดเจนเป็นอย่างอื่น)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.24 การเชื่อมต่อเพื่อค่าความต่างศักย์ที่เท่ากัน คือการต่อเนื่องกันทางไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆของตัวนำภายในและภายนอกเพื่อให้มีค่าความต่างศักย์ที่เท่ากัน (IEC 50-826-04-09)

3.25 ตัวนำการเชื่อมต่อเพื่อค่าความต่างศักดิ์เท่ากัน คือตัวนำที่ทำหน้าที่เพื่อความมั่นคงในการป้องกันการเชื่อมต่อเพื่อให้ได้ค่าความต่างศักย์ที่เท่ากัน (IEC 50-826-04-10)

3.26 ค่าความต่างศักดิ์ของราง คือแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อรางวิ่งทำหน้าที่เป็นส่วนนำพากระแสไหลกลับไปยังสถานีไฟฟ้า หรือในสภาวะเกิดการลัดวงจรระหว่างรางวิ่งสู่ดิน

3.27 ผลของแรงดันสัมผัส คือแรงดันที่เกิดขึ้นในสภาวะการเกิดความผิดพร่องที่ส่วนต่างๆพร้อมกับการสัมผัสส่วนนั้นในเวลาเดียวกัน (ระดับความรุนแรงของแรงดันสัมผัสต่อร่างกายจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของส่วนที่ร่างกายมนุษย์สัมผัสในขณะนั้น)

3.28 แรงดันที่สามารถเข้าถึงได้ คือค่าความต่างศักย์ของรางในระหว่างการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าซึ่งสามารถเชื่อมต่อไปยังมนุษย์ได้ด้วยความนำไฟฟ้าของส่วนร่างกายจากมือถึงเท่าสองข้างโดยการไหลผ่านลำตัวหรือจากมือด้านหนึ่งไปยังมืออีกด้านหนึ่ง (ระยะทาง 1 เมตรในแนวนอนที่สามารถสัมผัสส่วนต่างๆได้)

3.29 การสร้างแบบปิด คือพื้นที่ซึ่งอยู่ด้านบนสุดของรางวิ่งที่เป็นระดับเดียวกับพื้นผิว

3.30 การสร้างแบบเปิด พื้นที่ซึ่งรางวิ่งวางตัวอยู่เหนือพื้นผิว

3.31 หน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในระบบราง คือบุคคลหรือองค์กรที่เป็นเจ้าของหรือมีหน้าที่รับผิดชอบในส่วนการบริหารงานทั้งหมดที่เกี่ยวเนื่องกับโครงสร้างระบบรถไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.32 การพิจารณา คือกระบวนการการจำลองโดยการทดสอบและวิเคราะห์ระบบหนึ่งภายใต้การพิจารณาในทุกประเด็นที่กำหนดสำหรับระบบนั้นๆ

3.33 การทวนสอบ คือกระบวนการของการพิจารณากำหนดสำหรับความปลอดภัยในส่วนต่างๆที่มีผลต่อชีวิตนั่นคือผลลัพท์ของประเด็นเป้าหมาย และความต้องการของข้อกำหนด ตัวอย่าง การพัฒนามาตรฐานจากความต้องการตามข้อกำหนดในแต่ละขั้นตอนของเอกสารการออกแบบเบื้องต้นไปยังการออกแบบขั้นสุดท้าย (การทวนสอบอาจรวมถึงขั้นตอนการทดสอบ)

3.34 การต่อลงดิน คือขั้วต่อลงดินที่มีการต่อลงดินที่เหมาะสม

3.35 การต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนแบบเปิด คือการต่อเนื่องถึงกันของความนำไฟฟ้าต่อระบบไหลกลับของกระแส หรือระบบไหลกลับของกระแสไปยังดินโดยใช้อุปกรณ์จำกัดระดับแรงดัน หรือโดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นอุปกรณ์ที่จะทำการต่อชั่วคราวหรือถาวรถ้าระดับแรงดันเกินค่าที่กำหนด

4. ทั่วไป

4.1 ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ากระแสตรงอาจมีกระแสรั่วไหลซึ่งมีผลกระทบทางลบทั้งกับระบบรางของและในส่วนที่เกี่ยวข้องส่วนอื่น ในการกำหนดขอบเขตการศึกษาของปัญหาและการประเมินควรทำงานร่วมกันกับหน่วยงานที่มีผลกระทบ สำหรับผลที่ได้จากการกระทำนี้จะมีประโยชน์มากในส่วนของขั้นตอนการออกแบบการสร้างที่จะกำหนดขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับผลกระทบที่จะเกิดขึ้น หลากหลายที่มาของปัญหานำมาสู่การกำหนดและควบคุมผลของกระแสรั่วไหลซึ่งควรมีเป้าหมายในการให้เหตุผลและการทวนสอบตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ถ้าบางส่วนไม่มีการกำหนดไว้ถึงผลกระทบก็ให้ยึดความคิดเห็นจากการพิจารณาเพื่อที่จะนำไปสู่การสร้างกฏเกณฑ์ในการตรวจสอบต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.1.1 ความต่อเนื่องทั้งหมดของระบบรางวิ่งที่นำกระแสกลับควรได้รับการอนุมัติโดยหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในระบบราง

4.1.2 การเตรียมการป้องกันไฟฟ้ากระชากควรจัดให้มีลำดับที่เหนือกว่าการเตรียมการป้องกันผลของกระแสรั่วไหล ดูมาตรฐาน EN 50122-1

4.1.3 ผลกระทบส่วนใหญ่ของกระแสรั่วไหลสามารถเกิดขึ้นได้ดังนี้

ก. การกัดกร่อนและความเสียหายที่ตามมาของโครงสร้างโลหะบริเวณที่มีกระแสรั่วไหลไหลออกจากโครงสร้างโลหะนั้น

ข. ความเสี่ยงของการเกิดความร้อนเกิน การเกิดประกายไฟและเพลิงไหม้ ความอันตรายที่ตามมาต่ออุปกรณ์และบุคคลผู้ที่ไม่ใช่ผู้ปฏิบัติงานภายในพื้นที่ของหน่วยงานที่มีความรับผิดชอบในระบบราง

ค. ผลกระทบต่อระบบอาณัติสัญญาณและระบบสื่อสารที่ไม่มีระบบป้องกัน

ง. ผลกระทบต่อส่วนที่ไม่มีการติดตั้งระบบป้องกันแคโทดิค

จ. ผลกระทบต่อระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรงที่ไม่เกี่ยวข้องกับระบบขับเคลื่อน

4.2 ระบบที่อาจจะสร้างกระแสรั่วไหลขึ้นซึ่งควรนำมาพิจารณา

4.2.1 ระบบขับเคลื่อนแบบกระแสตรงที่ใช้รางวิ่งในการนำกระแสกลับไปยังสถานีไฟฟ้ารวมถึงรางในส่วนอื่นๆที่เชื่อมต่อกับรางของระบบขับเคลื่อนแบบกระแสตรง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.2.2 ระบบรถรางไฟฟ้าซึ่งใช้แหล่งจ่ายเหมือนกันกับระบบรถไฟฟ้าและใช้รางวิ่งเป็นส่วนที่นำกระแสกลับ

4.2.3 ระบบขับเคลื่อนกระแสตรงที่ไม่ได้ใช้รางวิ่งในการนำกระแสกลับไปยังสถานีไฟฟ้า

4.3 ระบบทั้งหมดที่อาจได้รับผลกระทบจากกระแสรั่วไหลที่ควรนำมาพิจารณาเช่น

4.3.1 งานระบบท่อ

4.3.2 สายเคเบิลที่มีส่วนป้องกันหรือโลหะห่อหุ้ม

4.3.3 ถังและท่อ

4.3.4 ระบบการต่อลงดิน

4.3.5 โครงสร้างคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมแรง

4.3.6 โครงสร้างโลหะฝังดิน

4.3.7 ส่วนที่ไม่มีการติดตั้งระบบป้องกันแคโทดิก

4.3.8 ระบบอาณัติสัญญาณและระบบสื่อสาร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. ระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน

5.1 ระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน วงจรการไหลกลับของกระแส และระบบการต่อลงดินควรพิจารณาศึกษา ในการประเมินค่าผลของกระแสรั่วไหล ควรรวมส่วนต่างๆดังนี้

5.1.1 ระยะทางระหว่างสถานีไฟฟ้า

5.1.2 การเชื่อมต่อของวงจรกระแสไหลกลับ

5.1.3 ความเป็นฉนวนของรางวิ่งและโครงสร้างอื่นที่ต่อกับดิน

5.1.4 การเตรียมการป้องกันเพิ่มเติม (ตามข้อ 6 และข้อ 7)

5.2 เมื่อมีความต้องการแรงดันที่ออกมาของสถานีไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายเดี่ยวควรทำการปรับค่ากระแสรั่วไหลให้มีขนาดต่ำสุด

5.3 ถ้ารถรางไฟฟ้าและรถรางรับไฟจากระบบขับเคลื่อนจากแหล่งเดียวกัน ส่วนหนึ่งในการสัมผัสอาจต่อกับระบบรางนำกระแสกลับหนึ่งจุดหรือหลายจุดที่ได้เตรียมไว้สำหรับการไหลของกระแส ในกรณีนี้ควรตรวจสอบเพื่อประเมินค่าการป้องกันสำหรับการที่จะลดผลกระทบจากการเกิดกระแสรั่วไหลอย่างเพียงพอ

5.4 แท่งตัวนำต่อกับเคเบิลที่กระแสไหลกลับในสถานีไฟฟ้าและส่วนที่คล้ายคลึงกันในการติดตั้งควรให้การทำงานมีการเป็นฉนวนที่ห่างจากดิน เมื่อมีความต้องการด้านความปลอดภัยจากอุปกรณ์จำกัดแรงดันต่อระหว่างเคเบิลนำกระแสไหลกลับกับดิน ควรเตรียมระบบให้เป็นไปตามหัวข้อ 7.2.6 สำหรับสถานีไฟฟ้าในศูนย์ซ่อมบำรุงและโรงซ่อม ดูหัวข้อ 7.4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.5 ตัวนำเคเบิลกระแสกลับควรมีเปลือกที่เป็นฉนวนด้านนอก ตัวนำกระแสไหลกลับและรางวิ่งที่รับกระแสกลับควรจะมีฉนวนที่แยกจากดิน (เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายกับสายนำกระแสกลับควรเพิ่มการป้องกันทางกล)

6. ระบบราง

6.1 ระบบรางวิ่ง

ในส่วนของการลดค่ากระแสรั่วไหลเนื่องจากระบบขับเคลื่อนกระแสตรง ผลส่วนใหญ่จากการเตรียมสิ่งเหล่านี้มีการเตรียมขอบเขตของระบบขับเคลื่อนกระแสไหลกลับแหล่งจ่ายด้วยโลหะของวงจรกระแสไหลกลับ การเตรียมการที่จะกำหนดการไหลกลับของกระแสสำหรับระบบการขับเคลื่อนเรียกว่ารางที่สี่หรือเมื่อรางวิ่งถูกใช้เป็นส่วนในการนำกระแสกลับโดยการทำให้ความต้านทานระหว่างรางวิ่งกับส่วนที่อยู่ต่อกับดินมีความต้านทานสูง การเพิ่มประสิทธิภาพอีกอย่างคือการลดค่าความต้านทานในแนวความยาวของวงจรกระแสไหลกลับ

ในส่วนของการกระจายกระแสสู่ดิน ความเป็นฉนวนที่มีค่าสูงระหว่างรางวิ่งกับดินจะมีความสำคัญมากในการควบคุมการไหลของกระแสสู่ดิน ที่มีผลต่อระบบเก่าจากโครงสร้างระบบรถไฟฟ้าระบบใหม่

6.1.1 ค่าความเป็นฉนวนของรางกับดิน

ก. ค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว

สำหรับพื้นที่ที่มีความเสี่ยงจากผลของการเกิดกระแสรั่วไหล ค่าความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่มีความเหมาะสมในการก่อสร้างที่สามารถควบคุมได้เมื่อการเดินรถให้ใช้ค่าที่กำหนดไว้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความนำที่แนะนำ สำหรับระบบรางเดี่ยว

ระบบรางรถไฟฟ้า ยกระดับ 0.5, ใต้ดิน 0.5

ระบบรางการสร้างระบบขนส่งมวลชนแบบเปิด ยกระดับ 0.5, ใต้ดิน 0.1

ระบบรางการสร้างระบบขนส่งมวลชนแบบปิด ยกระดับ 2.5, ใต้ดิน (-)

1) ค่าความนำเป็นค่าสำหรับรางที่มีสองรางต่อหนึ่งรางวิ่ง

2) ค่านี้นำไปใช้สำหรับระบบรถไฟและระบบขนส่งมวลชนในการก่อสร้างแบบเปิดและแบบปิดดังนี้

ก. การทำความสะอาด

ข. ใช้หมอนรองรางที่ทำด้วยไม้หรือคอนกรีตร่วมกับการใช้ระบบยึดเหนี่ยวรางแบบมีฉนวน

ค. จัดระยะที่เพียงพอระหว่างรางวิ่งและหินที่โรยรางรถไฟ

ง. ผลจากการระบายน้ำ

3) การเตรียมการปรับปรุงค่าให้ดีขึ้นสำหรับรูปแบบระบบปิดดังนี้

ก. มีการทำฉนวนของรางวิ่งโดยการใช้เรซิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข. สอดแทรกแผ่นฉนวนระหว่างรางกับโครงสร้างที่รองรับ

4) วิธีการวัดเพื่อให้ได้ตามที่กำหนดไว้ จะวัดตามข้อ 9

ก. ระดับของการข้ามกันของรางวิ่งที่ระดับการข้ามขวางเมื่อรางวิ่งวางตัวในแบบปิด ควรพิจารณาหลีกเลี่ยง การเพิ่มขึ้นของค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เพียงพอของรางวิ่งที่อยู่ใกล้กัน

ข. พื้นที่บริเวณหญ้า สำหรับรางวิ่งที่อยู่บนหญ้าต้องมีการเตรียมการที่จะทำการบำรุงรักษาค่าความเป็นฉนวน

ค. ระบบรางที่สี่ ในกรณีที่ตัวนำกระแสไหลกลับใช้รางที่สี่ รางวิ่งที่เป็นตัวนำทั้งสองรางต้องมีค่าความเป็นฉนวนที่ดีกับดิน

ง. การประเมินค่ากระแสรั่วไหลเมื่อประเมินค่ากระแสรั่วไหลแล้วพบว่ามีค่าสูง วิธีที่ควรใช้ที่จะยอมรับได้จะแสดงให้เห็นในข้อ 9

6.1.2 ความต้านทานวงจรกระแสไหลกลับ ความต้านทานตามแนวความยาวของรางนำกระแสไหลกลับควรมีค่าที่ต่ำ ดังนั้นการเชื่อมต่อราง ที่รอยต่อรางต้องมีค่าความต้านทานต่ำมาก และค่าความต้านทานโดยรวมของรางต้องไม่เพิ่มขึ้นเกิน 5%

ค่าความต้านทานตามแนวความยาวสามารถลดลงได้ด้วยวิธีดังนี้

ก. ใช้รางวิ่งที่มีประสิทธิภาพ

ข. เชื่อมต่อรางวิ่งเข้าด้วยกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค. เพิ่มสายเคเบิลต่อขนานไปกับรางวิ่ง

6.2 ส่วนอื่นๆของระบบราง

6.2.1 ส่วนที่ไม่ใช่วงจรไหลกลับของกระแสขับเคลื่อน ควรติดตั้งและต่อตรงด้วยความนำไฟฟ้า กับโครงสร้างซึ่งจะไม่มีการฉนวนกับดิน ถ้าการต่อวงจรกระแสไหลกลับไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ด้วยเหตุผลที่ต้องป้องกันผลจากการเกิดลัดวงจร อาจเตรียมการเพื่อลดผลที่เกิดจากกระแสรั่วไหล ด้วยตัวอย่างดังนี้

ก. ระบบการต่อลงดินแบบเปิด ในกรณีนี้อุปกรณ์จำกัดแรงดันควรสอดคล้องกับข้อกำหนดในหัวข้อที่ 7.2.6

ข. ความเป็นฉนวนของอุปกรณ์หรือส่วนประกอบที่ต่อกับรางวิ่งความสัมพันธ์กับฐานรากหรือส่วนประกอบที่เป็นดิน

ค. การเป็นฉนวนของโครงสร้างจากดิน

6.2.2 ค่าความเป็นฉนวนของรางวิ่งควรที่จะประสานกับส่วนอื่นที่ทำให้แน่ใจว่าส่วนที่สามารถเข้าถึงแรงดันได้ คือวงจรไหลกลับกระแสและแรงดันสัมผัสภายใต้สภาวะการเกิดความผิดพร่องของระบบไฟฟ้าไม่ควรเกินค่าที่ยอมรับได้ที่กำหนดไว้ใน EN 50122-1

6.2.3 การติดตั้งทางไฟฟ้าที่คงที่หรือเคลื่อนที่ได้และอุปกรณ์ที่ต่อกับวงจรไหลกลับของกระแสไม่ควรรับการจ่ายไฟฟ้าแรงต่ำโดยตรงจากโครงข่ายสาธารณะที่มีระบบการต่อลงดินแบบ TN (วิธีการดู EN 50122-1, 6.2.4.3)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.2.4 รางของรางวิ่งระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงไม่ควรที่จะต่อไปยังส่วนความนำของระบบรางอื่นโดยตรง(รางของระบบรางอื่นๆถ้ามีความจำเป็นในกรณีพิเศษสามารถต่อกับรางนำกระแสกลับได้หากแต่ต้องทำตามข้อกำหนดของความต้องการในข้อ 6.1 อย่างครบถ้วน)

อย่างไรก็ตามในความสอดคล้องกันในระบบขับเคลื่อนแบบกระแสตรงและแบบกระแสสลับ ควรมีการเตรียมการโดยเพิ่มเติมวิธีการลดค่ากระแสลัดวงจรจากรางวิ่งหลัก ซึ่งเป็นส่วนวงจรกระแสไหลกลับของทั้งสองระบบ

ในการเพิ่มเติมระบบจะต้องไม่มีผลกระทบกับมาตรฐานความปลอดภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อจำกัดการเข้าถึงของแรงดันไฟฟ้า และการป้องกันระบบการจ่ายไฟ ระบบวงจรราง และระบบการสื่อสาร

6.2.5 การเชื่อมต่อรางถึงรางในด้านขนาน การเชื่อมต่อรางวิ่งถึงรางวิ่งและการเชื่อมต่ออื่นๆ ซึ่งอาจทำให้มีส่วนหนึ่งส่วนใดที่ไปต่อกับดิน แบบนี้จะไม่สามารถทำได้

6.2.6 บริเวณที่มีระบบขับเคลื่อนกระแสตรงพุ่งเข้าไปยังท่อหรือสายที่ฝังดิน ควรตรวจสอบให้มีการรักษาระยะความห่างไว้ที่ระบบสามารถทำงานได้เพื่อหลีกเลี่ยงกระแสรั่วไหล (ระยะทางน้อยที่สุดคือ 1 เมตรที่เพียงพอสำหรับจุดประสงค์นี้)

7. ผลกระทบต่อโครงสร้าง

7.1 โดยทั่วไป

ค่าความต้านทานระหว่างตัวนำโครงสร้างที่ไม่มีความเป็นฉนวนจากดินกับระบบรางกระแสไหลกลับควรมีค่าสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการต่อตรงจะไม่อนุญาตให้ต่อยกเว้นในกรณีของศูนย์ซ่อมบำรุงและโรงซ่อมรถ (ดูหัวข้อ 7.4)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7.2 โครงสร้างอุโมงค์

7.2.1 ภายในโครงสร้างอุโมงค์ที่ซึ่งมีการรวมกันของตัวนำเหล็กเสริมแรง ส่วนประกอบของความนำไฟฟ้าที่มีความจำเป็นต้องเตรียมการป้องกันและจำกัดผลที่เกิดจากกระแสรั่วไหล ความต้องการสำหรับการป้องกันการเกิดกระแสลัดวงจรเป็นอีกส่วนที่ควรนำมาพิจารณา(การเตรียมการป้องกันและการลดค่าผลกระทบที่เกิดจากกระแสรั่วไหลในโครงสร้างอุโมงค์ขึ้นอยู่กับสิ่งดังนี้)

ก. ไม่ว่าอย่างไรก็ตามจะเป็นแหล่งจ่ายที่ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลภายในอุโมงค์หรือภายนอกอุโมงค์มากกว่า

ข. ไม่ว่าอย่างไรก็ตามจุดมุ่งหมายหลักคือการป้องกันโครงสร้างโลหะที่อยู่ภายในอุโมงค์หรือป้องกันโครงสร้างโลหะภายนอกของอุโมงค์และระบบราง

7.2.2 ที่ส่วนท้ายของอุโมงค์เมื่อมีรางออกสู่ภายนอกส่วนภายใต้รองรางปิ้นแบบปิดและเมื่อส่วนนี้ไม่ได้เป็นฉนวนกับดินส่วนเหล่านี้ควรที่จะติดตั้งฉนวนรอยต่อรางในแต่ละรางวิ่ง ฉนวนรางวิ่งจะทำหน้าที่ลดกระแสรั่วไหลภายในอุโมงค์ ในกรณีนี้มีความจำเป็นในการแยกแหล่งจ่ายในอุโมงค์รางวิ่งและตัวนำจ่ายกระแสเหนือศีรษะของอุโมงค์ควรแยกการจ่ายไฟฟ้าออกจากด้านนอก

7.2.3 ในกรณีของอุโมงค์กับเหล็กเสริมโครงสร้างคอนกรีตหรือโครงสร้างที่มีความนำไฟฟ้าอื่นๆที่มีความเป็นไปได้ที่กระแสรั่วไหลจะไหลผ่านเข้าไปยังโครงสร้างและส่งผลกระทบสู่โครงสร้างอื่นภายนอกอุโมงค์ ในกรณีนี้ผลของกระแสรั่วไหลควรลดลงได้โดยการประสานศักย์ให้เท่ากันในส่วนอุโมงค์ สำหรับวัตถุประสงค์ดังนี้จำนวนของเหล็กเสริมและการต่อถึงกันของตารางและโลหะเข้าด้วยกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ก. การวัดค่ากระแสรั่วไหลโดยตรงจะใช้งานไม่ได้ ค่าความต่างศักดิ์ของโครงสร้างที่ป้องกันจากดินนำมาใช้ประเมินค่าได้ ประสบการณ์แสดงให้เห็นถึงเหตุผลในส่วนที่เกี่ยวข้อง ค่าเฉลี่ยของระดับความต่างศักย์ในชั่วโมงการจราจรเร่งด่วนค่าต้องไม่เกิน 100 มิลลิโวลท์

ข. การที่จะไม่ยอมรับผลที่เกิดจากกระแสรั่วไหลในโครงสร้างอุโมงค์และโครงสร้างด้านนอกของอุโมงค์ แรงดันตามแนวความยาวระหว่างจุดสองจุดของโครงสร้างอุโมงค์ควรทำการคำนวณ ขั้นตอนนี้ต้องมีความระมัดระวังเพื่อให้แน่ใจว่าค่าที่ได้เป็นค่าจริงที่จะทำให้ค่าความต่างศักย์ดินลดลง

ค. ในแต่ละส่วนของอุโมงค์โดยบางกรณีที่อาจยกเว้นการเชื่อมต่อค่าความต่างศักย์จากส่วนของอุโมงค์ การทำให้ค่าความต่างศักดิ์เท่ากันโดยการเชื่อมต่อส่วนอื่นๆของอุโมงค์อาจสมบูรณ์ได้จากการใช้สายเคเบิลที่มีฉนวนเพื่อแยกออกแต่ละอุโมงค์

ง. สำหรับวัตถุประสงค์ของกระแสรั่วไหลเท่านั้น เหล็กเสริมโครงสร้างช่วยในเรื่องนี้ได้ตามแบบธรรมดา

7.2.4 ในพื้นที่ที่มีผลกระทบของกระแสรั่วไหลต่อโครงสร้างด้านนอกอุโมงค์จะไม่สำคัญและเมื่อค่าความต้านทานรางกับดินมีค่าสูงเพียงพอกระแสรั่วไหลก็จะไม่เกิดขึ้นควรพิจารณาถึงการกัดกร่อนของโครงสร้างโลหะเป็นสำคัญ คอนกรีตเสริมแรงของโครงสร้างอุโมงค์ควรแบ่งออกในตามแนวความยาวด้วยรอยต่อฉนวนในกรณีที่กระแสรั่วไหลจากแหล่งอื่นที่ติดกันสามารถไหลตามโครงสร้างของอุโมงค์ ดังนั้นเป็นเหตุที่ไม่ต้องการให้มีการเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ที่แตกต่างกัน

ก. ถ้าความต้านทานระหว่างโครงสร้างเหล่านี้กับดินค่อนข้างสูง ตัวอย่างเช่นอุโมงค์หิน โครงสร้างอุโมงค์คอนกรีตเสริมแรงอาจแบ่งออกตามแนวยาวโดยรอยต่อฉนวน วงแหวนที่อยู่ระหว่างในแต่ละส่วนของหลักต่อสายควรมีเตรียมไว้เพื่อจุดประสงค์การ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตรวจสอบ ความน่าเชื่อถือทางไฟฟ้าในการต่อควรกระทำระหว่างหลักต่อสายเหล่านี้กับเหล็กโครงสร้างตามแนวความยาว

ข. ปกติแล้ว ไม่มีการต่อระหว่างหลักต่อสายในส่วนที่อยู่ติดกัน

7.2.5 การเสริมแรงของคอนกรีตเสริมแรงอุโมงค์และส่วนประกอบอุโมงค์ในวัสดุประเภทเหล็กควรจะไม่มีการต่อท่อกับสายตัวนำด้านนอกของอุโมงค์หรือวงจรกระแสไหลกลับหรือระบบที่อยู่ติดกันที่ซึ่งไม่มีการฉนวนกับดิน

7.2.6 ถ้าอุปกรณ์จำกัดแรงดันระหว่างวงจรกระแสไหลกลับและส่วนประกอบของโครงสร้างอุโมงค์ได้ถูกเตรียมไว้เพื่อการป้องกันขัดขวางแรงดันที่ไม่ยอมรับตามมาตรฐาน EN 50122-1 เงื่อนไขดังกล่าวเป็นส่วนที่ทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือ

ก. ถ้าอุปกรณ์จำกัดแรงดันทำงาน ควรทำการคืนสภาวะหลังจากถึงค่าสูงสุดแล้วเวลาต่อเนื่อง 10 วินาทีหรือถ้าไม่สามารถคืนสภาพได้ ควรมีขั้นตอนการแก้ไขเหตุการณ์ให้ถูกต้องอย่างรวดเร็ว

ข. อุปกรณ์จำกัดแรงดันควรออกแบบให้ทำงานได้ภายใต้สภาวะที่มีความผิดพร่องของกระแสไฟฟ้าที่สูง ปิดวงจรครั้งเดียวแล้วไม่เปิดวงจรจนกระทั่งกระแสลดลงจนมีค่าที่ปลอดภัย (ระดับค่าน้อยกว่าอัตราการทำงานสวิตช์ของอุปกรณ์)

7.2.7 ในโครงสร้างอุโมงค์ที่มีค่าความนำไฟฟ้าติดกับสิ่งปลูกสร้างอาคาร เช่น สถานีรถไฟฟ้า ร้านค้า ควรพิจารณาสังเกตุการณ์ค่าความต่างศักดิ์ของระบบรางนำกระแสกลับของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อตรวจพบค่าความนำระหว่างวงจรกระแสไหลกลับกับโครงสร้างมีค่าความต้านทานต่ำต้องตรวจจับได้ ส่วนการเชื่อมต่อควรแยกออกโดยทันที

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7.3 สะพาน โครงสร้างทางวิ่งและโครงสร้างเสริมแรงรองราง

สำหรับโครงสร้างแบบนี้ให้ใช้หลักการเดียวกับโครงสร้างอุโมงค์

7.4 ศูนย์ซ่อมบำรุงและโรงซ่อมรถไฟฟ้า

ถ้ามีการคลาดเคลื่อนจากข้อกำหนดทั่วไปจากหัวข้อ 7.1 การต่อโดยตรงระหว่างตัวนำโครงสร้างและวงจรไหลกลับของกระแสที่ลงตัว ให้เตรียมดังนี้

รางวิ่งของรถไฟฟ้าในศูนย์ซ่อมบำรุงหรือโรงซ่อมรถไฟฟ้าควรที่จะแยกจากรางวิ่งหลักโดยใช้ฉนวนการต่อรางและกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนควรแยกการจ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากกัน

7.5 สายตัวนำ ระบบท่อและแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอก

ที่บริเวณทางเข้าของคอนกรีตเสริมแรงหรือโครงสร้างเหล็กรถไฟฟ้า เช่นทางวิ่งศูนย์ซ่อมบำรุงและโรงซ่อมรถไฟฟ้า ระบบท่อโลหะทั้งหมด ท่อไฮดรอลิก เปลือกสายตัวนำกำลังไฟฟ้าแหล่งอื่นหรือระบบสายสื่อสาร และการต่อลงดินที่เข้ามาจากด้านนอกควรแยกไฟฟ้าออกจากโครงสร้างหลีกเลี่ยงจากการต่อความนำระหว่างโครงสร้างดินและหลักต่อลงดินภายนอกระบบท่อโลหะด้านในอุโมงค์ไม่ควรต่อข้ามผ่านฉนวนรอยต่อวงแหวน

ก. ส่วนนี้อาจจะสมบูรณ์โดย

1) การติดตั้งส่วนฉนวนในท่อหรือฉนวนจากโครงสร้างดินความเป็นฉนวนสมบูรณ์จากโครงสร้างดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2) การติดตั้งหม้อแปลงด้วยขดลวดแยกหรือใช้ระบบการต่อลงดินแบบ TT หรือ IT ตามมาตรฐาน EN 50122-1

ข. เมื่อมีความจำเป็นสำหรับเหตุผลของความปลอดภัย ทุกๆส่วนของท่อโลหะอาจต่อไปยังโครงสร้างโลหะ

8. วิธีการป้องกันที่นำไปใช้กับโครงสร้างโลหะ

มาตรฐานนี้ได้เตรียมการไว้เพื่อลดค่ากระแสรั่วไหลและผลจากการกัดกร่อน วิธีการป้องกันแบบเก่าป้องกันการกัดกร่อนตามธรรมชาติพิจารณาตามความจำเป็น ถ้ามีการเพิ่มวิธีการป้องกันหลักการการป้องกันโดยรวมทั้งหมดควรยอมรับตามมาตรฐานที่เกี่ยวกับการป้องกัน

ตัวอย่างวิธีการป้องกันโครงสร้างเป็นไปตามข้อ 10

ระบบการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ไม่มีขั้วไม่ควรต่อตรงไปยังระบบขับเคลื่อน

9. การวัดค่าความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาวรางรางวิ่ง

9.1 ทั่วไป

การวัดค่าความต้านทานของรางมีความจำเป็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรางและผลของแรงดันสำหรับผลของการคำนวณที่ตามมาของความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาว

การวัดกระแสตรงต้องวัดเป็นช่วงๆคือการโยกสวิตช์เปิดและปิดในส่วนการตรวจสอบผลอื่นๆระหว่างช่วงการปิดสวิตช์ ผลของแรงดันเรียกว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\Delta U = U_{\text{on}} - U_{\text{off}} \tag{1}$$

การเปลี่ยนแปลงของการอ่านค่าควรใช้เครื่องวัดหลายเครื่อง ที่สำคัญของผลที่แตกต่างจากการเปลี่ยนขั้วของวงจรการวัดจึงควรพิจารณาตรวจสอบ

วิธีนี้ใช้ได้เฉพาะการวัดที่ไม่มีกระแสระบบขับเคลื่อนขณะทำการวัด ที่ไม่สามารถทำได้จริง การวัดควรทำในเวลาเดียวกันในแบบที่จะขจัดผลของกระแสอื่นๆในการวัดกระแส

จุดในการวัดที่รางวิ่งควรห่างจากจุดปล่อยกระแสอย่างน้อย 1 เมตร

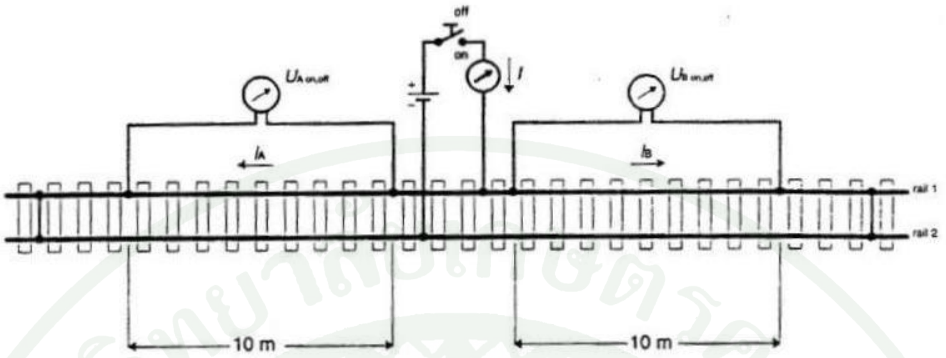
9.2 การวัดค่าความต้านทานของรางวิ่ง

สำหรับการวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งวิธีการแนะนำตามภาพที่ 16

แรงดันตกคร่อมตามแนวความยาว U_{A} และ U_{B} คือการวัดแต่ละส่วนของสองส่วนที่อยู่ติดกันของราง ค่าความต้านทานของรางที่ 1 และรางที่ 2 จะได้จากการคำนวณตามสมการที่ (2)

การตั้งสมมุติฐานในการวัดคือไม่มีการต่อเชื่อมรางถึงรางและรางวิ่งถึงรางวิ่งในช่วงของพื้นที่การวัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 16 การวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งสำหรับรางวิ่งความยาว 10 เมตร

ที่มา: European Committee for Electrotechnical Standardisation (1998)

$$R_{\mathrm{R10m}} = \frac{(U_{\mathrm{A\,on}} - U_{\mathrm{A\,off}}) + (U_{\mathrm{Bon}} - U_{\mathrm{Boff}})}{I} \tag{2}$$

R_{R10m} คือ ค่าความต้านทานตามแนวความยาวของรางที่มีความยาว 10 เมตรของรางที่ 1 ในหน่วยโอห์ม และรางที่ 2 เหมือนกัน

I คือ กระแสที่จ่ายให้ราง หน่วยแอมแปร์

$U_{\mathrm{on,off}}$ คือ แรงดันตกคร่อมในรางที่ 1 ในหน่วยโวลต์ และไม่มีการจ่ายกระแส และรางที่ 2 เหมือนกัน

9.3 การคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาวสำหรับรางวิ่งยาว 10 เมตร

การจัดเรียงการวัดแบบพิเศษและลำดับการวัดอนุญาตให้การวัดค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวโดยไม่ต้องการฉนวนรอยต่อ ค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว G'_{RT} ต้องทำการวัดตามภาพที่ 11 วิธีเดียวกันนี้สามารถนำไปใช้กับทางวิ่งและโครงสร้างเสริมแรงรองรับราง

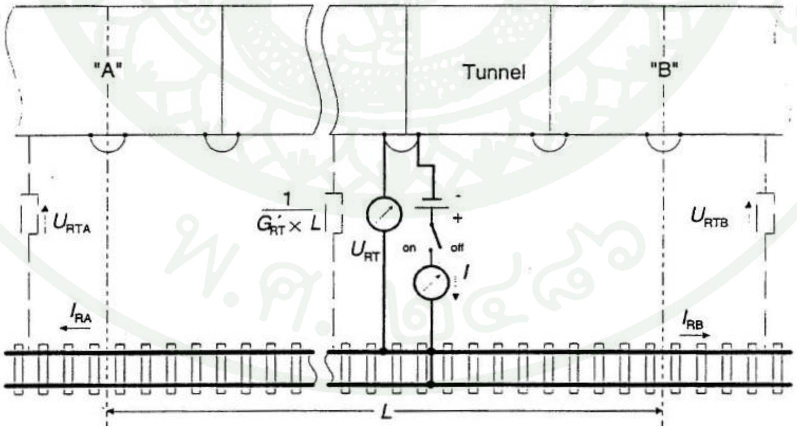
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวัดค่ากระแสตรง I จ่ายกระแสระหว่างรางวิ่งและโครงสร้างเป็นไปตามกำหนดเวลาที่สวิตช์เปิดและปิด ค่าที่มีความจำเป็นต้องพิจารณา G'_{RT} ในสมการที่ 3 จะทำการวัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่ากระแส I_{RA} และกระแส I_{RB} สามารถเพิ่มขึ้นในการบรรยายตามขั้นตอนในสมการที่ 3 และแสดงให้เห็นในภาพที่ 17

ควรมั่นใจว่าไม่มีผลกระทบจากการต่อและไม่ทำให้อุปกรณ์จำกัดแรงดันระหว่างรางวิ่งและโครงสร้างอุโมงค์เกิดผลกระทบจากการวัด

ฉนวนรอยต่อรางควรแยกรางในอากาศ ซึ่งอาจติดกับส่วนของอุโมงค์ในส่วนนี้ไม่รวมกับผลที่มาจากภายนอก

จากประสบการณ์ในทางปฏิบัติแสดงให้เห็นถึงความยาวของ L ในส่วนของการวัดไม่ควรเกิน 4 กิโลเมตร



ภาพที่ 17 การจัดเรียงการวัดค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว G'_{RT} ระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์

ที่มา: European Committee for Electrotechnical Standardisation (1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$G'_{\mathrm{RT}} = \frac{3}{L} \times \frac{I - I_{\mathrm{RA}} - I_{\mathrm{RB}}}{\Delta U_{\mathrm{RT}} + \Delta U_{\mathrm{RTA}} + \Delta U_{\mathrm{RTB}}} \qquad \Delta U = U_{\mathrm{on}} - U_{\mathrm{off}} \tag{3}$$

G'_{RT} คือ ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์ หน่วยซิเมนส์ต่อกิโลเมตร

I คือ กระแสที่จ่ายเข้าไป หน่วยแอมแปร์

$I_{\mathrm{RA}}, I_{\mathrm{RB}}$ คือ กระแสที่ไหลออกไปไกลที่จุดสุดท้ายที่จุดAและBของส่วนของการวัด หน่วยแอมแปร์

U_{RT} คือ แรงดันระหว่างรางกับอุโมงค์ที่จุดจ่ายกระแส หน่วยโวลต์

$U_{\mathrm{RTA}}, U_{\mathrm{RTB}}$ คือ แรงดันระหว่างรางกับอุโมงค์ที่จุสุดท้ายที่จุดAและBของส่วนของอุโมงค์ หน่วยโวลต์

L คือ ค่าความยาวของส่วนที่ทำการวัด หน่วยกิโลเมตร

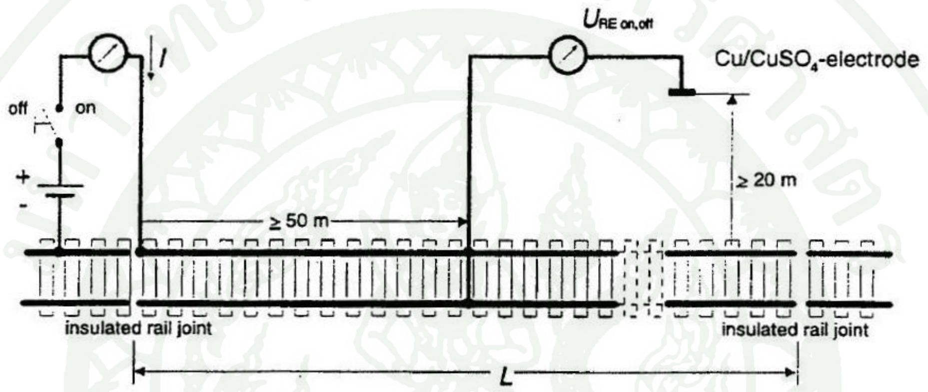
9.4 การพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวสำหรับส่วนของรางในอากาศ

ส่วนของรางที่พิจารณาโดยแยกจากความต่อเนื่องของรางด้วยฉนวนตัวนำราง ส่วนของความยาวในการพิจารณาไม่ควรเกิน 2 กิโลเมตร

ค่าความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาวของรางที่แยกกันตามวิธีการวัดที่แสดงในภาพที่ 18 วัดกระแสตรงที่จ่ายเข้าไปยังรางทั้งคู่ของฉนวนกั้นรางตามแนวยาว กระแสควรเป็นไปตามกำหนดเวลาที่สวิตช์เปิดและปิด กระแสที่ทำการจ่ายเข้าไปไหลผ่านรางในส่วนที่ทำการสุ่มตัวอย่างไปยังดินและจากดินไปยังรางของการต่อส่วนของราง แรงดันระหว่างรางกับดิน U_{RE} และ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระแสที่จ่ายที่แน่นอนสำหรับการคำนวณของค่าความนำต่อหน่วยความยาว แรงดันควรทำการวัดแบบไม่กำหนดขั้ว ทองแดง/ทองแดง ซัลเฟต เป็นขั้ว ($Cu/CuSO_4$-electrode) เป็นขั้วดิน ขั้วดินนี้ถูกวางไว้ในส่วนของรางที่ทำการวัดอย่างน้อย 50 เมตรห่างจากจุดจ่ายกระแส (จุดฉนวนกั้นราง) และอย่างน้อย 20 เมตรจากราง



ภาพที่ 18 การหาค่าความนำต่อหน่วยความยาว G'_{RE} สำหรับส่วนของรางแบบในอากาศ

ที่มา: European Committee for Electrotechnical Standardisation (1998)

$$G'_{\mathrm{RE}} = \frac{1}{L} \times \frac{I}{U_{\mathrm{REon}} - U_{\mathrm{REoff}}} \tag{4}$$

G'_{RE} คือ ค่าความนำต่อหน่วยความยาวระหว่างรางกับดิน หน่วยซิเมนส์ต่อกิโลเมตร (จากข้อ 6.1.1 มาตรฐานกำหนดค่า 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร)

I คือ กระแสที่จ่ายเข้าไป หน่วยแอมแปร์

U_{RE} คือ แรงดันระหว่างรางกับดิน หน่วยโวลต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

L คือ ค่าความยาวของส่วนที่ทำการวัด หน่วยกิโลเมตร

10. ตัวอย่างสำหรับวิธีการป้องกันโครงสร้างโลหะ

10.1 ทั่วไป

ส่วนนี้เตรียมวิธีการป้องกัน อ้างอิงจากมาตรฐาน EN 50162

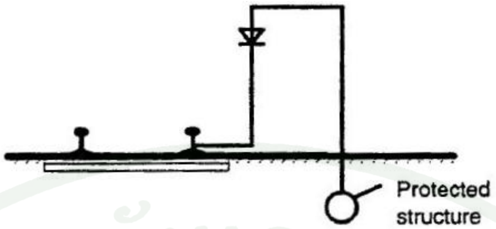
10.2 ขั้วการระบายไฟฟ้า

ถ้าตำแหน่งของโครงสร้างอนุญาต ขั้วของรางวิ่งอย่างเพียงพอและความต่อเนื่องของขั้วลบ ที่เป็นไปได้ที่จะนำกระแสรั่วไหลกลับไปยังส่วนวงจรที่เตรียมไว้ (ระบบรางไหลกลับของกระแส) ขั้วระบายไฟฟ้ารับจากไดโอดหรือรีเลย์ ซึ่งปล่อยกระแสให้ผ่านไปทิศทางเดียวเท่านั้น ตังอย่างจากภาพที่ 19

การระบายสามารถเตรียมอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้นหรือแรงดันที่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน ที่สามารถปรับค่าได้ในส่วนการจำกัดความหนาแน่นของกระแสที่แหล่งกำเนิดของผลกระทบ

การต่อของโครงสร้างใดๆ ไปยังแท่งตัวนำกระแสกลับในสถานีไฟฟ้าระยะไกลขั้วจะเป็นตัวเพิ่มกระแสรั่วไหล ดังนั้นการต่อความนำที่โครงสร้างใดๆ ไปยังแท่งตัวนำกระแสไหลกลับควรทำตามข้อกำหนดที่ให้ไว้เพราะอาจมีผลต่อโครงสร้างโลหะที่อยู่รอบข้าง นี่คือส่วนทั่วๆ ไปที่ป้องกันจากโครงสร้างอื่นๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

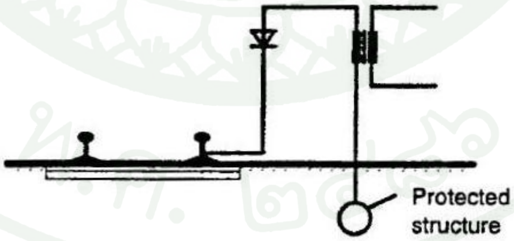


ภาพที่ 19 ขั้วการระบายไฟฟ้า

ที่มา: European Committee for Electrotechnical Standardisation (1998)

10.3 ความดันระบายกระแส

บางอย่างเป็นกรณีพิเศษมากที่จะเป็นไปได้ในการใช้วิธีการระบายกระแส นี่จะเป็นระบบกระแสที่ยึดถือไว้เป็นหลัก เมื่อรางวิ่งเป็นขั้วบวก การใช้วิธีนี้ต้องการการจำกัดของการระบายกระแส โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่หนาแน่นของกระแส ตัวอย่างแสดงให้เห็นในภาพที่ 20



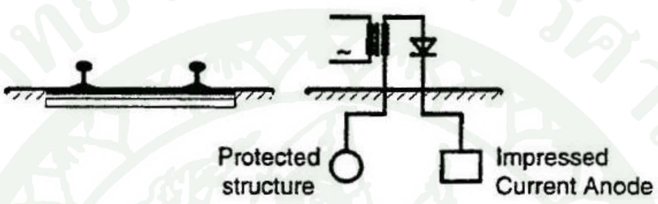
ภาพที่ 20 แรงการระบายกระแส

ที่มา: European Committee for Electrotechnical Standardisation (1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

10.4 การใช้ระบบกระแสป้องกันแบบแคโทดิก

ระบบที่ซึ่งเน้นกระแสที่ไหลจากกระแสขั้วบวกไปยังโครงสร้างที่ต้องการป้องกันด้วยดิน ตัวอย่างแสดงให้เห็นในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การใช้ระบบกระแสป้องกันแบบแคโทดิก

ที่มา: European Committee for Electrotechnical Standardisation (1998)

11. ประมาณการของแรงดันตามแนวความยาวในคอนกรีตเสริมแรงโครงสร้างระบบรางรถไฟฟ้า

11.1 แรงดันตกคร่อมตามแนวความยาวในเหล็กเสริมโครงสร้างของอุโมงค์ ทางวิ่งและเหล็กเสริมรองรับรางสามารถใช้สำหรับประเมินผลค่าที่เกิดจากกระแสรั่วไหล

11.2 ถ้าแรงดันที่ตกคร่อมตามแนวความยาวน้อยกว่า 0.1 โวลต์ จะเป็นไปตามหัวข้อที่ 7.2.3

11.3 แรงดันที่ตกคร่อมในโครงสร้างของระบบรางเมื่อมีการขับเคลื่อนขึ้นอยู่กับค่าต่างๆดังนี้

ก. ความยาวของส่วนที่พิจารณา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข. ความยาวของส่วนที่อยู่ติดกับส่วนที่พิจารณา

ค. ค่าความนำต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งและโครงสร้าง

ง. ค่าความนำต่อหน่วยความยาวระหว่างโครงสร้างกับดิน

จ. ค่าความต้านทานตามแนวความยาวของรางวิ่ง

ฉ. ค่าความต้านทานตามแนวความยาวของตัวนำที่ต่อโครงสร้าง

ช. วงจรกระแสไหลกลับของส่วนที่พิจารณาเส้นทาง

ซ. วงจรกระแสไหลกลับของส่วนที่ติดกับรางเส้นทาง

สำหรับการคำนวณของแรงดันตกคร่อมตามแนวความยาว U_{T} ของตัวนำต่อระหว่างโครงสร้างสำหรับหนึ่งส่วนของเส้นทางด้วยสมการที่ 5

วิธีการคำนวณในสมการที่ 5 ต้องใช้ความระมัดระวัง สูตรคำนวณจะสมมุติฐานว่ามีค่าอนันต์ตามแนวความยาวของอุโมงค์ในแต่ละส่วนที่สนใจพิจารณา นอกจากนี้จะไม่ลดผลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถไฟในส่วนที่อยู่ติดกันและค่าความนำต่อหน่วยความยาวของโครงสร้างอุโมงค์กับดิน ค่าจากการคำนวณอาจมีค่าสูงมากกว่าความจริงได้

ถ้าผลจากการคำนวณมีค่าสูงกว่า 0.1 โวลต์ วิธีในการคำนวณควรใช้

$$U_{\mathrm{T}} = 0.5 \times I \times L \times \frac{R'_{\mathrm{R}} \times R'_{\mathrm{T}}}{(R'_{\mathrm{R}} + R'_{\mathrm{T}})} \times \left(1 - \frac{L_{\mathrm{C}}}{L} \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_{\mathrm{C}}}\right)}\right)\right) \quad (5)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$L_{\mathrm{C}} = 1/\sqrt{(R'_{\mathrm{R}} + R'_{\mathrm{T}}) \times (G'_{\mathrm{RT}})} \quad (6)$$

U_{T} คือ ค่าแรงดันตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรงระบบราง หน่วยโวลต์

G'_{RT} คือ ค่าความนำต่อหน่วยความยาว หน่วยซิเมนส์ต่อกิโลเมตร

I คือ ค่าเฉลี่ยของวงจรรางกระแสไหลกลับของส่วนที่พิจารณาสนใจในช่วงเวลาที่มีโหลดสูงสุด หน่วยแอมแปร์

L คือ ค่าความยาวที่สนใจพิจารณาของเส้นทาง หน่วยกิโลเมตร

L_{C} คือ คุณลักษณะความยาวของระบบรางวิ่งโครงสร้าง หน่วยกิโลเมตร

R'_{R} คือ ค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาว หน่วยโอห์มต่อกิโลเมตร

R'_{T} คือ ค่าความต้านทานของตัวนำต่อระหว่างโครงสร้างต่อหน่วยความยาว หน่วยโอห์มต่อกิโลเมตร

6. การควบคุมกระแสรั่วไหลโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล

1. บทสรุป

รถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลใช้แรงดันสำหรับขับเคลื่อนกระแสตรง 750V โดยผ่านรางที่สาม การศึกษาการเกิดกระแสรั่วไหลใช้วิธีการคำนวณ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษามุ่งประเด็นไปที่ earthing and bonding สำหรับรถไฟ 6 คันต่อหนึ่งขบวน โดยจำลองช่วงการทำงานที่ขณะสูงสุดตามมาตรฐาน EN 50122-2 เรื่องกระแสรั่วไหลจะไม่ต้องเป็นที่กังวล ถ้าแรงดันโครงสร้าง (structure potential) ในช่วงทำงานสูงสุดไม่เกิด +100 มิลลิโวลต์

กับดักกระแสรั่วไหล (stray current collection mat) จะอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดกระแสรั่วไหล ในส่วนนี้จะไม่คำนึงถึงการเกิดกระแสรั่วไหลที่เกิดกับโครงสร้างที่อยู่รอบข้างถ้ากระแสรั่วไหลไม่เกิน 100 มิลลิโวลต์

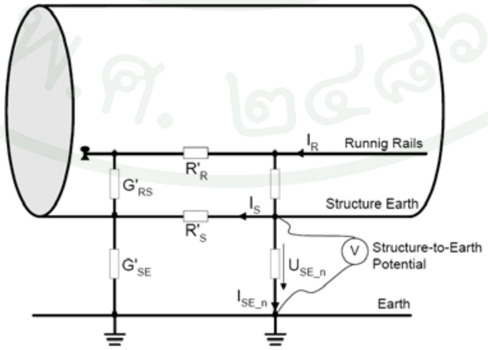
ด้วยพื้นที่หน้าตัด 1600 ตารางมิลลิเมตรต่อรางของกับดักกระแสรั่วไหล

สายเคเบิ้ลทองแดงต่อเชื่อมกับดักกระแสรั่วไหลที่มีพื้นที่หน้าตัด 120 ตารางมิลลิเมตร

ค่าความนำจากรางไปยังโครงสร้าง (rail to structure conductance) 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร

ค่าความนำจากโครงสร้างไปยังดิน (structure to earth conductance) 10 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร

ค่าแรงดันของโครงสร้างมีค่า 80 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดไว้



ภาพที่ 22 แบบจำลองวงจรไหลกลับและโครงสร้าง

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ส่วนต่างๆที่เข้าไปในโครงสร้างอุโมงค์ ซึ่งได้ต่อขนานกับกับดักกระแสรั่วไหลและสายดิน (earth wire) เพื่อลดค่าแรงดันโครงสร้างและผลพวงจากความเสี่ยงของกระแสรั่วไหลการกัดกร่อน ดังนั้นแนะนำให้เชื่อมต่อเข้าด้วยกันระหว่างกับดักกระแสรั่วไหลและเหล็กชั้นบนของเหล็กเสริมแรงที่เตรียมไว้ในชั้นพื้นของสถานีรวมถึงในส่วนของการสร้างแบบเปิดหน้าดินในช่วงสถานี

การแยกกันของระบบกับดักกระแสรั่วไหลกับระบบการต่อลงดินนำไปสู่การเกิดค่าแรงดันโครงสร้างที่สูงขึ้น และสิ่งที่ตามมาคือทำให้มีความเสี่ยงสูงของกระแสรั่วไหลการกัดกร่อน จึงเสนอให้มีการเชื่อมต่อระหว่างระบบกับดักกระแสรั่วไหลและระบบการต่อลงดิน

กรณีฉนวนของรางล้มเหลว มีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้าง ค่าแรงดันของโครงสร้างจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่บริเวณใกล้จุดเชื่อมต่อ ภายในพื้นที่กระแสรั่วไหลเล็กๆนี้ต้องมีความสนใจเป็นพิเศษเพราะอาจมีความสัมพันธ์ของการเกิดการกัดกร่อนสูง

การเกิดความผิดพร่องจากรางวิ่งสู่โครงสร้าง ซึ่งจะปีนส่วนหลักของการเกิดกระแสรั่วไหล สามารถตรวจวัดได้โดยการเปรียบเทียบค่าแรงดันเฉลี่ยขั้วบวกของรางกับค่าอ้างอิงขณะรถไฟวิ่ง นี่คือหลักพื้นฐานสำหรับระบบการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหล

ค่าความนำไฟฟ้าที่ต่ำต่อหนึ่งหน่วยความยาวจากรางไปยังโครงสร้างคือสิ่งที่ยืนยันสำหรับการลดความอันตรายของการเกิดกระแสรั่วไหลกัดกร่อน นี่คือจะนำเสนอหลักการสำหรับการบรรเทาการเกิดกระแสรั่วไหล และการป้องกันการกัดกร่อน และเป็นไปตามมาตรฐาน EN 50122-2/1/1 ที่ที่เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ ในการเตรียมขอบเขตของวงจรไหลกลับของกระแสขับเคลื่อนโดยมีเป้าหมายวงจรไหลกลับที่เป็นโลหะ

ดังนั้นมันจึงมีความสำคัญมากที่เกี่ยวกับชีวิตสำหรับการฉนวนระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้าง เป็นการเตรียมการ โดยงานวิศวกรรมราง การติดตั้งอย่างถูกต้องแม่นยำและต้องไม่มีส่วนที่เป็นการสัมผัสทางไฟฟ้าไปยังโครงสร้าง

นอกเหนือจากการพิจารณาตัดสินใจถึงการลดขนาดของกระแสรั่วไหลระหว่างการเดินรถแล้ว สิ่งที่สำคัญคือการเริ่มต้นการบำรุงรักษาระบบให้ค่าความเป็นฉนวนระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างมีค่าสูงตลอดไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. รายละเอียดของงาน

การสำรวจกระแสรั่วไหลของระบบแหล่งจ่ายขับเคลื่อนกระแสตรงสำหรับโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล ได้รับการออกแบบเตรียมการป้องกันเพื่อต้านการเกิดกระแสรั่วไหล

3. การเตรียมการ

ข้อมูลสำหรับการจำลองการวิ่งของรถไฟและสำหรับระบบไฟฟ้าได้รับการศึกษาจาก DC-Traction Study, PSY/0013.A.

3.1 ข้อมูลรางและโครงสร้างเสริมแรง

ความยาวตลอดแนวสายทางประมาณ	20 กิโลเมตร
จำนวนของสถานีผู้โดยสาร	18 สถานี
จำนวนของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน	12 สถานี
จำนวนของอาคารระบายอากาศ	8 อาคาร

ในส่วนนี้จัดทำแบบจำลองกับการแยกกันของโครงสร้างเสริมแรงต่อหนึ่งราง สถานีผู้โดยสารมีอาคารระบายอากาศวางอยู่ตำแหน่งตรงกลางโดยทั่วไปส่วนเหล่านี้จะต่อถึงกันทางไฟฟ้า

3.2 โครงสร้างเสริมแรงที่ประพฤติตัวเป็นส่วนป้องกันกระแสรั่วไหล

ส่วนบนสุดของชั้นโครงสร้างเสริมแรงในโครงสร้างรองรับรางถูกใช้เป็นกับดักกระแสรั่วไหล (stray current collection mat) จะพิจารณาตามขนาดต่างๆดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าความต้านทานของเหล็กที่ 40 องศาเซลเซียส 170 โอห์มตารางมิลลิเมตรต่อกิโลเมตร

พื้นที่หน้าตัดของกับดักกระแสรั่วไหล 1600 ตารางมิลลิเมตร

ค่าความต้านทานกระแสตรงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (R's) 106 มิลลิโอห์มต่อกิโลเมตร

ค่าความต้านทานของพื้นที่หน้าตัดการเชื่อมต่อที่เกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตไม่ส่งผลกระทบบนค่าความต้านทานตามแนวความยาวเพราะว่าตัวนำมีความยาวน้อย

3.3 ค่าความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาว

ระดับขนาดที่มีความต่างกันที่สามระดับของความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้าง G'RS ที่ได้รับการพิจารณา

0.5 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตรในกรณีที่แย่จากการสมมติฐาน

0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร ค่าที่ได้รับการแนะนำจากมาตรฐาน

0.025 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร ค่าความนำไฟฟ้าต่ำสำหรับระบบใหม่

สำหรับค่าความนำไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างกับดิน ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร ต่อรางเดี่ยวในอุโมงค์ที่พิจารณา

ที่แต่ละสถานีผู้โดยสารค่าความต้านทานไปยังดินของระบบการต่อลงดินแบบฟาร์มที่ได้พิจารณากับการออกแบบค่าที่ 0.5 โอห์ม ต่อการต่อลงดินแบบฟาร์ม

3.4 สายนำกระแสกลับในอุโมงค์ ใช้เชื่อมต่อกับระบบกับดักกระแสรั่วไหล คือค่าที่ใช้พิจารณาในการคำนวณกับข้อมูลที่แสดงดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าความต้านทานของทองแดงที่ 40 องศาเซลเซียส 19.17 โอห์มตารางมิลลิเมตรต่อกิโลเมตร

พื้นที่หน้าตัดต่อราง 120 ตารางมิลลิเมตร

ค่าความต้านทานกระแสตรงที่ 40 องศาเซลเซียส 160 มิลลิโอห์มต่อกิโลเมตร

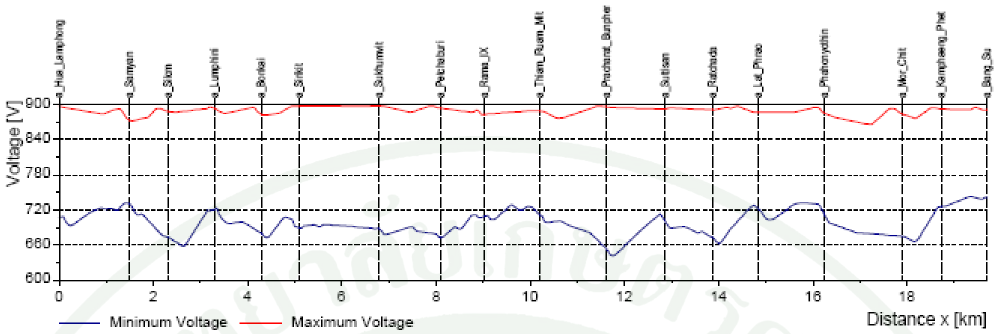
4. การคำนวณ

สถานการณ์กระแสรั่วไหลของโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลได้ผ่านการวิเคราะห์โดยจำลองการวิ่งของรถไฟรวมถึงการคำนวณโครงข่ายระบบไฟฟ้า ขับเคลื่อนและการกำเนิดกระแสขับเคลื่อน

สำหรับการศึกษาขั้นที่สุดด้วยรูปแบบการขับเคลื่อนรถไฟขนาด 6 คันความถี่ในการวิ่งทุกๆ 2.19 นาที (57,000 pphpd ที่ w4 loading) ที่ได้รับการพิจารณา

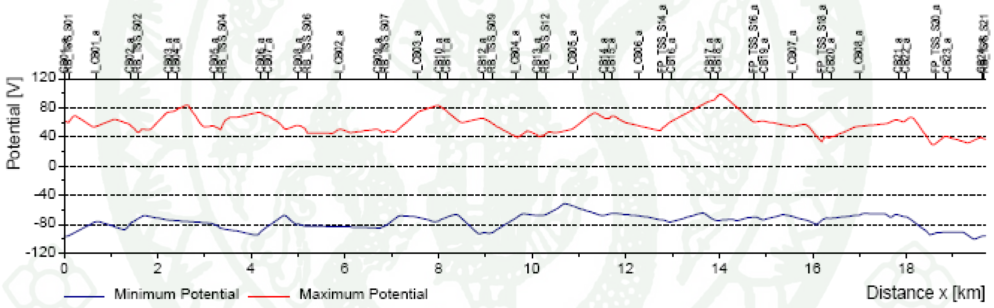
เมื่อค่าแรงดันรางมีค่าสูงกว่า 0 โวลท์จากเดิม กระแสไหลผ่านทางเดินส่วนกลับของกระแสและกระแสรั่วออกจากวงจรแล้วไหลผ่านความนำไฟฟ้าตามแนวโครงสร้างและดิน ปริมาณของกระแสรั่วไหลขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันราง ค่าความต้านทานของวงจรกระแสไหลกลับ และค่าความนำไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างหรือดินตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 23 แรงดันเฉลี่ยของรางที่สาม

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)



ภาพที่ 24 แรงดันเฉลี่ยของรางวิ่ง

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

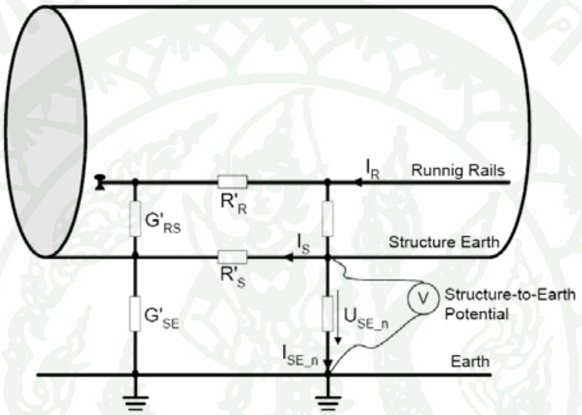
ภาพที่ 23 และ 24 แสดงให้เห็นถึงค่าแรงดันเฉลี่ยของรางจากการคำนวณตามแนวความยาวจากการศึกษากระแสตรง

การเกิดการกัดกร่อนที่เกิดจากกระแสรั่วไหลเป็นค่าเฉลี่ยขั้วบวกของแรงดันราง ภาพที่ 23 แสดงให้เห็นค่าแรงดันรางที่มากที่สุดที่เกิดจากกระแสรั่วไหลจากการศึกษา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

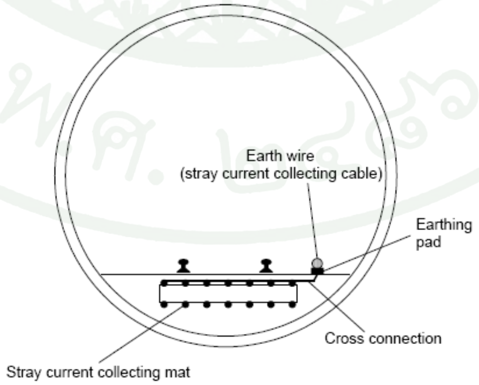
4.1 แบบจำลองสายทางสำหรับการคำนวณค่ากระแสรั่วไหล

ภาพแสดงหลักการวงจรไหลกลับของกระแสกับโครงสร้าง กับดักกระแสรั่วไหลภายในส่วนของอุโมงค์ และการเรียงตัวของกับดักกระแสรั่วไหลในอุโมงค์เดี่ยวที่เชื่อมต่อกับสายดิน



ภาพที่ 25 แบบจำลองวงจรไหลกลับและโครงสร้าง

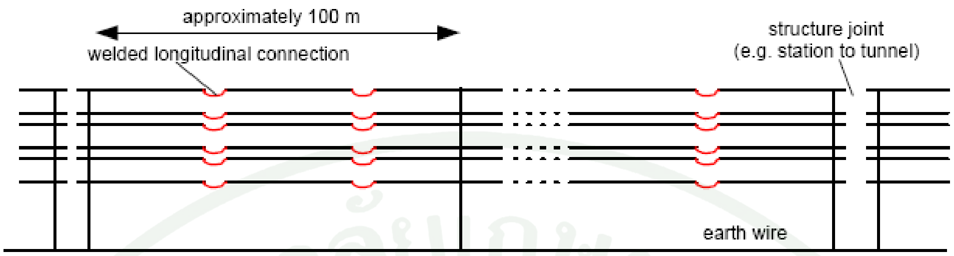
ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)



ภาพที่ 26 การวางตัวของกับดักกระแสรั่วไหลสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 27 ผังแสดงการเชื่อมต่อตามความยาวของกับดักกระแสรั่วไหล

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

5. ผลการคำนวณ

จากการทดลองผลที่ได้นำพาไปสู่การพิจารณาสถานการณ์การเกิดกระแสรั่วไหล

ค่าผันแปรที่ 1 คือวิธีการที่นำเสนอ ใช้ค่าความนำจากรางสู่โครงสร้างสำหรับอุโมงค์กำหนดในมาตรฐาน EN 50122-2 และการออกแบบระดับค่าของความต้านทานไปยังดินของฟาร์มการต่อลงดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 ค่าแรงดันเฉลี่ยสูงสุดที่การจำลองต่างๆกัน

Variant	Conductance Rail against Structure (G'_{RS}) [S/km]	Resistance to earth per earthing farm (R_E) [Ω]	Maximum Average Potential [mV]
Var. 1	0.1	0.5	80
Var. 2	0.1	1	94
Var. 3	0.1	not connected to stray current collection mat	110
Var. 4	0.025	0.5	21
Var. 5	0.5	0.5	380
Var. 6	0.1	0.5	1040
	Rail to stray current mat connection at km 18.02		

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

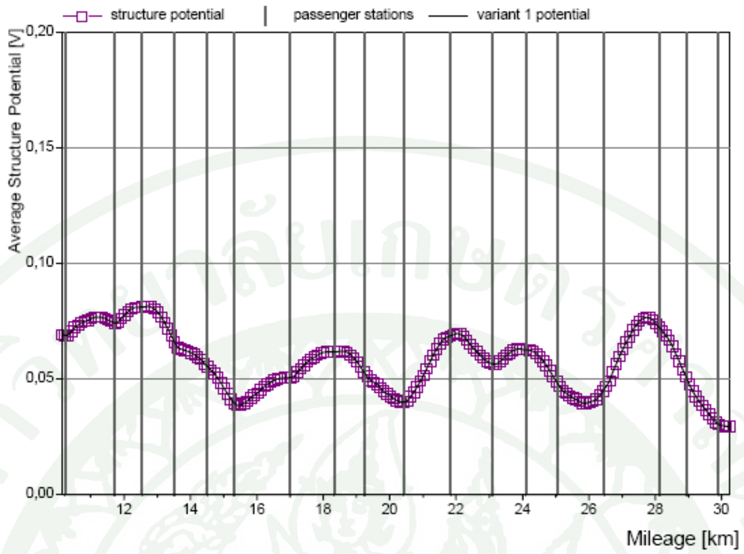
แผนภูมิแสดงค่าเฉลี่ยจากการคำนวณของแรงดันบวกที่โครงสร้างตามความยาวแนวราง สำหรับการวัดค่าตัวแปร ตามแผนภูมิค่าผันแปรที่ 1 คือการแสดงอ้างอิงในตัวแปรเพิ่มเติม ตำแหน่งของสถานีผู้โดยสารคือจะตรวจวัดโดยแนวดิ่งของเส้นตามความยาว

ตามมาตรฐาน EN 50122-2,/1/ สิ่งเหล่านี้จะไม่เป็นเหตุถ้าขนาดของแรงดันในชั่วโมงเร่งด่วนไม่เกิน 100 มิลลิโวลต์ ดังนั้นสถานการณ์การเกิดกระแสรั่วไหลของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนสามารถที่จะประเมินโดยค่าเฉลี่ยของแรงดันบวกได้

กับดักกระแสรั่วไหลเป็นโครงสร้างแรกที่จะได้รับผลจากกระแสรั่วไหล ดังนั้นความเสี่ยงสูงสุดของการกัดกร่อนจากกระแสรั่วไหลมีสาเหตุจากระบบจ่ายไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน

ค่าผันแปรที่ 1 วิธีการของซีเมนซ์ กับค่าความนำจากรางวิ่งไปยังโครงสร้างที่ 0.1 ซีเมนต์ต่อกิโลเมตร โดยทั่วไปในระบบขนส่งมวลชนขนาดใหญ่แสดงถึงค่าเฉลี่ยแรงดันโครงสร้างกับดินที่ 80 มิลลิโวลต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

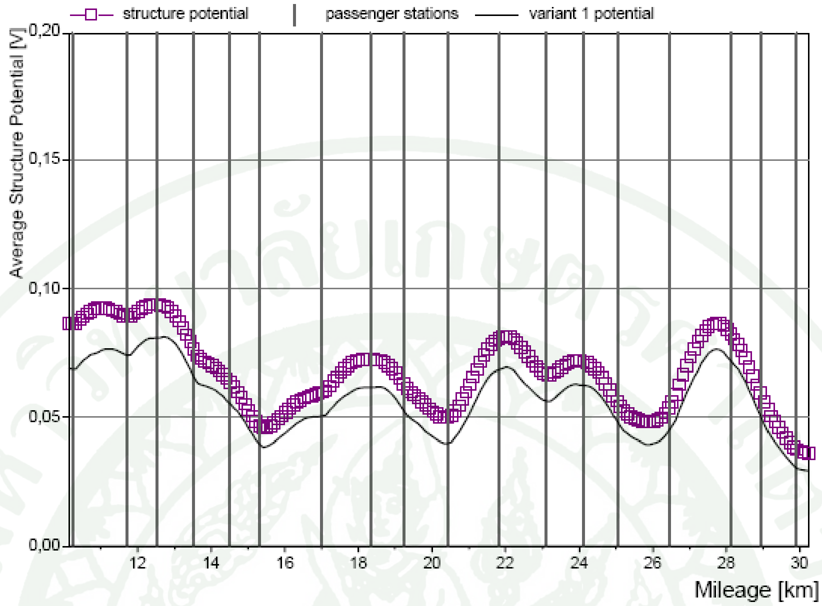


ภาพที่ 28 ค่าผันแปรที่ 1 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง
G'RS=0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , G'SE=10 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , RE=0.5 โอห์ม

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

ค่าผันแปรที่ 2 และ 3 แสดงให้เห็นถึงผลของความต้านทานไปยังดินของฟาร์มการต่อลงดินของสถานีผู้โดยสาร เพิ่มค่าความต้านทานไปยังดินที่ตัวแปร 2 ค่าแรงดันโครงสร้างเพิ่มขึ้นมากที่สุดถึง 94 มิลลิโวลต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

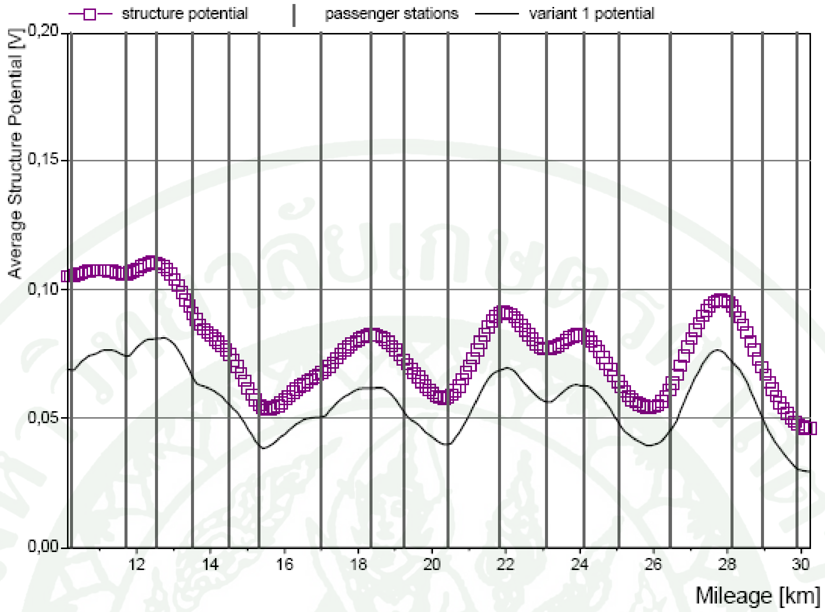


ภาพที่ 29 ค่าผันแปรที่ 2 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง
G'RS=0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , G'SE=10 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , RE=1 โอห์ม

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

การแยกกันของการต่อลงดินของสถานีและระบบกับดักกระแสรั่วไหล (ค่าผันแปรที่ 3) ไม่เป็นข้อเด่น เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการต่อกับดักกระแสรั่วไหล เพราะค่าแรงดันเพิ่มขึ้นถึง 110 มิลลิโวลต์ ซึ่งเกินกว่าที่มาตรฐาน EN 50122-2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

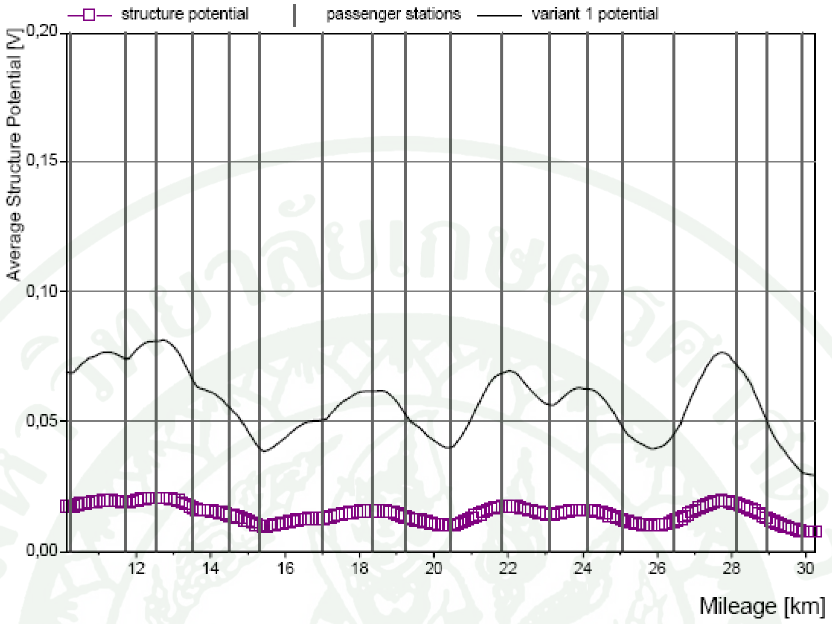


ภาพที่ 30 ค่าผันแปรที่ 3 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง
G'RS=0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , G'SE=10 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร
กับดักกระแสรั่วไหลไม่ต่อกับฟาร์มการต่อลงดินของสถานี

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

ผลกระทบในเรื่องความเป็นฉนวนจากรางไปยังโครงสร้างคือการศึกษาในตัวแปร 4 และ 5 พิจารณาค่าความนำรางถึงโครงสร้าง 0.025 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร ซึ่งสามารถเข้าถึงสำหรับระบบการก่อสร้างใหม่ค่าความต่างศักดิ์เฉลี่ยต่ำลง 21 มิลลิโวลต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

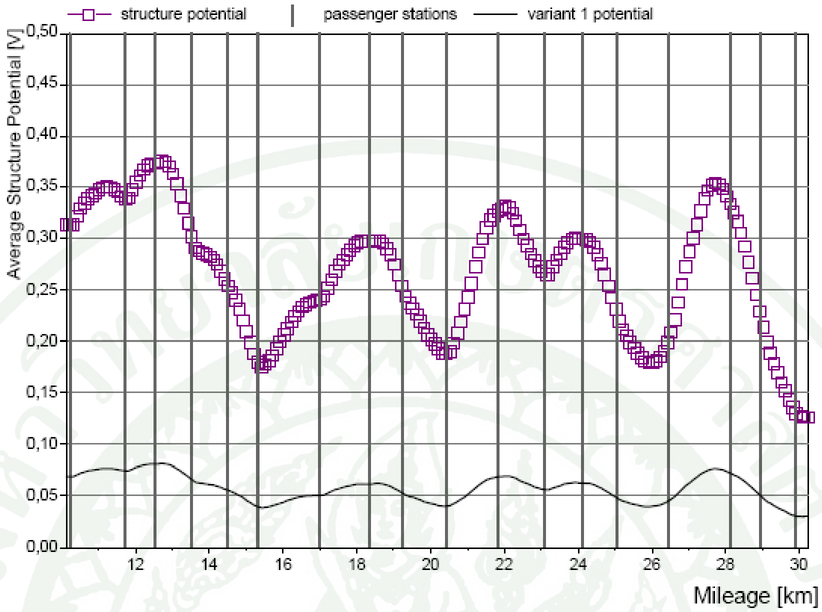


ภาพที่ 31 ค่าผันแปรที่ 4 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง
G'RS=0.025 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , G'SE=10 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , RE=0.5 โอห์ม

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

ฉนวนของรางวิ่งที่แย่ลงนำไปสู่แรงดันโครงสร้างที่ยกสูงขึ้น ดังนั้นเกิดความเสี่ยงของการเกิดกระแสรั่วไหลกัดกร่อนสำหรับค่าความนำรางไปยังโครงสร้าง 0.5 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร และค่าแรงดันยกขึ้นถึง 380 มิลลิโวลต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



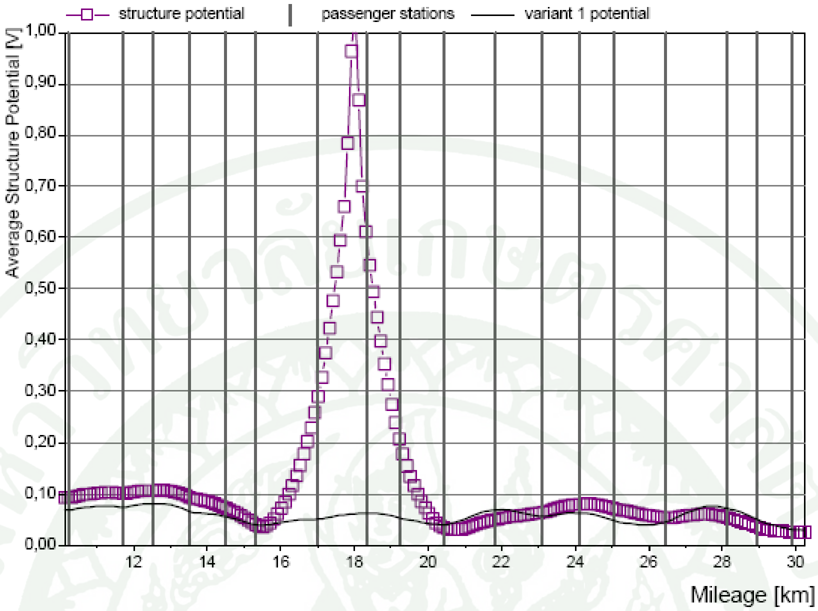
ภาพที่ 32 ค่าผันแปรที่ 5 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง
G'RS=0.5 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , G'SE=10 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , RE=0.5 โอห์ม

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

ค่าผันแปรที่ 6 แสดงให้เห็นถึงค่าแรงดันรางเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของการต่อจุดหนึ่งจุดระหว่างรางวิ่งและโครงสร้างตำแหน่ง กม.ที่ 18.2 เป็นตัวอย่างของการเกิดความผิดพร่องของฉนวนระหว่างรางวิ่งไปโครงสร้าง แผนภูมิแสดงให้เห็นถึงภายในบริเวณใกล้เคียงของการต่อค่าแรงดันโครงสร้างสูงขึ้นถึง 1040 มิลลิโวลต์

ภาพที่ 34 แสดงให้เห็นถึงการเกิดความผิดพร่องของรางไปยังโครงสร้างซึ่งนำไปสู่ค่าแรงดันรางขั้วบวกที่ต่ำมากในบริเวณใกล้เคียงของตำแหน่งการเกิดความผิดพร่อง การตรวจสอบค่าแรงดันรางเฉลี่ยเหมาะสมที่จะวัดค่าเพื่อการตรวจจับการผิดพร่องของรางไปยังโครงสร้าง

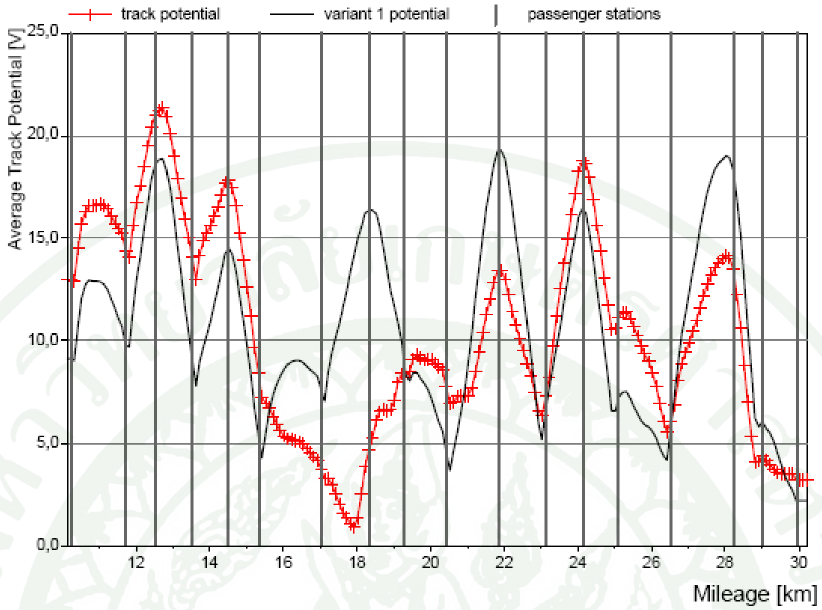
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 33 ค่าผันแปรที่ 6 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงเกิดความผิดพร่อง G’RS=0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , G’SE=10 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , RE=0.5 โอห์ม รางวิ่งต่อกับกับดักกระแสรั่วไหลที่ กม.18.2

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 34 ค่าผันแปรที่ 6 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไม่เกิดความผิดพร่อง G'RS=0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , G'SE=10 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร , RE=0.5 โอห์ม ต่อรางวิ่งไปยังกับดักกระแสรั่วไหลที่ กม. 18.2 เปรียบเทียบกับตัวแปร 1

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

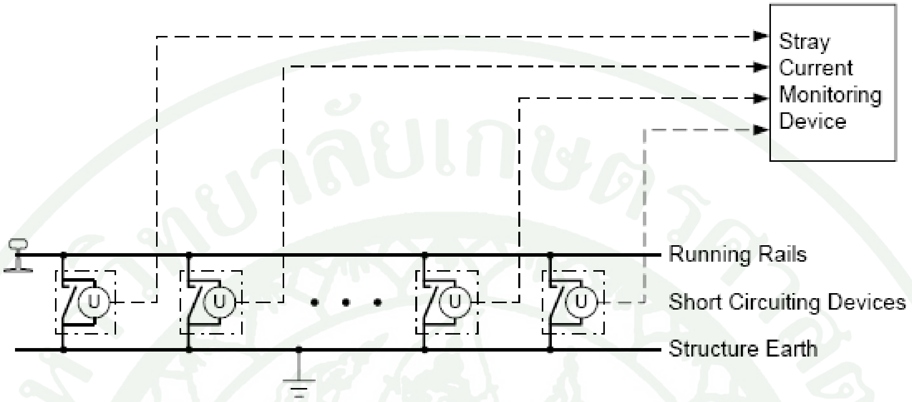
จากการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆกันแสดงให้เห็นถึงค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวจากรางวิ่งไปยังโครงสร้าง สำหรับการลดค่าความเสียหาย ความอันตรายจากการเกิดกระแสรั่วไหลกัดกร่อนเป็นไปตามมาตรฐาน EN 50122-2/1/ ซึ่งเป็นประโยชน์มากในการเตรียมการเพื่อป้องกันผลกระทบกับส่วนโลหะของรางวิ่งนำกระแสกลับ

การทำฉนวนของระบบกับดักกระแสรั่วไหลเพื่อป้องกันระบบการต่อลงดินของสถานีไม่ใช่วิธีการที่ทันสมัยหรือล้ำหน้า สำหรับการป้องกันกระแสรั่วไหล แต่จะนำไปสู่ค่าแรงดันโครงสร้างที่สูงขึ้น ดังนั้นการต่อลงดินแบบฟาร์มและระบบกับดักกระแสรั่วไหลควรมีการต่อเชื่อมถึงกัน

สิ่งสำคัญอย่างยิ่งคือฉนวนระหว่างรางวิ่งกับดินเตรียมงานโดยงานรางติดตั้งอย่างแม่นยำและไม่ให้มีส่วนหนึ่งส่วนใดต่อเนื่องทางไฟฟ้ากับโครงสร้าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ระบบตรวจวัดกระแสรั่วไหล

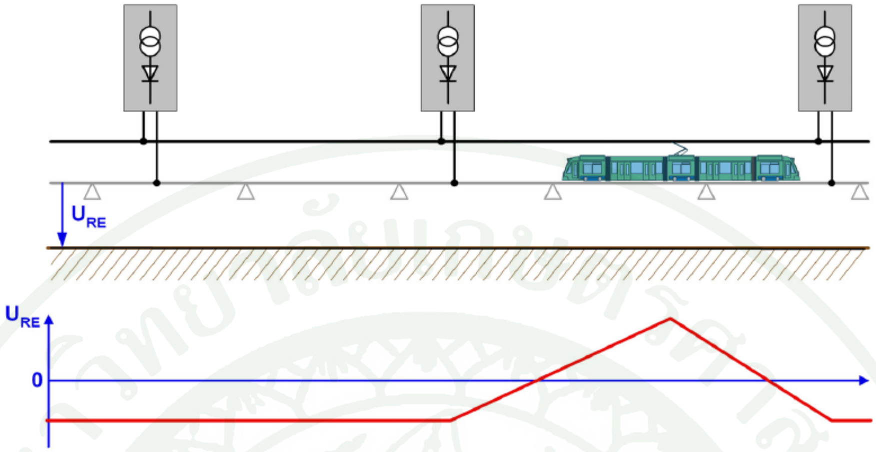


ภาพที่ 35 ภาพแสดงหลักการของการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหล

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

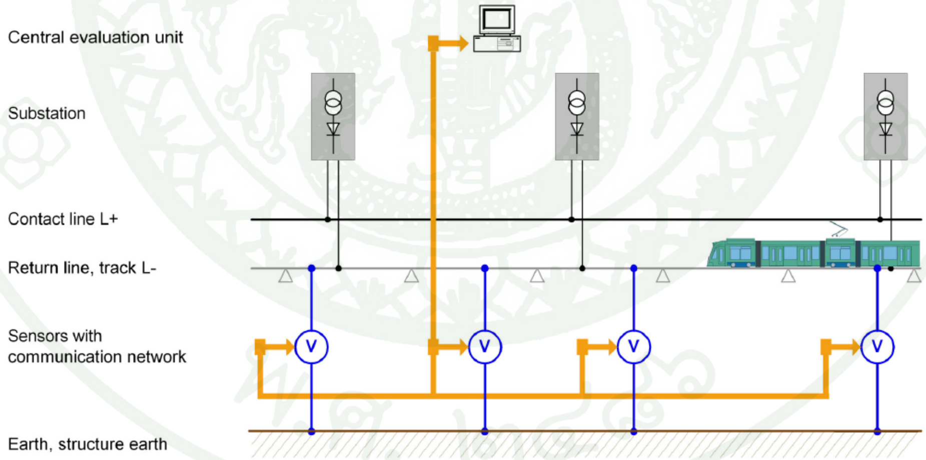
ระบบส่วนกลางการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหลคือการวัดค่าแรงดันจากอุปกรณ์ลัดวงจร ซึ่งติดตั้งไว้ที่สถานีผู้โดยสาร โดยจะเปรียบเทียบค่าแรงดันเฉลี่ยด้านบวกกับค่าอ้างอิงจากระบบฉนวนและการเก็บค่าในอุปกรณ์ตรวจจับ ในกรณีที่มีความขัดแย้งระหว่างค่าที่เก็บบันทึกไว้กับค่าที่วัดได้ตัวอุปกรณ์จะทำการลัดวงจรและแจ้งเหตุ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 36 ภาพแสดงของการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหล

ที่มา: Siemens AG SITRAS® (2003)



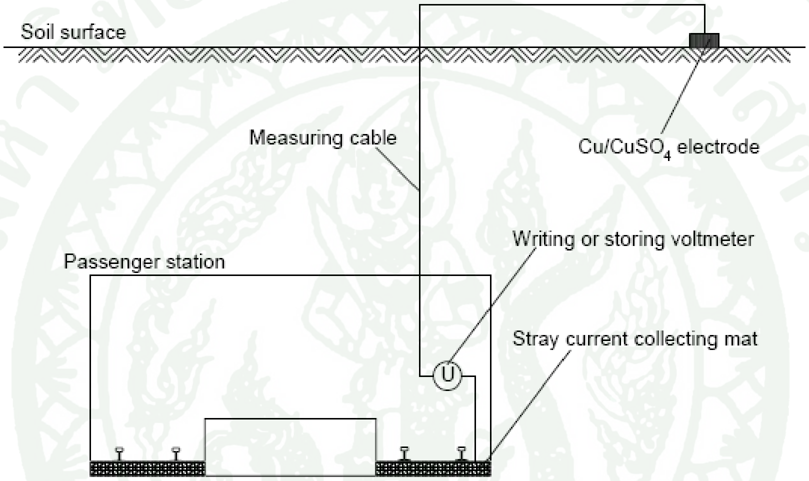
ภาพที่ 37 ภาพแสดงของการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหล

ที่มา: Siemens AG SITRAS® (2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. การเริ่มวัดและกระบวนการวัด

ตามมาตรฐาน EN 50122-2 จะไม่จำเป็นในเรื่องกระแสรั่วไหล ถ้าระดับแรงดันเฉลี่ยที่โครงสร้างยกขึ้นใน ชั่วโมงเร่งด่วนของการจราจรไม่เกิน 100 มิลลิโวลต์ นี่คือเกณฑ์พื้นฐานที่ใช้วัดเพื่อประเมินค่ากระแสรั่วไหลในการตรวจวัด



ภาพที่ 38 การจัดเรียงการวัดค่าแรงดันโครงสร้าง

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

ค่าแรงดันจากการวัดระหว่างโครงสร้างเพื่อตรวจสอบและอ้างอิงด้วยขั้วทองแดง Cu/CuSO4 วางอยู่บนผิวดินใกล้เคียงกับโครงสร้าง แสดงให้เห็นในภาพที่ 38 ค่าแรงดันถูกวัดในชั่วโมงการจราจรเร่งด่วน การจารจรที่ธรรมดา และไม่มีการจราจร ตามลำดับ

กฎเกณฑ์ค่าแรงดันที่ยกขึ้นระหว่างการจราจรเร่งด่วนและธรรมดาต่ำกว่า 100 มิลลิโวลต์ โดยทั่วไปแล้วการวัดจะวัดตลอด 24 ชั่วโมง รวมถึงสถานการณ์ทั้งสองแบบโดยการบันทึกหรือเก็บค่าจากการวัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แนะนำการตรวจวัดตามสถานีต่างๆดังนี้

- สถานีหัวลำโพง (ด้านใต้สุดของสายทาง)

- สถานีศูนย์วัฒนธรรม (ใกล้ทางเข้าออกศูนย์ซ่อมบำรุง)

- สถานีลาดพร้าว (บริเวณกลางทางของส่วนเหนือ ซึ่งมีความยาวสูงสุด)

- สถานีบางซื่อ (เหนือสุดของสายทาง)

การวัดควรที่จะทำตั้งแต่การเริ่มการเดินรถเทียบกับค่าอ้างอิงและทำซ้ำแบบนี้ต่อไป ถ้าการวัดค่าแรงดันรางในสถานที่ที่ไม่ได้แนะนำไว้ก็ให้ทำการวัดในที่ใหม่ๆด้วย ควรที่จะจดจำการตรวจวัดของระบบการตรวจกระแสรั่วไหลทำงานร่วมกับอุปกรณ์ลัดวงจรค่าแรงดันจากรางไปยังโครงสร้าง ซึ่งอนุญาตให้ตรวจวัดค่าเบี่ยงเบนจากสภาวะการเริ่มต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ระบบคอมพิวเตอร์

   1.1 Intel Core™ 2 Duo processor T5900 (2.2 GHZ, 800 MHz FSB, 2 MB L2 cache)

   1.2 Mobile intel Graphics Media Accelerator 4500MHD

   1.3 4GB DDR2

   1.4 14.0 Inch HD Acer CineCrystal™ LED LCD

   1.5 320GB HDD

   1.6 DVD-Super Multi DL

   1.7 802.11a/b/g Draft-N WLAN

2. ระบบปฏิบัติการ

   2.1 Microsoft Window XP (Service Pack 3)

3. โปรแกรมที่ใช้งาน

   3.1 Microsoft Office Word 2007

   3.2 MATLAB R2007a

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. เอกสารแบบก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล

5. ข้อมูลจาก IEEE

6. เวปไซต์ค้นหา

วิธีการ

1. ศึกษาสาเหตุการเกิดกระแสรั่วไหลจาก IEEE และเอกสารอื่นๆ

2. ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากกระแสรั่วไหลจาก IEEE และเอกสารอื่นๆ

3. ศึกษาการป้องกันและลดค่าการเกิดกระแสรั่วไหลจาก IEEE และเอกสารอื่นๆ

4. ศึกษาระบบควบคุมและการป้องกันการเกิดความเสียหายจากกระแสรั่วไหลสำหรับโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล

4.1 มาตรฐาน (European Standard EN 50122-2, 1998)

4.2 ซีเมนส์

5. วิเคราะห์ข้อมูลการป้องกันกระแสรั่วไหลโดยโปรแกรมการคำนวณเทียบเคียง

5.1 การคำนวณที่ 1 คำนวณค่าแรงดันตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรงระบบราง U_T

5.2 การคำนวณที่ 2 ปรับค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์ตามที่กำหนดในมาตรฐาน EN 50122-2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.3 การคำนวณที่ 3 ปรับค่าเฉลี่ยของวงจรรางกระแสไหลกลับของส่วนที่พิจารณา สนใจในช่วงเวลาที่มีโหลดสูงสุด

5.4 การคำนวณที่ 4 ทดลองปรับค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาวโดยการใช้รางที่สี่เพิ่มเข้ามาช่วยในการนำกระแสกลับ

6. การตรวจวัดค่าแรงดันรางเพื่อป้องกันการเกิดกระแสรั่วไหล

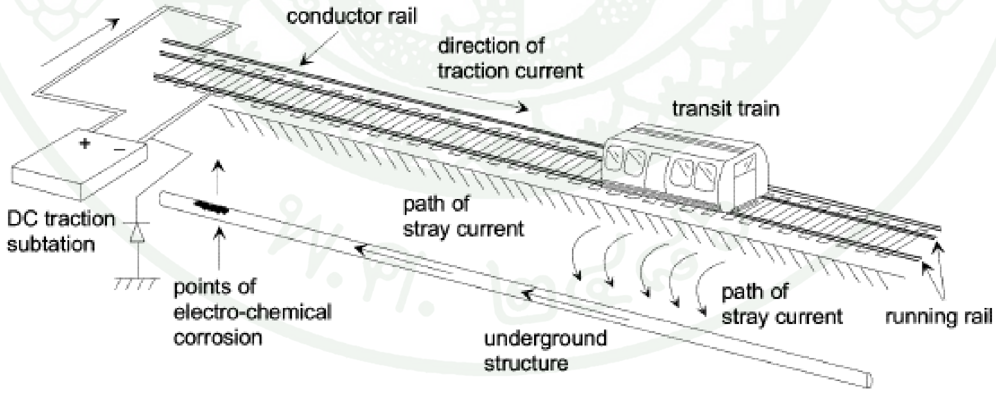
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

ผล

1. สาเหตุการเกิดกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทางรางแบบกระแสตรง

1.1 การใช้รางวิ่งเป็นตัวนำกระแสกลับในระบบขับเคลื่อน ค่าความต้านทานของรางวิ่งที่มีค่าสูงและความต้านทานระหว่างรางวิ่งไปยังดินที่มีค่าต่ำเป็นสาเหตุทำให้เกิดการรั่วไหลของกระแสออกจากรางวิ่งลงสู่ดินเพื่อที่จะหาทางไหลกลับไปยังสถานีไฟฟ้า ถ้าตำแหน่งรถอยู่ห่างจากสถานีไฟฟ้ามากจะเพิ่มค่าความต้านทานมากตามสัดส่วนของระยะทางที่เพิ่มขึ้น เป็นสัดส่วนกับปริมาณของกระแสขับเคลื่อนที่จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับน้ำหนักของรถ ปริมาณผู้โดยสารและอัตราเร่ง สภาพแวดล้อมบริเวณรางวิ่งสกปรกมีน้ำขังหรือความชื้น ความผิดพลาดจากการออกแบบ โดยการใช้กระแสขับเคลื่อนสูงจนไม่เหมาะสม การกำหนดระยะทางระหว่างสถานีไฟฟ้าสองแห่งที่จ่ายไฟให้กับตัวรถไฟฟ้าระยะทางยาวเกินไป



ภาพที่ 39 ลักษณะการเกิดกระแสรั่วไหลของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าแบบกระแสตรง

ที่มา: Chien-Hsing (2005)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 การเลือกวิธีการต่อลงดินสำหรับระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน เนื่องจากตามมาตรฐานไม่ได้ระบุไว้

1.2.1 การไม่ต่อลงดิน คือระบบการไหลกลับของกระแสรวมถึงรางวิ่งและขั้วลบของสถานีไฟฟ้าแยกออกจากดิน มีกระแสรั่วไหลน้อยแต่มีปัญหาด้านการเกิดแรงดันสัมผัส เพราะแรงดันรางจะสูงมาก

1.2.2 วิธีการต่อลงดินโดยตรง คือการต่อโดยตรงระหว่างขั้วลบของสถานีไฟฟ้ากับดิน จะมีปัญหาคือเกิดกระแสรั่วไหลสูงไม่สามารถรู้ปริมาณและควบคุมได้ แต่มีข้อดีคือรางวิ่งกับดินมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากัน(Chien-Hsing and Chien-Jung, 2006)

1.2.3 วิธีการต่อลงดินผ่านไดโอด ส่วนแรกรางวิ่งจะต่อกับดินโดยผ่านไดโอดที่สถานีไฟฟ้าเพื่อป้องกันกระแสไหลจากรางวิ่งลงสู่ดินและจะทำงานลัดวงจรก็ต่อเมื่อเกิดแรงดันถึงค่าที่กำหนดไว้ ส่วนที่สองไดโอดจะต่อกับกับดักกระแสรั่วไหลเพื่อเป็นทางเดินของกระแสไหลกลับไปยังสถานีไฟฟ้า(Chien-Hsing and Chien-Jung, 2006)

1.2.4 วิธีไม่ต่อลงดินที่สถานีจ่ายไฟแต่มีสวิทช์ต่อเพื่อลดแรงดันของรางวิ่งตามตำแหน่งที่จำเป็น เป็นระบบที่ใช้ในระบบรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล(สมเกียรติ, 2547)

2. ผลกระทบของการเกิดกระแสรั่วไหล

2.1 โครงสร้างระบบรถไฟฟ้าเกิดการกัดกร่อน

2.2 สาธารณูปโภคอื่นๆรอบข้างเกิดความเสียหาย

2.3 ความไม่ปลอดภัยของผู้โดยสารจากแรงดันที่ต่างกัน

2.4 อายุการใช้งานของโครงสร้างระบบรถไฟฟ้าสั้นลง

2.5 สูญเสียพลังงานของระบบขับเคลื่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การป้องกันและลดค่าการเกิดกระแสรั่วไหล

3.1 เพิ่มค่าความต้านทานระหว่างรางวิ่งกับดิน

3.2 ลดค่าความต้านทานของรางวิ่งโดยการต่อขนานตัวนำไปกับแนวราง

3.3 เพิ่มค่าความนำระหว่างรางวิ่งกับดินเพื่อไม่ให้กระแสรั่วไหลออกจากรางไปสู่ดิน

3.4 จัดการดูแลสภาพแวดล้อมบริเวณรางวิ่งให้สะอาดปราศจากความชื้น

3.5 การออกแบบที่เป็นไปตามมาตรฐานเพื่อให้ปริมาณกระแสขับเคลื่อนเหมาะสมกับระบบ

3.6 การออกแบบระยะทางระหว่างสถานีไฟฟ้าสองแห่งที่จ่ายไฟให้กับตัวรถไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมเพื่อป้องกันการสูญเสียของพลังงานไฟฟ้า

3.7 รักษาค่าแรงดันระหว่างรางกับดินด้วยอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันรางให้ค่าเป็นไปตามมาตรฐาน

3.8 การติดตั้งกับดักกระแสรั่วไหลใต้รางวิ่งที่มีค่าความนำสูงเพื่อไม่ให้กระแสรั่วไหลออกไปสู่โครงสร้างภายนอกที่อยู่บริเวณใกล้เคียง

3.9 การติดตั้งฉนวนรองรางที่มีคุณสมบัติแยกรางออกจากพื้นคอนกรีตได้

3.10 ออกแบบโดยการเพิ่มแรงดันที่ส่งให้ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าให้สูงขึ้นส่งผลให้กระแสขับเคลื่อนต่ำลง

3.11 การคำนวณออกแบบระบบให้ได้ค่าความต่างศักดิ์ระหว่างรางวิ่งกับดินไม่เกิน 0.1 โวลต์ตามมาตรฐาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.12 ทำการเชื่อมต่อรางโดยวิธีการเชื่อมประสานโลหะตลอดแนวความยาวรางเพื่อลดความต้านทานของการต่อราง หรือออกแบบโดยการใช้รางที่สี่

3.13 การทาสีที่มีความเป็นฉนวนสูงบริเวณผิวโลหะใต้ท้องราง

3.14 ใช้คอนกรีตที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าสูงเป็นโครงสร้างรองรับราง

3.15 จัดการระบายน้ำบริเวณที่ติดตั้งรางวิ่งเพื่อไม่ให้เกิดความชื้นจากน้ำขัง

3.16 ดูแลรักษาทำความสะอาดบริเวณรางอย่างสม่ำเสมอ

4. ศึกษาระบบควบคุมและการป้องกันการเกิดความเสียหายจากกระแสรั่วไหลสำหรับโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล

4.1 มาตรฐาน (European Standard EN 50122-2, 1998)

มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบคือ EN 50122-2 (Railway Applications Fixed Installations Protective Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems)

มาตรฐานนี้จะกล่าวถึงการกัดกร่อนโดยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical reaction)

4.1.1 คำศัพท์ที่ใช้ในมาตรฐาน

ก. Earth คือ ค่าความนำของดินซึ่งค่าความต่างศักดิ์ทางไฟฟ้า ณ จุดต่างๆต้องมีค่าเป็นศูนย์

ข. Tunnel Earth คือ การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมแรงของอุโมงค์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค. Structure Earth คือ reinforced trackbed, tunnel

ง. Rail to Earth resistance คือ ความต้านทานทางไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับดิน สำหรับการขับเคลื่อนระบบกระแสตรงจะวัดระหว่างรางวิ่ง(running rail)กับการต่อลงดินอุโมงค์ (tunnel earth) ในที่นี้อ้างอิงแบบรางเดี่ยว

จ. Conductance per unit length คือ ส่วนกลับค่าความต้านทานรางวิ่งกับดินต่อหนึ่งหน่วยความยาว ในที่นี้อ้างอิงแบบรางเดี่ยว

ฉ. Rail potential คือ แรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อรางวิ่งทำหน้าที่เป็นส่วนนำพากระแสไหลกลับไปยังสถานีไฟฟ้า หรือในสภาวะเกิดการลัดวงจรระหว่างรางวิ่งสู่ดิน

ช. Open traction system earthing คือ การต่อเนื่องถึงกันของความนำไฟฟ้าต่อระบบไหลกลับของกระแส หรือระบบไหลกลับของกระแสไปยังดินโดยใช้อุปกรณ์จำกัดระดับแรงดัน หรือโดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นอุปกรณ์ที่จะทำการต่อชั่วคราวหรือถาวรถ้าระดับแรงดันเกินค่าที่กำหนด

4.1.2 การพิจารณาลดค่ากระแสรั่วไหลตามที่มาตรฐานกำหนด

ก. ระยะทางระหว่างสถานีไฟฟ้า

ข. การเชื่อมต่อของวงจรกระแสไหลกลับ

ค. ความเป็นฉนวนระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างอื่นที่ต่อกับดิน

ง. การใช้ตัวนำกลับเป็นรางวิ่งที่สี่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จ. การลดค่าความต้านทานของรางวิ่ง โดยการใช้รางที่มีพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น การเชื่อมต่อรางวิ่งสองรางเข้าด้วยกันในกรณีที่ไม่กระทบกับระบบอาณัติสัญญาณ การเพิ่มตัวนำสำหรับเป็นทางเดินกระแสไฟฟ้าตามแนวความยาวราง

ฉ. การใช้ฉนวนรองรางวิ่งที่มีประสิทธิภาพสูง

ช. การทำความสะอาดหมอนรองราง

ซ. การใช้หมอนรองรางที่ทำด้วยไม้หรือคอนกรีตร่วมกับการใช้ระบบยึดเหนี่ยวรางแบบมีฉนวน

ฌ. การจัดระยะห่างที่เพียงพอของรางวิ่ง

ญ. การระบายน้ำที่ดีบริเวณราง

ฎ. การเชื่อมต่อรางเป็นชิ้นเดียวกัน

4.1.3 ค่าที่มาตรฐานกำหนด

ก. การกำหนดค่าความนำระหว่างรางวิ่งไปยังดินสำหรับรางเดี่ยวสำหรับโครงสร้างอุโมงค์ต่อรางวิ่งเดี่ยวคือ 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร

ข. การวัดค่ากระแสรั่วไหลโดยตรงในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้จึงต้องคำนวณค่าแรงดันตกคร่อมตามแนวความยาวบนโครงสร้างเสริมแรงคอนกรีตระหว่างการเดินรถต้องไม่เกิน 100 มิลลิโวลต์ เพื่อที่จะไม่ให้ค่ากระแสรั่วไหลส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของอุโมงค์และโครงสร้างด้านนอกอุโมงค์ ค่าแรงดันตามแนวความยาวระหว่างสองจุดของของโครงสร้างอุโมงค์สามารถคำนวณได้ เพื่อจะให้แน่ใจว่าค่าแรงดันระหว่างโครงสร้างอุโมงค์กับดินมีค่าต่ำลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค. ระบบมีอุปกรณ์สำหรับควบคุมแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างอุโมงค์ที่เป็นโลหะให้แรงดันอยู่ในระดับที่ตรงตามมาตรฐานกำหนด อุปกรณ์จะทำงานอัตโนมัติที่เวลาไม่เกิน 10 วินาที ทำงานแบบปิดวงจรครั้งเดียวค้างสภาวะจนมีค่าแรงดันถึงจุดที่ต้องการ

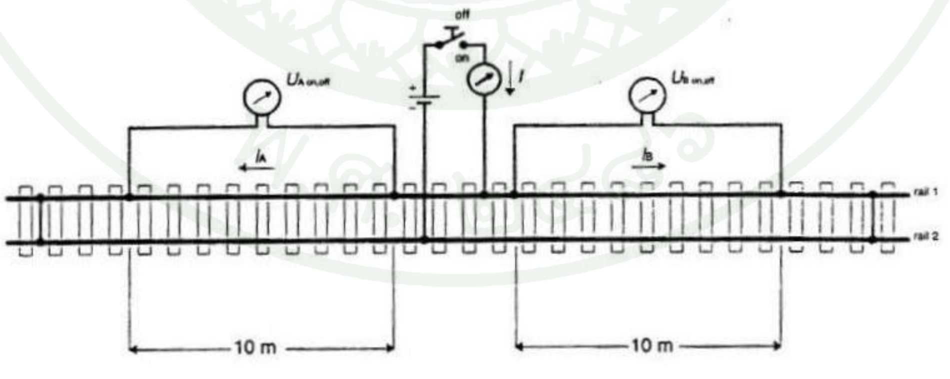
4.1.4 การวัดค่าตามที่มาตรฐานกำหนด

การวัดค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวของรางวิ่ง

ก. ทั่วไป การวัดค่าความต้านทานนั้นเป็นความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันกับกระแสที่ไหลในรางและผลของแรงดันเมื่อแทนค่าแล้วนำไปสู่ค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวของรางได้

ข. การวัดค่าความต้านทานของรางวิ่ง

การวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งจะทำการวัดค่าแรงดันตกคร่อมรางสองช่วงช่วงละ 10 เมตรที่อยู่ใกล้กันแล้วนำค่าแรงดันที่ได้มาคำนวณหาค่าความต้านทาน โดยสมมติฐานว่าไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างรางทั้งสองฝั่งเข้าด้วยกัน หน่วยที่ได้เป็นโอห์ม



ภาพที่ 40 การวัดค่าความต้านทานของรางวิ่งสำหรับรางวิ่งความยาว 10 เมตร

ที่มา: European Committee for Electrotechnical Standardisation (1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$R_{\mathrm{R10m}} = \frac{(U_{\mathrm{A\,on}} - U_{\mathrm{A\,off}}) + (U_{\mathrm{B\,on}} - U_{\mathrm{B\,off}})}{I} \quad (2)$$

R_{R10m} คือ ค่าความต้านทานตามแนวความยาวของรางที่มีความยาว 10 เมตร ของรางที่ 1 ในหน่วยโอห์ม และรางที่ 2 เหมือนกัน

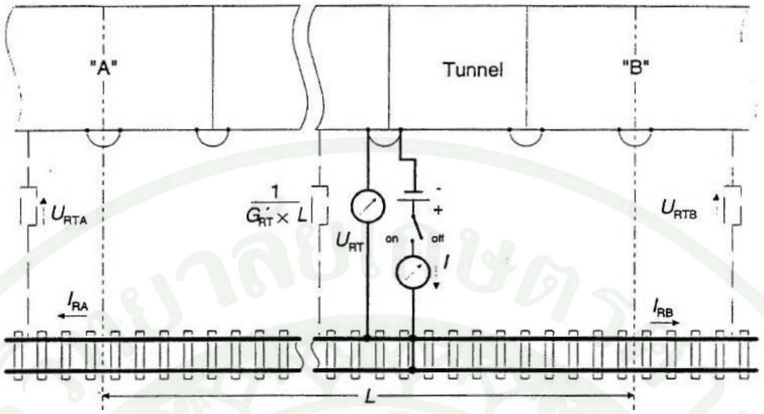
I คือ กระแสที่จ่ายให้ราง หน่วยแอมแปร์

$U_{\mathrm{on,\,off}}$ คือ แรงดันตกคร่อมในรางที่ 1 ในหน่วยโวลต์ และไม่มีการจ่ายกระแส และรางที่ 2 เหมือนกัน

ค. การวัดค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างอุโมงค์

การวัดค่าการจัดเรียงสำหรับค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว G'_{RT} ระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างอุโมงค์โดยรางวิ่งต่อตามแนวความยาวตลอดไม่มีการแยกของรางวิ่งวิธีนี้ใช้กับโครงสร้างรองรับทางวิ่งแบบยกระดับด้วยและโครงสร้างเสริมแรงของรางวิ่งวิธีการคือการจ่ายกระแสเข้าไประหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างแล้วทำการเปิดและปิดสวิตช์จากนั้นทำการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านระหว่างรางกับโครงสร้างที่ขอบเขตด้านซ้ายและขอบเขตด้านขวาแล้วนำค่ามาคำนวณตามสมการ แนะนำระยะการวัดควรไม่เกิน 4 กิโลเมตร หน่วยที่ได้เป็น ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 41 การจัดเรียงการวัดค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว G'_{RT} ระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างอุโมงค์

ที่มา: European Committee for Electrotechnical Standardisation (1998)

$$G'_{\mathrm{RT}} = \frac{3}{L} \times \frac{I - I_{\mathrm{RA}} - I_{\mathrm{RB}}}{\Delta U_{\mathrm{RT}} + \Delta U_{\mathrm{RTA}} + \Delta U_{\mathrm{RTB}}} \qquad \Delta U = U_{\mathrm{on}} - U_{\mathrm{off}} \tag{3}$$

G'_{RT} คือ ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์ หน่วยซิเมนต์ต่อกิโลเมตร

I คือ กระแสที่จ่ายเข้าไป หน่วยแอมแปร์

I_{RA}, I_{RB} คือ กระแสที่ไหลออกไปไกลที่จุดสุดท้ายที่จุดAและBของส่วนของการวัด หน่วยแอมแปร์

U_{RT} คือ แรงดันระหว่างรางกับอุโมงค์ที่จุดจ่ายกระแส หน่วยโวลต์

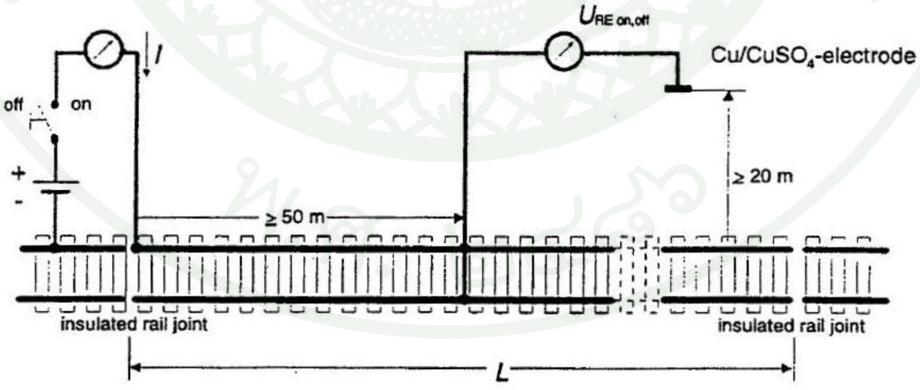
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

U_{RTA}, U_{RTB} คือ แรงดันระหว่างรางกับอุโมงค์ที่จุสุดท้ายที่จุดAและB ของส่วนของอุโมงค์ หน่วยโวลต์

L คือ ค่าความยาวของส่วนที่ทำการวัด หน่วยกิโลเมตร

ง. การวัดค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวสำหรับส่วนของรางในแบบเปิด

การหาค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว G'_{RE} สำหรับส่วนของรางวิ่งในแบบเปิด ความยาวของรางที่จะทำการวัดไม่ควรเกิน 2 กิโลเมตร โดยการทำการจ่ายกระแสเข้ากับรางด้านหนึ่งที่ทำการตัดขาดแยกกับรางอีกด้านหนึ่ง พร้อมกับการทำงานของสวิตช์เปิดและปิด ซึ่งจุดวันอีกด้านหนึ่งของรางจะห่างจากจุดที่มีการจ่ายกระแสระยะทางไม่น้อยกว่า 50 เมตร โดยสุดของรางนั้นจะแยกออกจากรางตามแนวความยาว การวัดค่าแรงดันจะวัดเทียบกับขั้วอ้างอิง $Cu/CuSO_4$-electrode ซึ่งเปรียบเสมือนขั้วดินติดตั้งห่างจากรางวิ่งไม่น้อยกว่า 20 เมตร ค่าแรงดันระหว่างรางวิ่งกับดินและค่ากระแสไหลที่ได้จากการวัดนำไปคำนวณหาค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้



ภาพที่ 42 การหาค่าความนำต่อหน่วยความยาว G'_{RE} สำหรับส่วนของรางแบบเปิด

ที่มา: European Committee for Electrotechnical Standardisation (1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$G'_{\mathrm{RE}} = \frac{1}{L} \times \frac{I}{U_{\mathrm{REon}} - U_{\mathrm{REoff}}} \tag{4}$$

G'_{RE} คือ ค่าความนำต่อหน่วยความยาวระหว่างรางกับดิน หน่วยซิเมนต์ต่อกิโลเมตร (มาตรฐานกำหนดค่า 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร)

I คือ กระแสที่จ่ายเข้าไป หน่วยแอมแปร์

U_{RE} คือ แรงดันระหว่างรางกับดิน หน่วยโวลต์

L คือ ค่าความยาวของส่วนที่ทำการวัด หน่วยกิโลเมตร

4.1.5 การประมาณค่าแรงดันตามแนวความยาวโครงสร้างเสริมแรงโครงการรถไฟฟ้าแบบโครงสร้างใต้ดิน

ค่าแรงดันที่ตกคร่อมตามแนวความยาวของโครงสร้างอุโมงค์ต้องน้อยกว่า 100 มิลลิโวลต์ จะขึ้นอยู่กับค่าต่างๆดังนี้

การคำนวณค่าแรงดันตกคร่อมตามแนวความยาวโครงสร้างเสริมแรงมีดังนี้

$$U_{\mathrm{T}} = 0.5 \times I \times L \times \frac{R'_{\mathrm{R}} \times R'_{\mathrm{T}}}{(R'_{\mathrm{R}} + R'_{\mathrm{T}})} \times \left(1 - \frac{L_{\mathrm{C}}}{L} \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_{\mathrm{C}}}\right)}\right)\right) \tag{5}$$

$$L_{\mathrm{C}} = 1/\sqrt{\left(R'_{\mathrm{R}} + R'_{\mathrm{T}}\right) \times (G'_{\mathrm{RT}})} \tag{6}$$

U_{T} คือ ค่าแรงดันตกคร่อมตามแนวความยาวบนโครงสร้างเสริมแรงคอนกรีต หน่วยโวลต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

G'_{RT} คือ ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์ หน่วยซิเมนต์ต่อกิโลเมตร

I คือ ค่าเฉลี่ยของวงจรรางกระแสไหลกลับของส่วนที่พิจารณาสนใจในช่วงเวลาที่มีโหลดสูงสุด หน่วยแอมแปร์

L คือ ค่าความยาวที่พิจารณาตามเส้นทางช่วงสถานีจ่ายไฟฟ้า หน่วยกิโลเมตร

L_{C} คือ คุณลักษณะความยาวของระบบรางวิ่งโครงสร้าง(ได้จากการคำนวณในสมการที่ 6) หน่วยกิโลเมตร

R'_{R} คือ ค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาว หน่วยโอห์มต่อกิโลเมตร

R'_{T} คือ ค่าความต้านทานของตัวนำต่อเชื่อมระหว่างโครงสร้างต่อหน่วยความยาว หน่วยโอห์มต่อกิโลเมตร

4.1.6 สรุปมาตรฐาน EN 50122-2 กำหนดค่าต่างๆดังนี้

ก. รูปแบบการวัดค่าความต้านทานของรางวิ่ง

ข. วิธีการวัดค่าความนำต่อหนึ่งความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างอุโมงค์ G'_{RT}

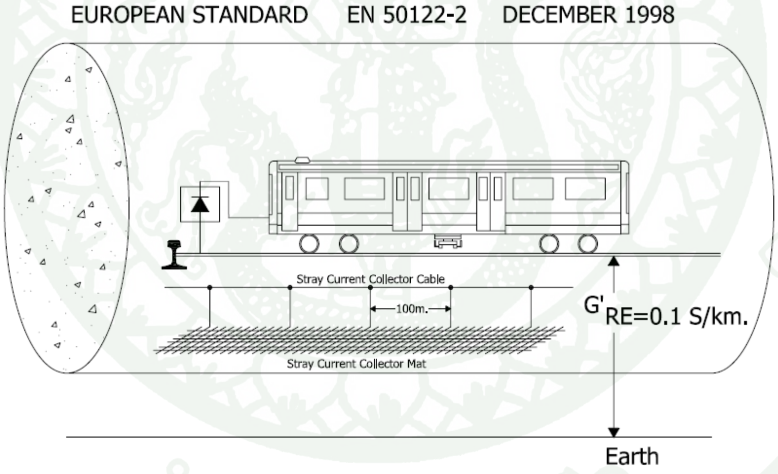
ค. วิธีการวัดค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับดินแบบเปิดที่อยู่นอกอุโมงค์ G'_{RE}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ง. เนื่องจากการวัดค่ากระแสรั่วไหลในทางปฏิบัติไม่สามารถวัดได้โดยตรง มาตรฐานจึงกำหนดการคำนวณค่าแรงดันตกคร่อมตามแนวความยาวบนโครงสร้างเสริมแรงคอนกรีตต้องไม่เกิน 100 มิลลิโวลต์

จ. ค่าความนำระหว่างรางวิ่งไปยังดิน 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร (สำหรับโครงสร้างใต้ดิน, G'_{RE})

ฉ. ขั้นตอนการออกแบบจะมีการคำนวณตามสมการ ค่าที่ต้องการคือ U_T ส่วนค่าที่ต้องแทนค่าในสมการคือ G'_{RT}, I, L, L_C, R'_R และ R'_T



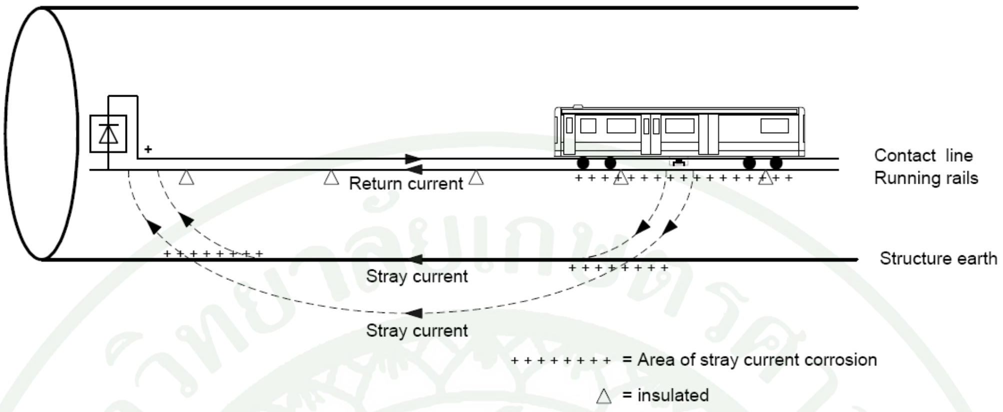
ภาพที่ 43 ลักษณะของโครงสร้างแบบอุโมงค์กับค่าต่างๆที่มาตรฐานกำหนด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.2 ซีเมนส์

ระบบขับเคลื่อนใช้ระดับแรงดัน 750 โวลต์โดยผ่านรางที่สาม ตามมาตรฐาน EN 50122-2 กำหนดว่าแรงดันเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างในการเดินรถปกติต้องมีค่าไม่เกิน 100 มิลลิโวลต์ การใช้กับดักกระแสรั่วไหลเพื่อการป้องกันการเกิดการกัดกร่อนของโลหะโครงสร้างรถไฟฟ้าเองและโครงสร้างที่อยู่รอบข้างด้วยขนาดของพื้นที่หน้าตัดของกับดักกระแสรั่วไหลที่มีขนาด 1600 ตร.มม.ต่อราง ต่อด้วยสายไฟตัวนำทองที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 120 ตร.มม. วางตัวขนานไปตามแนวความยาว กำหนดค่าความนำระหว่างโครงสร้างอุโมงค์กับดินมีค่าเท่ากับ 10 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร และค่าความนำระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร ผลการวิเคราะห์ออกมาได้ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างประมาณ 80 มิลลิโวลต์ ซึ่งต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ การเพิ่มระบบกับดักกระแสรั่วไหลในโครงสร้างอุโมงค์นอกจากนี้ยังช่วยลดค่าแรงดันโครงสร้างที่เป็นเหตุให้เกิดการกัดกร่อนจึงแนะนำให้ต่อเชื่อมระบบกับดักกระแสรั่วไหลเข้ากับชั้นบนสุดของเหล็กโครงสร้างเสริมแรงเพราะการแยกกันระหว่างกับดักกระแสรั่วไหลกับระบบต่อลงดินจะนำไปสู่ค่าแรงดันโครงสร้างที่สูงขึ้น ถ้าเกิดเหตุการฉนวนรองรางเกิดความผิดพร่องทำให้การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างผลที่ตามมาคือการเกิดค่าแรงดันโครงสร้างที่สูงขึ้นในบริเวณใกล้เคียง การเกิดความผิดพร่องระหว่างรางกับโครงสร้างซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดกระแสรั่วไหล สามารถตรวจวัดค่าเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงดันรางกับกับระดับอ้างอิงเหมือนขณะที่รถไฟกำลังเดินรถ เป็นพื้นฐานของระบบการวัดค่ากระแสรั่วไหล ค่าความนำทางไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างที่ลดลงเป็นผลทำให้ลดค่าความอันตรายของการเกิดการกัดกร่อนจากกระแสรั่วไหลลดลง(Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B, 2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 44 ระบบนำกระแสกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนกระแสตรง ส่วนอุโมงค์

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

4.2.1 ข้อมูลเกี่ยวกับรางวิ่งและโครงสร้างเสริมแรง

ก. ความยาวของแนวสายทางประมาณ	20(19.67) กิโลเมตร
ข. จำนวนของสถานีผู้โดยสาร	18 สถานี
ค. จำนวนของสถานีขับเคลื่อน	12 สถานี
ง. จำนวนของอาคารระบายอากาศ	8 แห่ง

4.2.2 โครงสร้างเสริมแรงโลหะสำหรับการป้องกันกระแสรั่วไหล

ที่ชั้นบนของเหล็กโครงสร้างเสริมแรงของโครงสร้างถูกใช้เป็นกับดักกระแสรั่วไหลซึ่งจะนำมาพิจารณาในการคำนวณดังนี้

ก. ค่าความต้านทานของเหล็กที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 170 โอห์มตารางมิลลิเมตรต่อกิโลเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข. พื้นที่หน้าตัดของกับดักกระแสรั่วไหล 1600 ตารางมิลลิเมตร

ค. ค่าความต้านทานกระแสตรงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (R'_S) 106 มิลลิโอห์มต่อ กิโลเมตร

ภาพที่ 45 การติดตั้งกับดักกระแสรั่วไหลก่อนทำการวางรางวิ่งช่วงชานชลา

ที่มา: การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (2552)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 46 การติดตั้งกับดักกระแสรั่วไหลก่อนทำการวางรางวิ่งช่วงชานชลาพร้อมจุดทดสอบ

ที่มา: การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (2552)

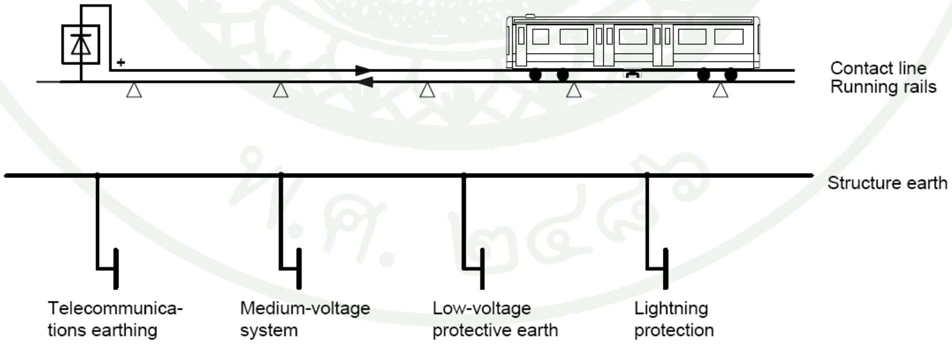
ภาพที่ 47 การติดตั้งกับดักกระแสรั่วไหลก่อนทำการวางรางวิ่งช่วงอุโมงค์

ที่มา: การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (2552)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 48 จุดทดสอบที่เตรียมไว้หลังจากเทคอนกรีตทับกับดักกระแสรั่วไหล

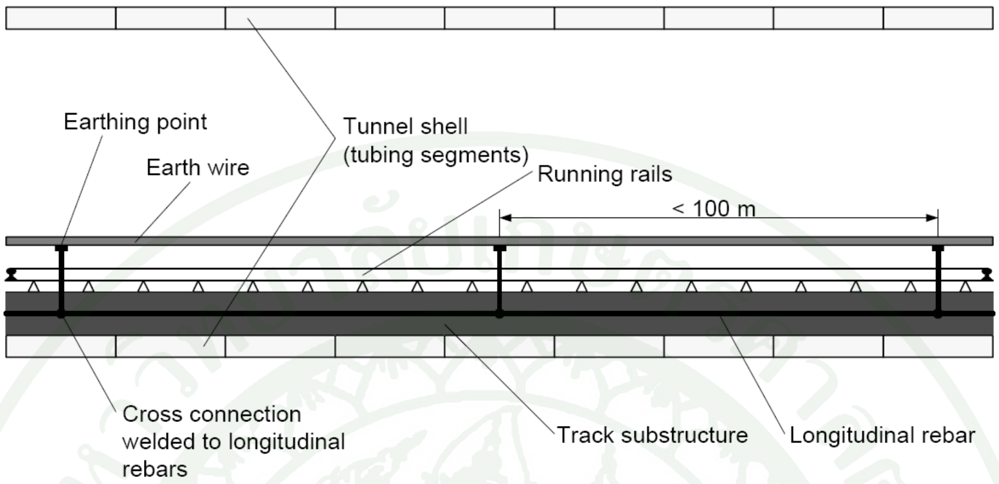
ที่มา: การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (2552)



ภาพที่ 49 การเชื่อมต่อระบบต่างๆเข้ากับโครงสร้างอุโมงค์แต่แยกออกจากกันกับระบบขับเคลื่อน

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 50 ลักษณะของระบบกับดักกระแสรั่วไหลที่สัมพันธ์กับโครงสร้างอุโมงค์

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

4.2.3 ค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวและความต้านทานที่นำมาใช้ในการออกแบบ

ค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวในโครงสร้างส่วนประกอบระบบที่นำมาวิเคราะห์มีดังนี้

ก. ค่าความนำระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างซีเมนส์พิจารณากำหนดสอดคล้องกับมาตรฐานที่ค่า 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร

ข. ค่าความนำระหว่างโครงสร้างกับดินต่อหนึ่งรางวิ่งต่อหนึ่งอุโมงค์ซีเมนส์พิจารณาที่ค่า 10 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร

ค่าความต้านทาน

ก. ที่แต่ละสถานีผู้โดยสารความต้านทานดินของการต่อลงดินซีเมนส์พิจารณากำหนดที่ 0.5 โอห์มต่อการต่อลงดินหนึ่งจุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.2.4 สายนำกระแสกลับ

สายต่อลงดินต่อหนึ่งอุโมงค์ที่ใช้ต่อระบบกับดักกระแสรั่วไหลจะพิจารณาตามข้อมูลดังนี้

ก. ค่าความต้านทานของทองแดงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมีค่า 19.17 โอห์มตารางมิลลิเมตรต่อกิโลเมตร

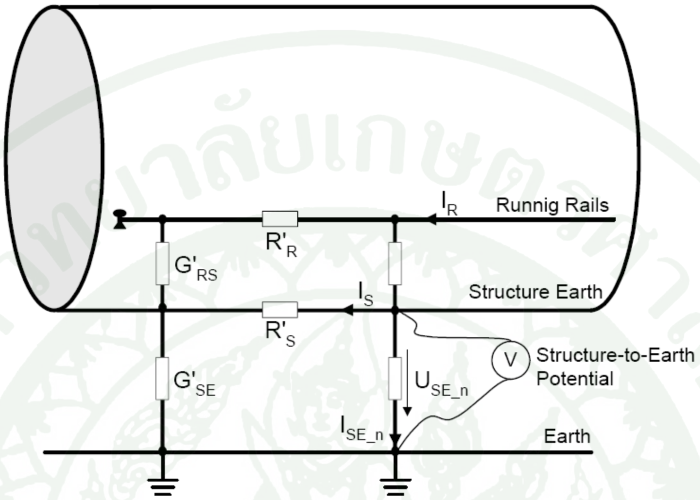
ข. พื้นที่หน้าตัดของสายต่อรางมีขนาด 120 ตารางมิลลิเมตร

ค. ค่าความต้านทานกระแสตรงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมีค่า 160 มิลลิโอห์มต่อกิโลเมตร

4.2.5 สำหรับการวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วไหลของโครงการสายเฉลิมรัชมงคลใช้แบบจำลองของรถไฟรวมถึงการคำนวณทางวงจรไฟฟ้าด้วยข้อมูลจำนวนรถไฟ 6 คัน ปริมาณผู้โดยสาร 57,000 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง ส่วนของรางวิ่งที่ทำหน้าที่เป็นช่องทางกลับของกระแสขับเคลื่อนกระแสที่ไหลนี้ได้ไหลออกจากรางวิ่งแล้วไหลออกไปและวิ่งขนานไปกับตัวนำของโครงสร้างและในดิน ปริมาณกระแสที่รั่วไหลนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันราง ค่าความต้านทานของวงจรนำกระแสกลับและค่าความนำระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างหรือดินตามลำดับ มีการจำลองค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของรางที่สามและแรงดันราง

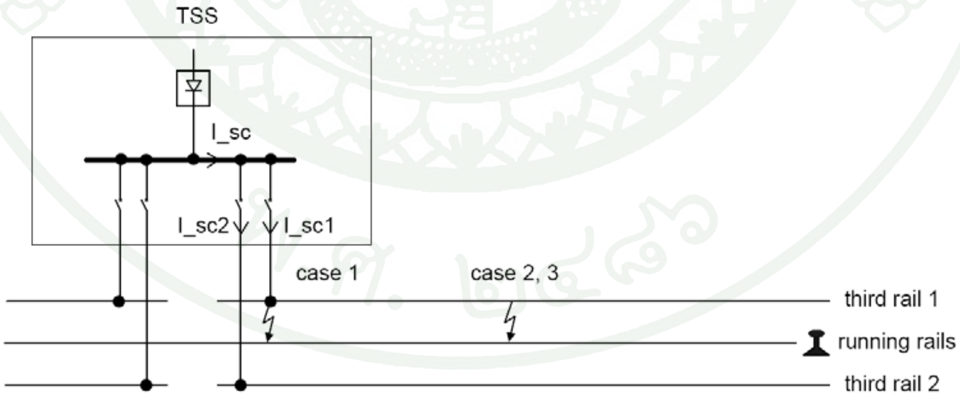
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.2.6 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วไหล



ภาพที่ 51 แบบจำลองโครงสร้างและวงจรไหลกลับของกระแส

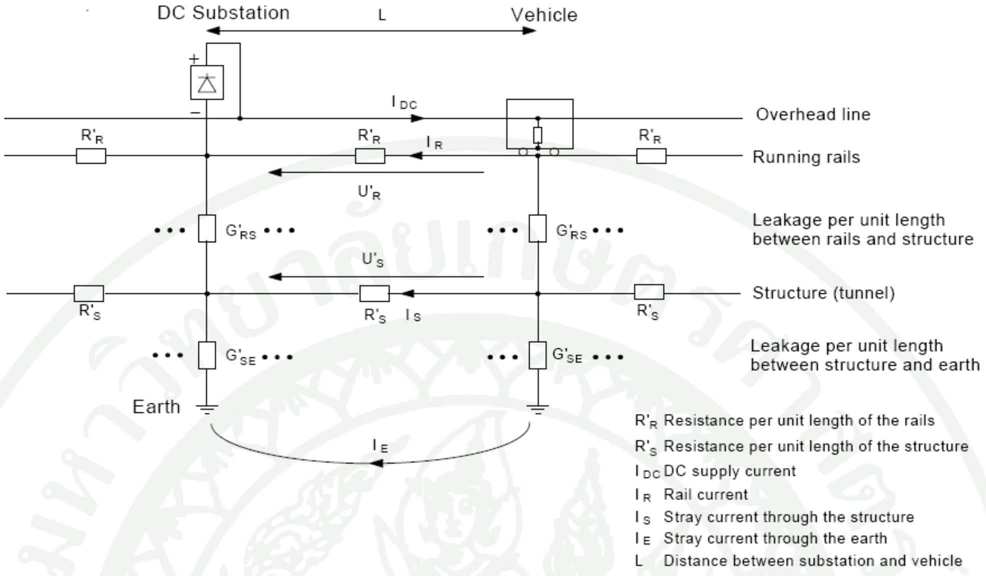
ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)



ภาพที่ 52 ลักษณะการจ่ายไฟของระบบขับเคลื่อน

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



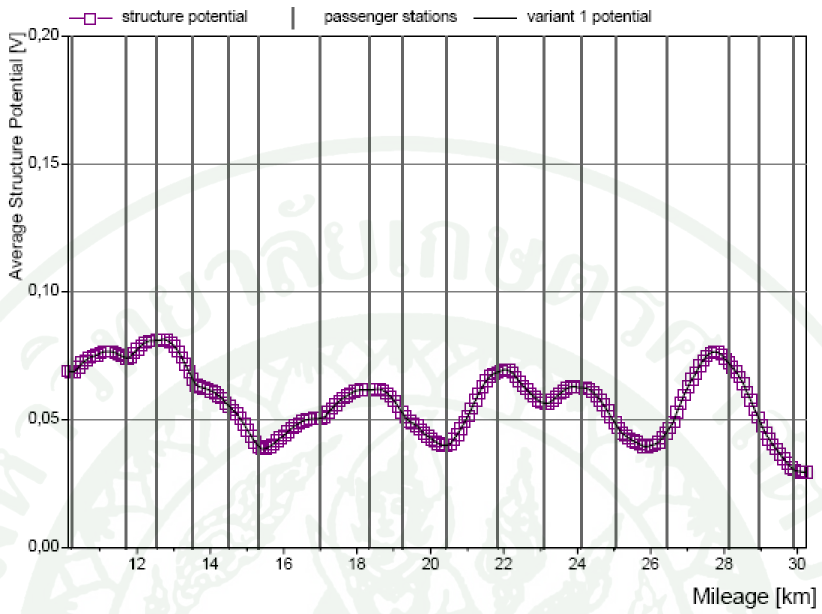
ภาพที่ 53 แบบวงจรไฟฟ้าของระบบที่พิจารณา

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

4.2.7 ผลการจำลองของซีเมนส์

การศึกษาระดับกระแสรั่วไหลโดยการใช้ค่าตามมาตรฐาน EN 50122-2 โดยค่าความนำระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้าง (G'_{RS}) = 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร ค่าความนำระหว่างโครงสร้างกับดิน (G'_{SE}) = 10 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร และค่าความต้านทานลงดินของระบบการต่อลงดิน (R_E) = 0.5 โอห์ม ทำให้ผลที่ออกมาได้ค่าเท่ากับ 80 มิลลิโวลต์ ค่าที่ออกมาต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด กับดักกระแสรั่วไหลเป็นโครงสร้างแรกที่มีผลกับกระแสรั่วไหล ส่วนของกระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านกับดักกระแสรั่วไหลไปยังด้านนอก เพราะฉะนั้นจะไม่เป็นสาเหตุสำหรับการกัดกร่อนของกระแสรั่วไหลของโครงสร้างด้านนอกอุโมงค์เมื่อกับดักกระแสรั่วไหลป้องกันตัวมันเองจากการกัดกร่อนดังนั้นค่าออกแบบเป็นไปตามมาตรฐาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

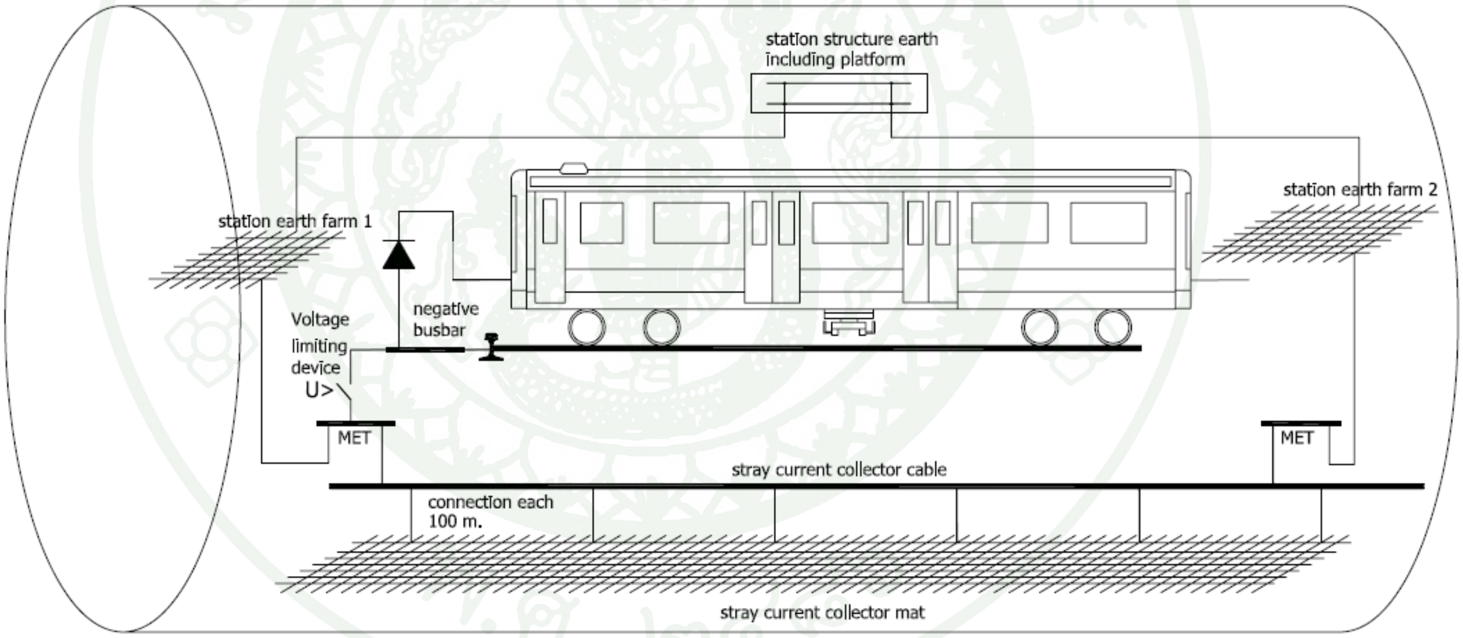


ภาพที่ 54 ค่าแรงดันเฉลี่ย G'RS=0.1 S/km , G'SE=10 S/km , RE=0.5 Ohm

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

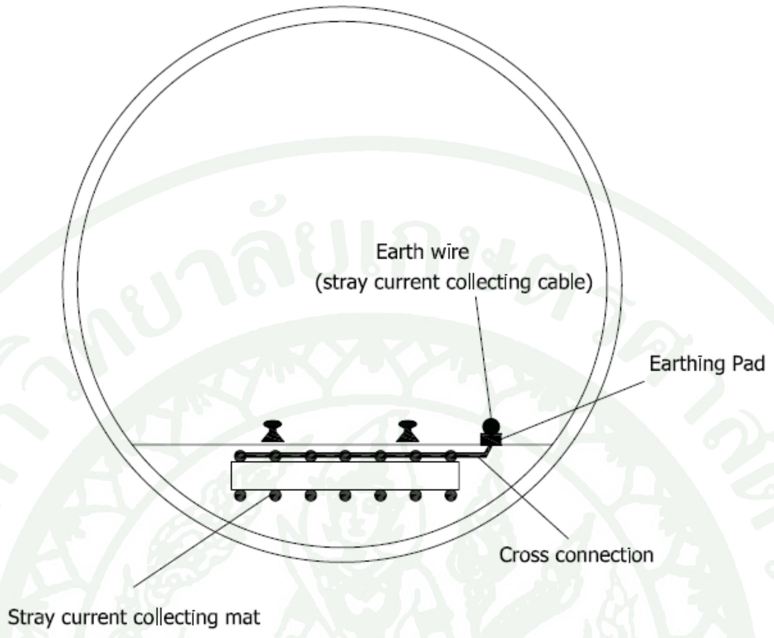
ระบบการต่อลงดินของสถานีกับระบบกับดักกระแสรั่วไหลควรเชื่อมต่อถึงกัน ที่สำคัญอย่างยิ่งคือฉนวนระหว่างรางวิ่งกับดินต้องทำการติดตั้งโดยไม่มีส่วนใดต่อเชื่อมกับโครงสร้าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 55 ระบบการเชื่อมต่อภายในโครงสร้างอุโมงค์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

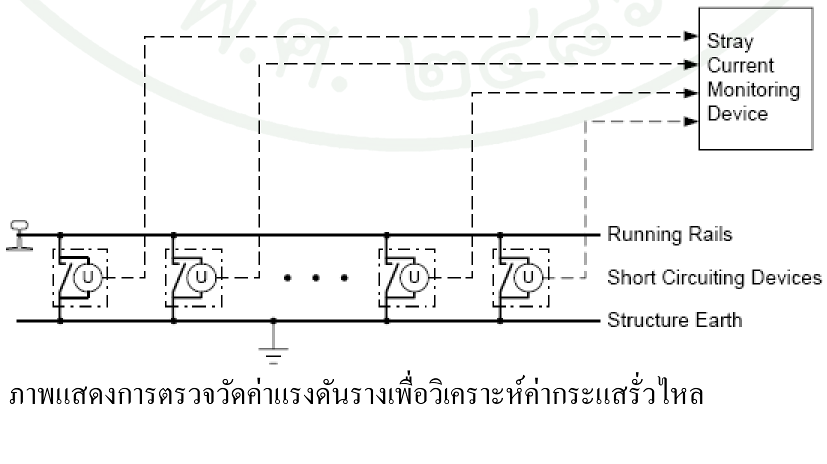


ภาพที่ 56 การจัดเรียงระบบกับดักกระแสรั่วไหลภายในอุโมงค์ช่วงการก่อสร้าง

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

4.2.8 การตรวจวัดค่าเพื่อตรวจสอบการเกิดกระแสรั่วไหล

ก. เพื่อวัดค่าแรงดันระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างอุโมงค์ระหว่างการเดินรถ

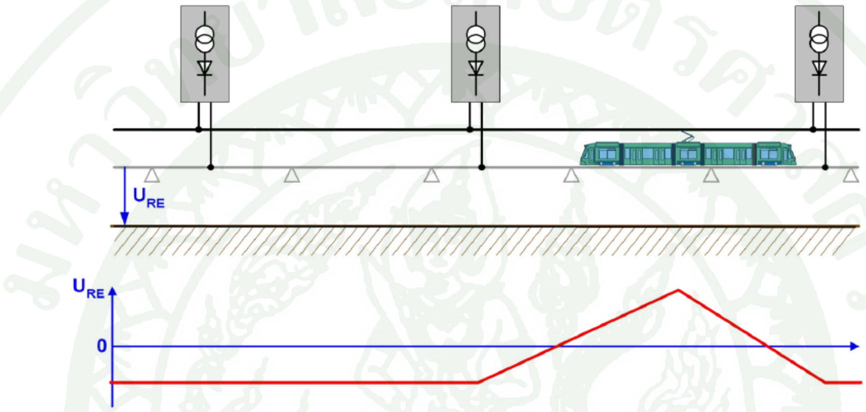


ภาพที่ 57 ภาพแสดงการตรวจวัดค่าแรงดันรางเพื่อวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วไหล

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

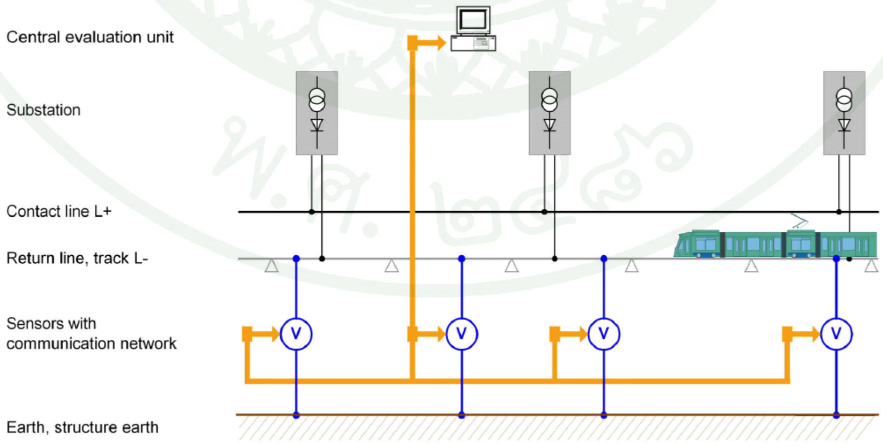
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข. ระบบส่วนกลางการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหลคือการวัดค่าแรงดันจากอุปกรณ์ลัดวงจร ซึ่งติดตั้งไว้ที่สถานีผู้โดยสาร โดยจะเปรียบเทียบค่าแรงดันเฉลี่ยด้านบวกกับค่าอ้างอิงจากระบบฉนวนและการเก็บค่าในอุปกรณ์ตรวจจับ ในกรณีที่มีความขัดแย้งระหว่างค่าที่เก็บบันทึกไว้กับค่าที่วัดได้ตัวอุปกรณ์จะทำการลัดวงจรและแจ้งเหตุ



ภาพที่ 58 ภาพแสดงผลของการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหลของซีเมนส์

ที่มา: Siemens AG SITRAS® (2003)

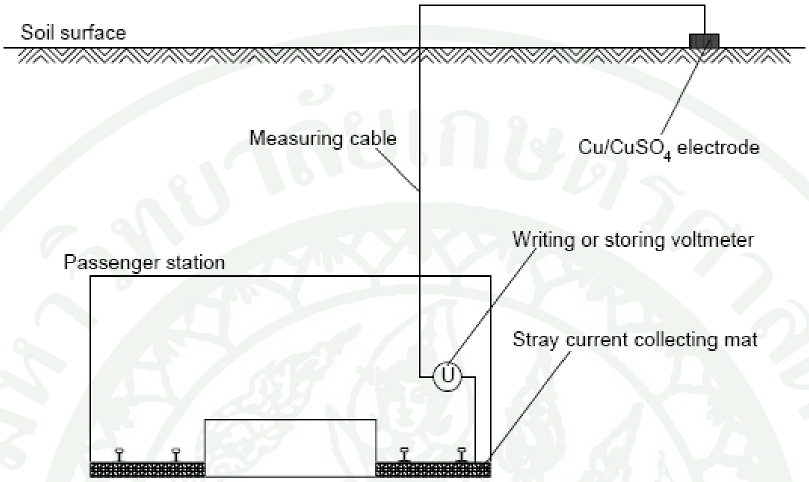


ภาพที่ 59 ภาพแสดงของการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหลเพื่อรักษาระดับแรงดันไม่ให้เกินกำหนด

ที่มา: Siemens AG SITRAS® (2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค. การวัดค่าความต่างของแรงดันระหว่างโครงสร้างกับดิน



ภาพที่ 60 การจัดเรียงการวัดค่าแรงดันโครงสร้าง

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

ง. การวัดค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้าง กำหนดตามมาตรฐาน EN 50122-2 ไม่ควรเกิน 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร

ค่าแรงดันจากการวัดระหว่างโครงสร้างเพื่อตรวจสอบและอ้างอิงด้วยขั้วทองแดง Cu/CuSO4 วางอยู่บนผิวดินใกล้เคียงกับโครงสร้าง ค่าแรงดันถูกวัดใน ชั่วโมงการจราจรเร่งด่วน การจราจรที่ธรรมดา และไม่มีการจราจร ตามลำดับ

กฎเกณฑ์ค่าแรงดันที่ยกขึ้นระหว่างการจราจรเร่งด่วนและธรรมดาต่ำกว่า 100 มิลลิโวลต์ โดยทั่วไปแล้วการวัดจะวัดตลอด 24 ชั่วโมง รวมถึงสถานการณ์ทั้งสองแบบโดยการบันทึกหรือเก็บค่าจากการวัด

การวัดควรที่จะทำตั้งแต่การเริ่มการเดินรถเทียบกับค่าอ้างอิงและทำซ้ำแบบนี้ต่อไปถ้าการวัดค่าแรงดันรางในสถานที่ที่ไม่ได้แนะนำไว้ก็ให้ทำการวัดในที่ใหม่ๆด้วย ควรที่จะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จดจำการตรวจวัดของระบบการตรวจกระแสรั่วไหลทำงานร่วมกับอุปกรณ์ลัดวงจรค่าแรงดันจากรางไปยังโครงสร้าง ซึ่งอนุญาตให้ตรวจวัดค่าเบี่ยงเบนจากสภาวะการเริ่มต้น

4.2.9 การออกแบบระบบ Power Supply

ก. กำหนดค่าความต้านทานของรางที่สาม 0.007 โอห์มต่อกิโลเมตร

ข. ค่าความต้านทานรางวิ่ง(UIC54) 0.0377 โอห์มต่อกิโลเมตร

ค. ค่าความนำระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้าง 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตรต่อราง

ง. การคำนวณค่าแรงดันรางสูงสุดต้องน้อยกว่าที่มาตรฐานกำหนด EN 50122-1 อุปกรณ์จำกัดแรงดันจะถูกติดตั้งทุกสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเพื่อให้แน่ใจว่าค่าแรงดันจะไม่เกิน 120 โวลต์ขณะที่รถวิ่งเป็นเวลา 300 วินาที

จ. พื้นที่กระแสรั่วไหลคือพื้นที่ที่มีกระแสไหลเข้าออกระหว่างระบบขับเคลื่อนกับโลหะของโครงสร้างหรือดิน

ฉ. ไม่อนุญาตให้มีความนำทางไฟฟ้าที่ต่อเชื่อมถึงกันระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้าง

ช. อุปกรณ์กำกัดแรงดันรางจะทำการปิดวงจรเมื่อแรงดันเกินที่กำหนดทำงานอัตโนมัติและค้างสภาวะไว้ 10 วินาที

4.2.10 คำสำคัญตามมาตรฐาน

ก. มาตรฐาน EN 50122-1 Earth ดิน, Rail Potential ค่าแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างรางวิ่งเทียบดินในขณะเดินรถ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

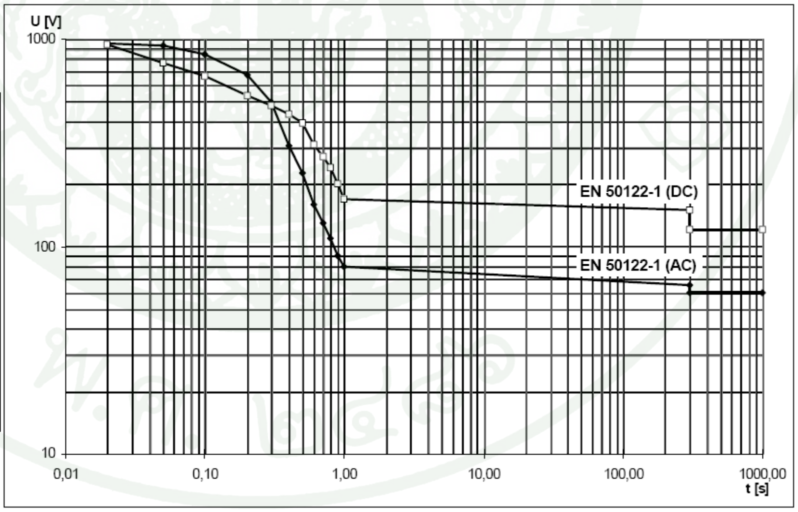
ข. มาตรฐาน EN 50122-2 Structure earth โครงสร้างอุโมงค์, Return circuit ตัวนำที่เป็นส่วนที่จะนำกระแสกลับไปยังสถานีไฟฟ้าเช่น รางวิ่ง รางนำกระแสกลับ ตัวนำกระแสกลับ สายไฟนำกระแสกลับ, Stray current, Stray current zone พื้นที่ที่กระแสเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างแหล่งจ่ายระบบขับเคลื่อนกับโครงสร้างโลหะหรือดิน

4.2.11 ความปลอดภัยต่อบุคคล

ตามมาตรฐาน EN 50122-2 ระหว่างการเดินรถปกติค่าแรงดันสัมผัสต้องไม่เกิน 120 โวลต์ ค่าที่กำหนดบนผลกระทบที่เกิดกับร่างกายมนุษย์ตามมาตรฐาน IEC 479-1

การคำนวณค่าแรงดันรางให้ต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด EN 50122-1 ในช่วงเริ่มแรกและทำการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดแรงดันที่ทุกสถานีแหล่งจ่ายเพื่อรักษาระดับแรงดันไม่ให้เกิน 120 โวลต์ ระหว่างช่วงเวลาการเดินรถ 300 วินาที

	EN 50122-1	EN 50122-1
t [s]	U [V] (AC)	U [V] (DC)
0,02	954	940
0,05	935	770
0,10	842	660
0,20	670	535
0,30	497	480
0,40	305	435
0,50	225	395
0,60	160	310
0,70	130	270
0,80	110	240
0,90	90	200
1,00	80	170
≤ 300	65	150
> 300	60	120



ภาพที่ 61 แรงดันสัมผัสที่ได้จากการคำนวณช่วงการเดินรถที่ 300 วินาที

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.2.12 กระแสรั่วไหล

กระแสที่เกิดการรั่วไหลไปในดิน หรือไหลขนานไปกับโครงสร้างโลหะเสริมแรงทำให้เกิด electrolytic corossion

4.2.13 อุปกรณ์ลัดวงจร

อุปกรณ์ลัดวงจรจะทำให้แน่ใจว่าค่าแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างจะไม่เกินที่กำหนดจนเป็นอันตรายจากการสัมผัส อุปกรณ์จำกัดแรงดันจะเชื่อมต่อกับระบบ SCADA ตามการออกแบบมีอุปกรณ์จำกัดแรงดันอยู่ 19 จุดแต่ละจุดประกอบด้วย หน้าสัมผัสกระแสตรง(DC Contactor)จำนวน 1 ชิ้น รีเลย์ตรวจวัดแรงดัน(Voltage monitor relays)จำนวน 2 ชิ้น ตัวส่งสัญญาณไปยัง SCADA(Voltage transduser for SCADA)จำนวน 1 ชิ้น ชุดควบคุม (control equipment for control incl. interlocking)จำนวน 1 ชุด

4.2.14 สรุปซีเมนส์ออกแบบระบบขับเคลื่อนที่ระดับแรงดันกระแสตรง 750 โวลต์จ่ายแรงดันผ่านรางที่สามเพื่อให้ระบบการออกแบบคำนวณคิดที่ปริมาณผู้โดยสาร 57,000 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง จากข้อกำหนดของมาตรฐาน EN 50122-2 แรงดันที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างต้องไม่เกิน 100 มิลลิโวลต์

ก. ค่าความนำระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างอุโมงค์มีค่า 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร

ข. ค่าความนำระหว่างโครงสร้างอุโมงค์กับดินมีค่า 10 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร

ค. ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างในส่วนเหล็กเสริมแรงรองรับรางวิ่งที่ทำหน้าที่เป็นกับดักกระแสรั่วไหลนำมาคำนวณในส่วนค่าความต้านทานเหล็กที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมีค่า 170 โอห์มตารางมิลลิเมตรต่อกิโลเมตร พื้นที่หน้าตัดของกับดักกระแสรั่วไหลมีขนาด 1600 ตารางมิลลิเมตร ค่าความต้านทาน (R'_S) กระแสตรงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมีค่า 106 มิลลิโอห์มต่อกิโลเมตร

ง. ค่าความต้านทานลงดินของระบบการต่อลงดินกำหนดที่ 0.5 โอห์ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จ. ข้อมูลเกี่ยวกับสายนำกระแสกลับใช้ต่อกับดักกระแสรั่วไหลนำมาคำนวณ คือค่าความต้านทานของทองแดงที่ 40 องศาเซลเซียสมีค่า 19.17 โอห์มตารางมิลลิเมตรต่อกิโลเมตร พื้นที่หน้าตัดของสายต่อรางมีพื้นที่ 120 ตารางมิลลิเมตร ค่าความต้านทานกระแสตรงที่ 40 องศาเซลเซียสมีค่า 160 มิลลิโอห์มต่อกิโลเมตร

ฉ. ปริมาณกระแสรั่วไหลนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันรางซึ่งเกี่ยวพันกับค่าความนำระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างหรือดิน

ช. ผลการคำนวณที่ออกมามีค่าแรงดันเฉลี่ยมีค่า 80 มิลลิโวลต์ เป็นไปตามมาตรฐานEN 50122-2 ที่ระบุไว้ไม่ให้เกิน 100 มิลลิโวลต์ นอกเหนือจากการคำนวณในช่วงการออกแบบแล้วยังมีการตรวจวัดค่าแรงดันระหว่างการเดินรถและใช้อุปกรณ์จำกัดแรงดันควบคุมแรงดันที่เกิดขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. การวิเคราะห์ข้อมูลการป้องกันกระแสรั่วไหลโดยโปรแกรมการคำนวณเทียบเคียง

สำหรับการวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วไหลของโครงการสายเฉลิมรัชมงคลโดยซีเมนส์ใช้แบบจำลองของรถไฟรวมถึงการคำนวณทางวงจรไฟฟ้าด้วยข้อมูลจำนวนรถไฟ 6 คัน ปริมาณผู้โดยสาร 57,000 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง ส่วนของรางวิ่งที่ทำหน้าที่เป็นช่องทางกลับของกระแสขับเคลื่อนกระแสที่ไหลนี้ได้ไหลออกจากรางวิ่งแล้วไหลออกไปและวิ่งขนานไปกับตัวนำของโครงสร้างและในดิน ปริมาณกระแสที่รั่วไหลนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันราง ค่าความต้านทานของวงจรนำกระแสกลับและค่าความนำระหว่างรางวิ่งกับโครงสร้างหรือดินตามลำดับ มีการจำลองค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของรางที่สามและแรงดันราง

การทดลองคำนวณเทียบเคียงจะนำค่าตัวแปรต่างๆที่ซีเมนส์ได้กำหนดในการออกแบบระบบขับเคลื่อนสำหรับโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลมาแทนค่า ตามมาตรฐาน EN 50122-2 กำหนดสมการการหาค่าแรงดันตกคร่อมตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรงระบบราง U_{T} ตามสมการที่ 6 และสมการที่ 5 เป็นการคำนวณแบบไม่มีการเคลื่อนไหวของตัวรถไฟฟ้าและไม่มีโหลดบรรทุก

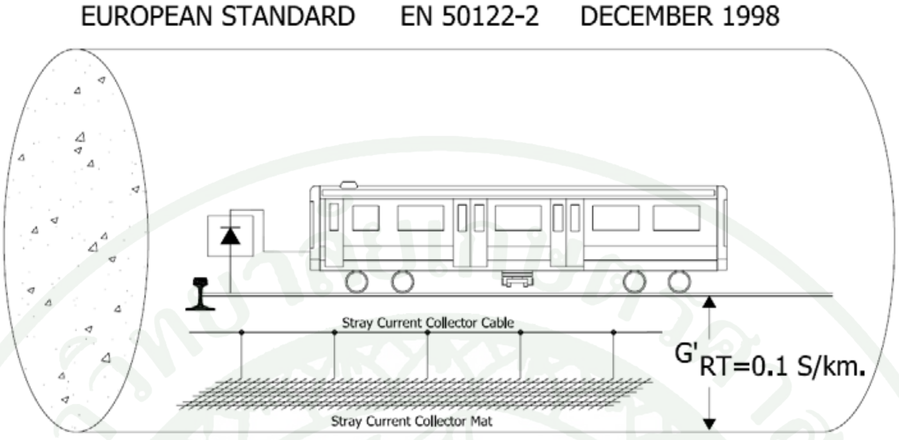
สมการสำหรับการหาค่าแรงดันตกคร่อมที่เกิดบนโครงสร้างเสริมแรงอุโมงค์

$$U_{\mathrm{T}} = 0.5 \times I \times L \times \frac{R'_{\mathrm{R}} \times R'_{\mathrm{T}}}{(R'_{\mathrm{R}} + R'_{\mathrm{T}})} \times \left(1 - \frac{L_{\mathrm{C}}}{L} \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_{\mathrm{C}}}\right)}\right)\right) \qquad (5)$$

$$L_{\mathrm{C}} = 1/\sqrt{\left(R'_{\mathrm{R}} + R'_{\mathrm{T}}\right) \times (G'_{\mathrm{RT}})} \qquad (6)$$

U_{T} คือ ค่าแรงดันตกคร่อมตามแนวความยาวบนโครงสร้างเสริมแรงคอนกรีต หน่วยโวลต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

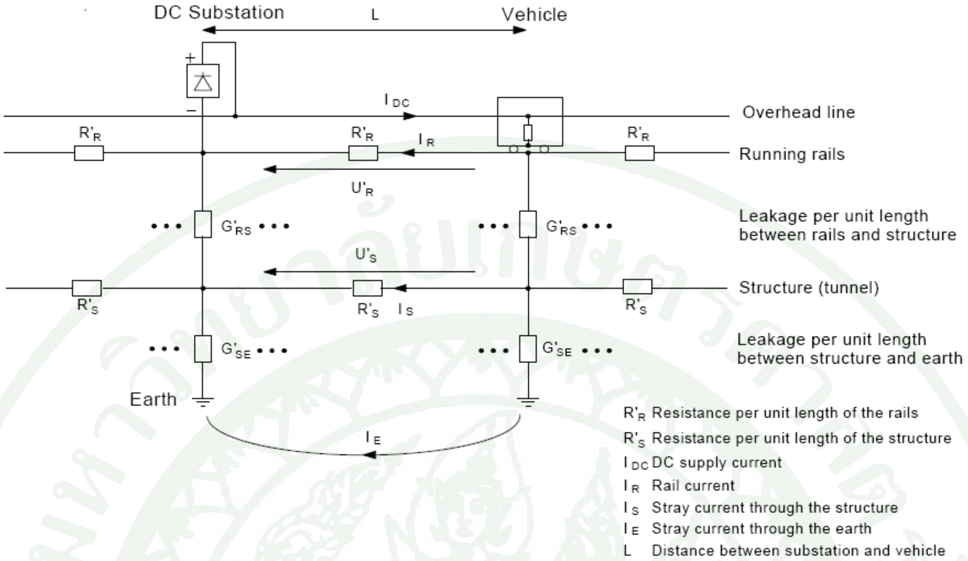


ภาพที่ 62 ลักษณะโครงสร้างอุโมงค์ที่เกิดแรงดันตกคร่อม U_T

G'_{RT} คือ ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์ หน่วยซิเมนต์ต่อกิโลเมตร (กำหนดตามมาตรฐาน EN 50122-2 มีค่าเท่ากับ 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร)

I คือ ค่าเฉลี่ยของวงจรรางกระแสไหลกลับของส่วนที่พิจารณาสนใจในช่วงเวลาที่มีโหลดสูงสุด หน่วยแอมแปร์ (กำหนดการออกแบบมีค่าเท่ากับ 1000 แอมแปร์)

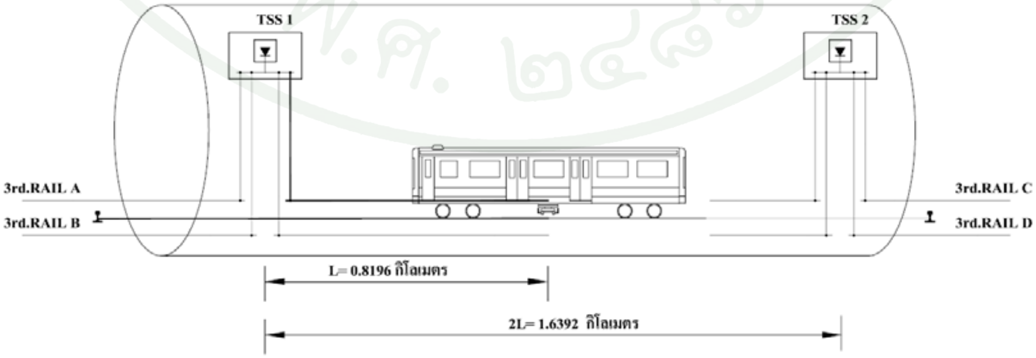
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 63 ลักษณะกระแสที่เกิดการรั่วไหล I_S, I_E

ที่มา: Siemens Ltd. Submission No: PSY/0014.B (2002)

L คือ ค่าความยาวที่พิจารณาตามเส้นทางช่วงสถานีจ่ายไฟฟ้า หน่วยกิโลเมตร (กำหนดตามการออกแบบของซีเมนส์ ระยะทางสายทางทั้งหมด 19.67 กิโลเมตรแบ่งระยะทางเท่าๆกันตามจำนวนสถานีไฟฟ้า 12 สถานี ได้ระยะห่างระหว่างสองสถานีไฟฟ้า (19.67/12)=1.6392 กิโลเมตร แบ่งการรับกระแสไฟฟ้ากึ่งกลางระหว่างสองสถานีจ่ายไฟเป็นระยะทาง (1.6392/2)= 0.8196 กิโลเมตร)



ภาพที่ 64 ลักษณะรางจ่ายไฟ (รางที่สาม 3 rd.Rail) ระหว่างสองสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

L_C คือ คุณลักษณะความยาวของระบบรางวิ่งโครงสร้าง (ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 6) หน่วยกิโลเมตร

$R'_{R(2\ rails)}$ คือ ค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาว หน่วยโอห์มต่อกิโลเมตร (กำหนดตามการออกแบบของซีเมนส์ รางวิ่งที่ใช้เป็นไปตามมาตรฐาน UIC54 ที่ความยาว 1 เมตรมีน้ำหนัก 54 กิโลกรัม มีค่าความต้านทาน 0.037 โอห์มต่อกิโลเมตรต่อหนึ่งรางวิ่งรางเดี่ยว การใช้รางวิ่งเป็นตัวนำกลับของกระแสขับเคลื่อนสองรางคู่กันความต้านทานขนานกันเป็นค่า (0.037//0.037)=0.0185 โอห์มต่อกิโลเมตร)

R'_T คือ ค่าความต้านทานของตัวนำต่อเชื่อมระหว่างโครงสร้างต่อหน่วยความยาว หน่วยโอห์มต่อกิโลเมตร (กำหนดตามการออกแบบของซีเมนส์ มีสองส่วนคือโครงสร้างเสริมแรงโลหะสำหรับการป้องกันกระแสรั่วไหลมีค่า 106 มิลลิโอห์มต่อกิโลเมตตร และสายนำกระแสกลับมีค่า 160 มิลลิโอห์มต่อกิโลเมตร วางตัวขนานกันค่าความต้านทานขนานกันจึงมีค่า (106//160)=0.0638 โอห์มต่อกิโลเมตร)

5.1 การคำนวณที่ 1 คำนวณค่าแรงดันตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรงระบบราง U_T

$G'_{RT} = 0.1\,\mathrm{S/km}$, $I = 1000\ \mathrm{A}$, $L = 0.8196\ \mathrm{km}$, $R'_{R(2\ rails)} = 0.0185\ \Omega/\mathrm{km}$, $R'_T = 0.0638\ \Omega/\mathrm{km}$

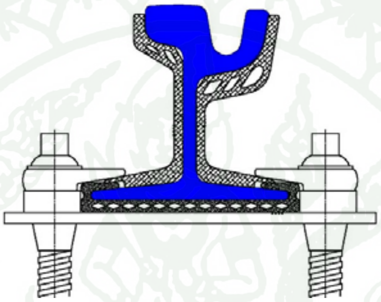
ตารางที่ 2 ผลการคำนวณค่าแรงดันตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรงระบบราง U_T

$U_T(\mathrm{V})$	0.2131 V
$I = (\mathrm{A})$	1000 A

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าแรงดัน U_{T} ที่ออกมามีค่าค่าหนึ่งซึ่งสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด

5.2 การคำนวณที่ 2 ปรับค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์ตามที่กำหนดในมาตรฐาน EN 50122-2 จาก 0.5 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร, 0.1 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตรและ 0.025 ซิเมนต์ต่อกิโลเมตร



ภาพที่ 65 การใช้รางวิ่งที่มีความเป็นฉนวนอยู่รอบๆเพื่อไม่ให้โลหะสัมผัสกับโครงสร้างอุโมงค์เป็นการลดความนำลง

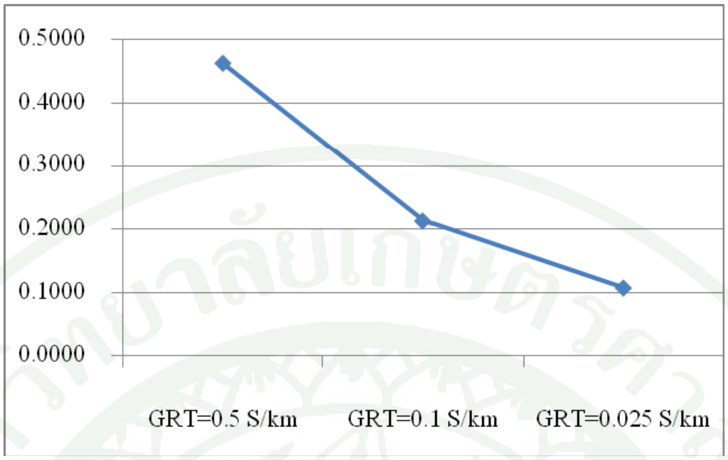
ที่มา: PHOENIX Dichtungstechnik GmbH (2008)

$$I = 1000\ \mathrm{A},\ L = 0.8196\ \mathrm{km},\ R'_{\mathrm{R(2\ rails)}} = 0.0185\ \Omega/\mathrm{km},\ R'_{\mathrm{T}} = 0.0638\ \Omega/\mathrm{km}$$

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณปรับค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์

G'_{RT} (S/km)	G'_{RT} (0.5 S/km)	G'_{RT} (0.1 S/km)	G'_{RT} (0.025 S/km)
U_{T} (V)	0.4624 V	0.2131 V	0.1079 V

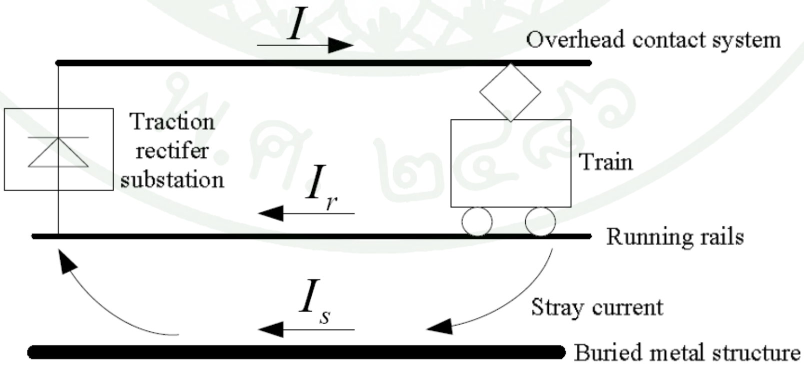
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 66 ผลการคำนวณปรับค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์

ถ้าลดความนำ G'_{RT} ลงได้จะทำให้ค่าแรงดัน U_T ตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรงระบบรางลดลง

5.3 การคำนวณที่ 3 ปรับค่าเฉลี่ยของวงจรรางกระแสไหลกลับของส่วนที่พิจารณาสนใจในช่วงเวลาที่มีโหลดสูงสุด I จาก 1000 แอมแปร์, 900 แอมแปร์ และ 800 แอมแปร์



ภาพที่ 67 การปรับขนาดของกระแสที่จ่ายให้ระบบขับเคลื่อน

ที่มา: Mu and Zhouwei (2007)

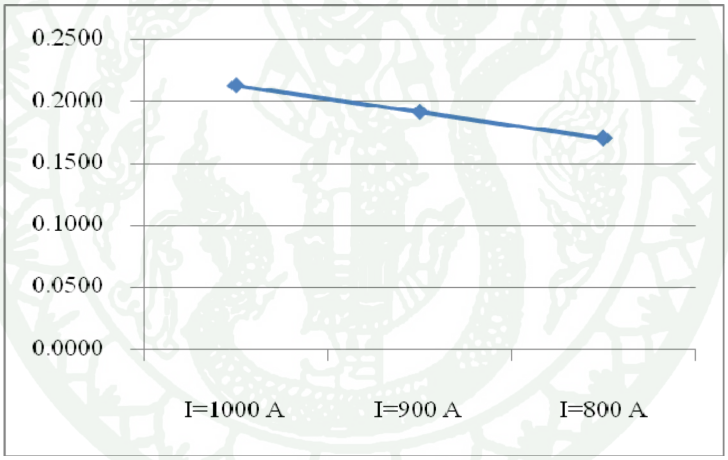
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

G'_{RT} (0.1 S / km), $L = 0.8196$ km, $R'_{\mathrm{R(2\ rails)}} = 0.0185\ \Omega/\mathrm{km}$,

$R'_{\mathrm{T}} = 0.0638\ \Omega/\mathrm{km}$

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณปรับค่าเฉลี่ยของกระแสส่วนที่พิจารณาในช่วงเวลาที่มีโหลดสูงสุด

$I = $ (A)	$I = 1000$ A	$I = 900$ A	$I = 800$ A
U_{T} (V)	0.2131 V	0.1918 V	0.1705 V



ภาพที่ 68 ผลการคำนวณปรับค่าเฉลี่ยของกระแสส่วนที่พิจารณาในช่วงเวลาที่มีโหลดสูงสุด

ถ้าลดค่าเฉลี่ยของวงจรรางกระแส I ไหลกลับของส่วนที่พิจารณาสนใจในช่วงเวลาที่มีโหลดสูงสุดจะทำให้ค่าแรงดัน U_{T} ตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรงระบบรางลดลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.4 การคำนวณที่ 4 ทดลองปรับค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาวโดยการใช้รางที่สี่เพิ่มเข้ามาช่วยในการนำกระแสกลับ

ภาพที่ 69 การใช้รางวิ่งที่สี่เพิ่มเข้ามาในระบบ

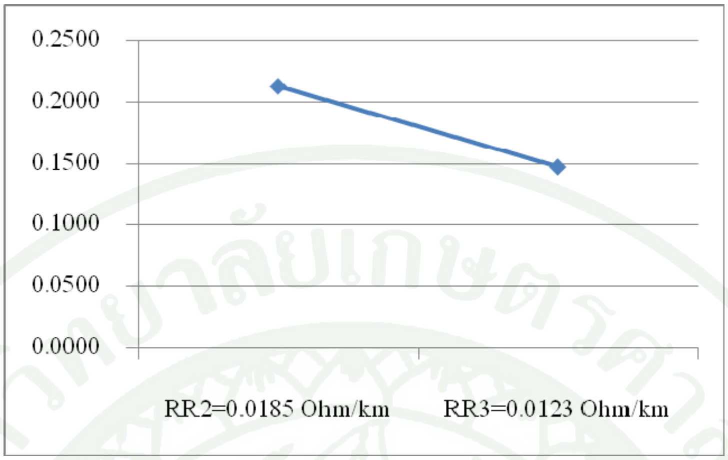
ที่มา: Jubilation (2002)

$G'_{\mathrm{RT}}\ (0.1\,\mathrm{S/km})$, $L = 0.8196\ \mathrm{km}$, $I = 1000\ \mathrm{A}$, $R'_{\mathrm{T}} = 0.0638\ \Omega/\mathrm{km}$, $R'_{\mathrm{R(3\ rails)}} = (0.0185//0.037) = 0.0123\ \Omega/\mathrm{km}$

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณปรับค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาวโดยการใช้รางที่สี่เพิ่มเข้ามาทำให้รางนำกระแสกลับมีจำนวนสามราง

$R'_{\mathrm{R}} = (\Omega/\mathrm{km})$	$R'_{\mathrm{R(2\ rails)}} = (0.0185\ \Omega/\mathrm{km})$	$R'_{\mathrm{R(3\ rails)}} = (0.0123\ \Omega/\mathrm{km})$
$U_{\mathrm{T}}\,(\mathrm{V})$	0.2131 V	0.1478 V

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 70 ผลการคำนวณปรับค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาวโดยการใช้รางที่สี่เพิ่มเข้ามาทำให้รางนำกระแสกลับมีจำนวนสามราง

ถ้าลดค่าความต้านทานของรางวิ่งนำกระแสกลับโดยการเพิ่มรางที่สี่จะทำให้ค่าแรงดันตามแนวความยาวในโครงสร้างเสริมแรงระบบราง U_T ลดลง

จากการคำนวณเทียบเคียงตามการทดลองต่างๆแล้วพบว่าการปรับค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวระหว่างรางวิ่งกับอุโมงค์ลง มีผลต่อการลดค่าแรงดันตกคร่อมโครงสร้างมากที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. การตรวจวัดค่าแรงดันรางเพื่อป้องกันการเกิดกระแสรั่วไหล

6.1 หลักการของระบบ

การตรวจวัดการเกิดกระแสรั่วไหลมีหลักการคือตรวจวัดค่าความต่างศักด์ระหว่างรางวิ่ง(Rail) กับดิน (Structure Earth)ในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง ผลที่ออกมาเป็นการประเมินประสิทธิภาพของความเป็นฉนวนของอุปกรณ์รองรางเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความเสียหายจากการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากกระแสรั่วไหล กระแสรั่วไหลนี้จะวิ่งผ่านรางวิ่งลงสู่ดินเข้าไปยังโครงสร้างอุโมงค์หรือเข้าไปยังท่อน้ำหรือท่อน้ำมัน จึงมีการตรวจวัดตลอดความยาวแนวราง ระบบ SITRAS ® SMS สามารถแสดงผลของตำแหน่งที่ฉนวนเกิดความเสื่อมได้ เมื่อพบความผิดพลาดเจ้าหน้าที่สามารถเข้าไปแก้ปัญหาการเกิดบกพร่องที่ฉนวน ณ ตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้โดยตรง อุปกรณ์ตรวจวัดซึ่งจะติดตั้งที่ตำแหน่งสถานีผู้โดยสาร ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงดันกับค่าอ้างอิงที่เก็บในระบบเพื่อจะได้ทราบถึงประสิทธิภาพความเป็นฉนวน กรณีที่เกิดความแตกต่างระหว่างค่าที่เก็บไว้กับค่าที่วัดได้ระบบจะรายงานความผิดพร่องออกมา

6.2 สถาปัตยกรรมระบบและการส่งผ่านข้อมูล

แต่ละสถานีผู้โดยสารจะมีอุปกรณ์ตรวจวัดและ SCD (short-circuiting device) ซึ่งจะทำการวัดค่าแรงดันระหว่างรางวิ่ง (negative return) กับดิน (structure earth) ค่าที่วัดได้จะส่งสัญญาณผ่านด้วยค่ากระแส 4…20 mA ไปยัง RTU (remote terminal unit) ที่ติดตั้งในแต่ละสถานีที่ออกแบบซึ่งทั้งหมดมีอยู่ 19 จุดโดยอยู่ตามสถานีผู้โดยสาร 18 จุดโดยแต่ละจุดจะติดตั้งห่างกันประมาณ 1-3 กิโลเมตรและอีก 1 จุดที่ศูนย์ซ่อมบำรุง สัญญาณจากแต่ละสถานีจะถูกส่งผ่าน SCADA ผ่าน OTN (Open transport network) โปรโตคอลตาม IEC 60870-5-101 ไปยังศูนย์กลางที่ศูนย์ซ่อมบำรุง

6.3 การทำงานของระบบ

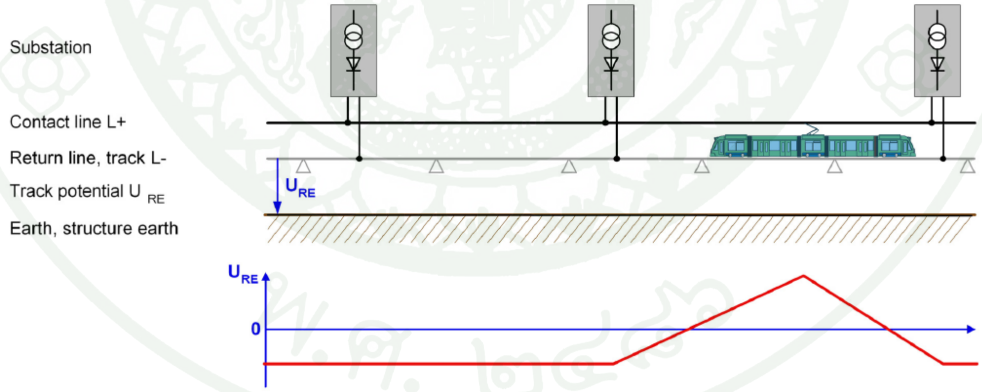
ระบบจะทำงานและวิเคราะห์ปรากฏการณ์กระแสรั่วไหลมีรูปแบบการวัดหลากหลายในเวลาต่างๆกันคือ ช่วงการเดินรถที่เร่งด่วนหนาแน่น ช่วงเดินรถที่ความเร่งด่วนหนาแน่นลดลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ช่วงหยุดการเดินรถ ระบบสามารถเปรียบเทียบค่าจากการวัดด้วยระบบที่ทันสมัยและสามารถแยกเหตุการณ์ที่ไม่ปกติพร้อมแสดงตำแหน่งของจุดที่มีการเกิดความเสื่อมของฉนวน

ระบบตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหลสำหรับระบบจ่ายไฟแบบกระแสตรง ทำการตรวจวัดค่าแรงดันรางวิ่งของโครงข่ายรถไฟฟ้า ระบบทำการประเมินค่ากระแสรั่วไหลของรางวิ่งและตรวจจับประสิทธิภาพความเป็นฉนวน ดังนั้นการตรวจวัดนำไปสู่การป้องกันการเสียหายที่เกิดการกัดกร่อนจากกระแสรั่วไหล ระบบทำการตรวจวัดค่าแรงดันรางตลอดเวลาระหว่างการเดินรถ สามารถระบุตำแหน่งของจุดที่ฉนวนชำรุดได้อย่างอัตโนมัติ แสดงผลการวิเคราะห์ระดับแรงดันที่ศูนย์ควบคุมกลาง

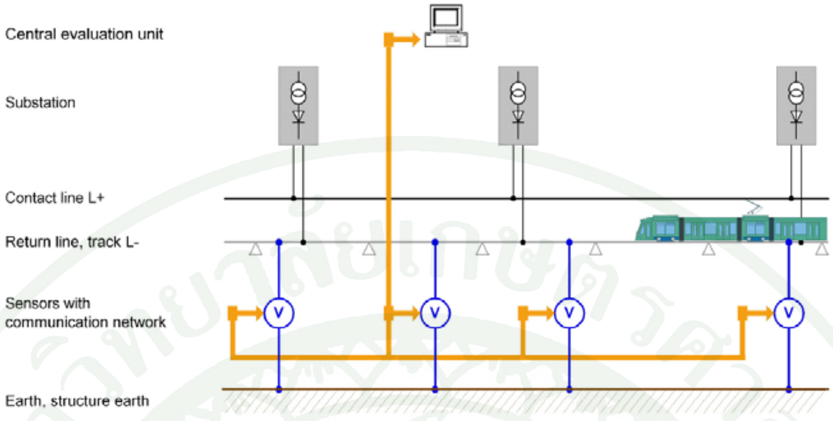
สาเหตุการเกิดกระแสรั่วไหลขึ้นอยู่กับความเป็นฉนวนและความต้านทานของรางวิ่ง กระแสที่ไหลผ่านไปยังรางวิ่งเนื่องจากความแตกต่างของแรงดันระหว่างรางวิ่งกับดินขึ้นอยู่กับตำแหน่งของรถและปริมาณโหลด กระแสรั่วไหลสามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะในดินได้ เช่น ท่อส่งน้ำมันหรือเหล็กเสริมแรงของอาคาร



ภาพที่ 71 แสดงพฤติกรรมค่าแรงดันรางวิ่งที่แปรตามตำแหน่งของตัวรถไฟ

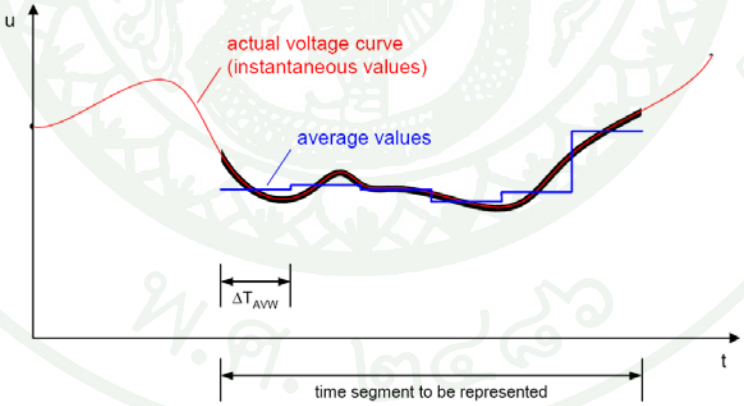
เงื่อนไขเริ่มต้นการวัดโดยโปรแกรมจะกำหนดค่าแรงดันระหว่างรางวิ่งสำหรับระบบรางในเมืองหลวงไว้ที่ 5 โวลต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 72 รูปแบบการตรวจวัดกระแสรั่วไหลโดยการวัดค่าแรงดันรางวิ่งเทียบกับโครงสร้าง SITRAS ® SMS

ระบบประมวลผลกลางแสดงผลของแรงดันราง แบบค่าจริงที่วัดได้ตลอดเวลา แบบค่าเฉลี่ยของขนาดในหนึ่งช่วงเวลา และแบบค่าเฉลี่ยของแต่ละช่วงเวลา



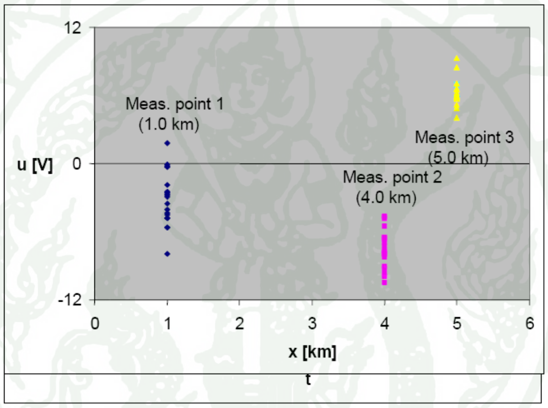
ภาพที่ 73 รูปแบบการแสดงผลระดับแรงดัน

การบันทึกข้อมูลที่วัดได้แบ่งออกเป็นสามระดับคือ การแสดงค่าและบันทึกแบบทันทีตลอดเวลา การแสดงค่าและบันทึกแบบค่าเฉลี่ยระยะสั้นมากกว่าหนึ่งนาทีความนานของการเก็บข้อมูลเท่ากับห้าร้อยวัน และการแสดงค่าและบันทึกแบบค่าเฉลี่ยระยะยาวมากกว่าหนึ่งวันความนานของการเก็บข้อมูลขึ้นอยู่กับปริมาณความจุของเครื่องบันทึกข้อมูลหรือประมาณ 20 ปี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การแสดงผลมีสามแบบคือ การแสดงผลแบบค่าต่อเนื่องตามที่วัดได้ การแสดงผลแบบค่าเฉลี่ยคุณลักษณะทางเวลาและการแสดงผลแบบขนาดของค่าเฉลี่ยที่เกี่ยวเนื่องกับระยะทางตามแนวความยาวสายทาง

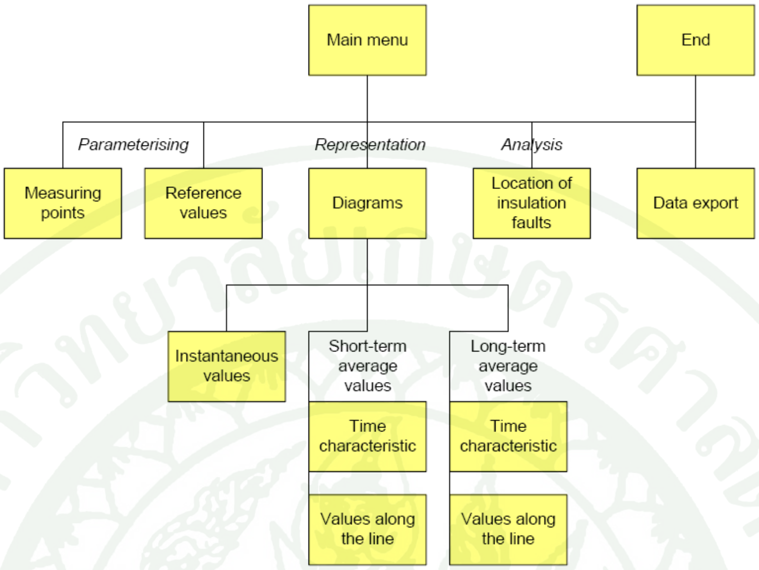
เมื่อค่าเฉลี่ยและขนาดของค่าเฉลี่ยถูกแสดงออกมาจะได้การกำหนดออกมาสองอย่าง คือคุณลักษณะทางเวลาและคุณลักษณะทางระยะทาง ดังตัวอย่างการแสดงผลในรูปแบบจุดที่ระยะทางการตรวจวัดสามจุด



ภาพที่ 74 รูปแบบการแสดงผลแบบระยะทาง

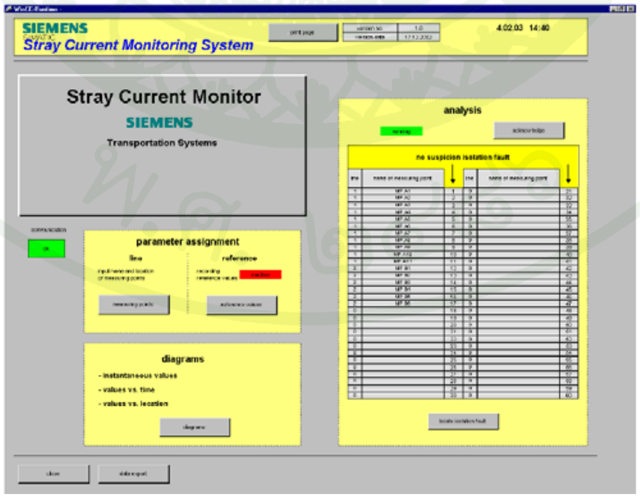
โครงสร้างของโปรแกรมประกอบด้วยสามส่วนคือส่วนที่หนึ่งเป็นการกำหนดจุดการตรวจวัดและค่าอ้างอิง ส่วนที่สองคือการแสดงผล แบบทันทีตลอดเวลา การเก็บค่าระยะสั้นและการเก็บค่าระยะยาว ส่วนที่สามคือการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยตามแนวความยาวรางแสดงผลโดยระบุจุดที่เกิดความเสื่อมของฉนวนรองราง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



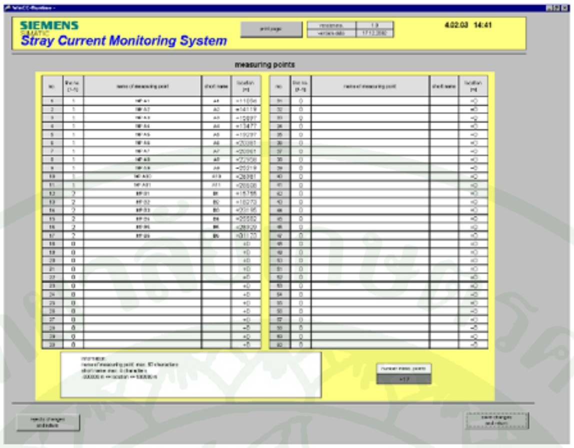
ภาพที่ 75 แบบแสดงโครงสร้างของโปรแกรม

การเริ่มใช้งานหน้าต่างโปรแกรม Stray Current Monitoring System มีส่วนของการกำหนดค่าตัวแปรจุดการตรวจวัด การบันทึกค่าอ้างอิงเดิม ส่วนการแสดงตำแหน่งของจุดตรวจวัดที่บอกถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนและส่วนของการส่งออกข้อมูล



ภาพที่ 76 หน้าต่างโปรแกรมการตรวจวัด (SITRAS ® SMS)

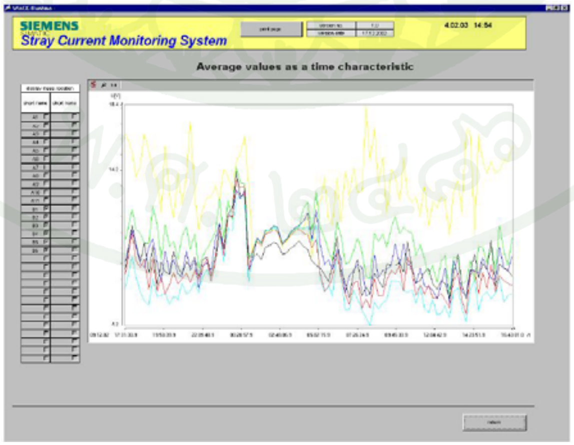
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 77 หน้าต่างโปรแกรมการตรวจวัดตรวจวัดที่จุดตรวจวัดที่ระยะทางต่างๆ

6.4 การแสดงผล

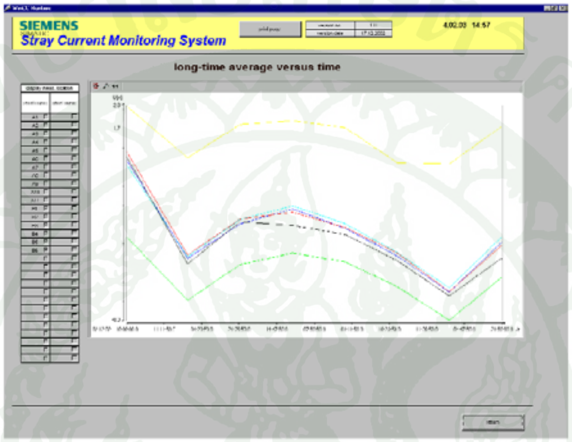
6.4.1 การแสดงผลแบบทันทีตลอดเวลา จากการวัดหกจุดช่วงกิโลเมตรที่ 15.755 ถึง 31.123 ผลของค่าแรงดันที่วัดได้อยู่ในช่วง 4.2 ถึง 18.4 โวลต์ ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง (จากมาตรฐาน EN 50122-2 แรงดันรางวิ่งกับดินต้องไม่เกิน 120 โวลต์ช่วงเวลา 300 วินาที) จึงสรุปว่าการทำงานของระบบฉนวนรองรางมีประสิทธิภาพไม่ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลออกมาจนเกินค่ามาตรฐาน



ภาพที่ 78 ค่าที่วัดได้ทันทีอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา

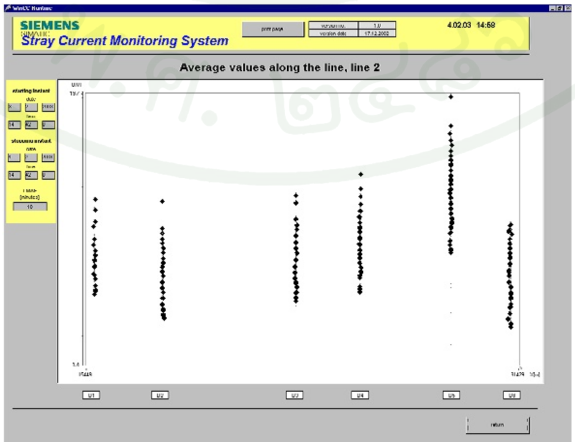
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.4.2 การแสดงผลแบบค่าเฉลี่ยตามคุณลักษณะของเวลา ในเวลาเดียวกันมีการเก็บค่าที่ได้จากการวัดเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงจะได้รู้ถึงค่าที่เปลี่ยนแปลงในอนาคต ทำการวัดหกจุดมีค่าแรงดันอยู่ในช่วง -8.3 ถึง 2.8 โวลต์ ช่วงเวลามากกว่า 24 ชม.ค่าที่ได้อยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 79 ค่าที่วัดได้เฉลี่ยตามเวลาที่จุดตรวจวัดต่างๆ

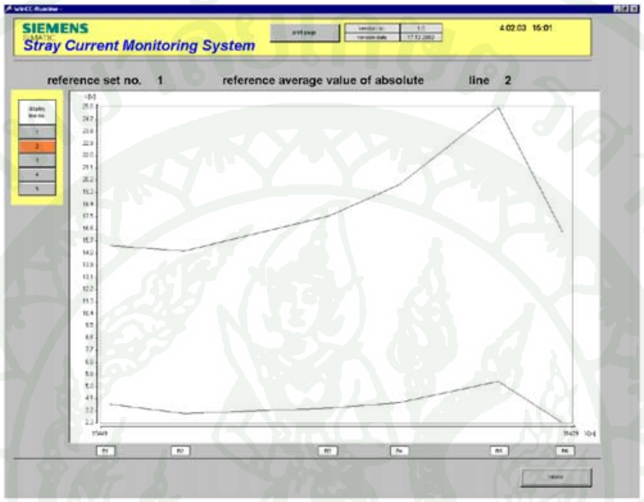
6.4.3 การแสดงผลแบบค่าเฉลี่ยตามแนวความยาวรางตามจุดที่ได้ตรวจวัดหกจุดมีค่าแรงดันอยู่ในช่วง 1.4 ถึง 19.7 โวลต์ ค่าที่เป็นเส้นตรงแสดงถึงค่าแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไปซึ่งยังอยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 80 ค่าเฉลี่ยที่วัดได้ตามแนวสายทางที่จุดตรวจวัดต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

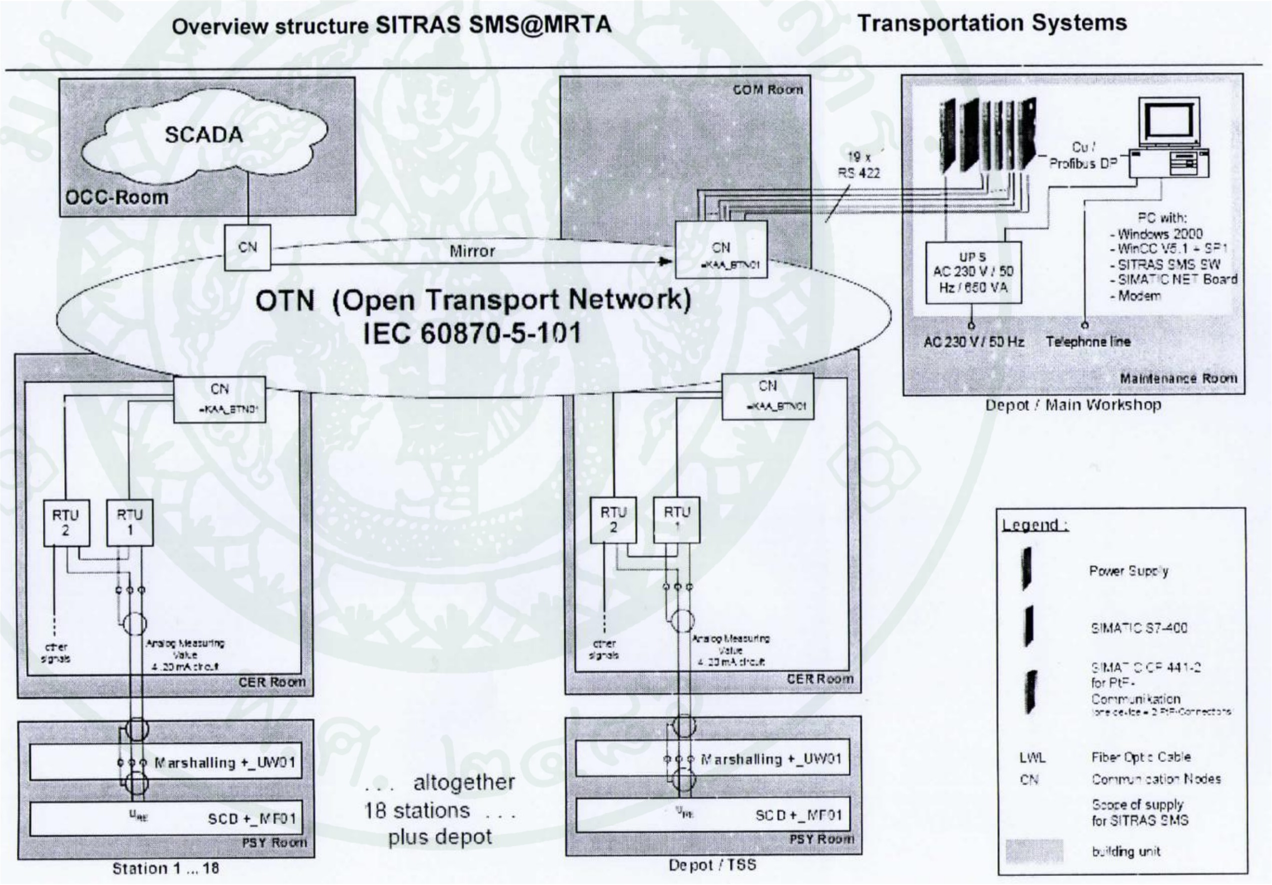
การวิเคราะห์ค่าแรงดันราง (ตำแหน่งการเสื่อมของฉนวน) มีการเก็บค่าและแสดงผลค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดซึ่งระบบจะประมวลผลตลอดช่วงเวลาการเดินรถ ทำการวัดหกจุดมีค่าแรงดันอยู่ในช่วง 2.3 ถึง 25.6 โวลต์ ซึ่งยังอยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 81 ค่าเฉลี่ยที่วัดได้ตามแนวสายทางที่จุดวัดต่างๆ

จากผลของระบบการตรวจวัดค่าแรงดันรางมีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น สามารถทราบตำแหน่งความเสื่อมของฉนวนรองรางเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย ทำให้มั่นใจได้ว่าระบบป้องกันกระแสรั่วไหลของรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยต่อโครงสร้างระบบรถไฟฟ้าและสาธารณูปโภคใกล้เคียง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 82 โครงสร้างระบบตรวจวัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิจารณ์

จากการศึกษาสาเหตุ ผลกระทบ วิธีการป้องกันและควบคุม การคำนวณค่าแรงดันโครงสร้างสำหรับการออกแบบ และการตรวจวัดค่าแรงดันรางเพื่อตรวจสอบสภาพของฉนวนรองรางทำให้สามารถควบคุมการเกิดกระแสรั่วไหลในโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลได้ ผลที่ได้รับเป็นไปตามเป้าหมายในการทำวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับทำให้เข้าใจอย่างถ่องแท้ถึงขั้นตอนการออกแบบ การดูแลรักษาเพื่อป้องกันกระแสรั่วไหล ความรู้จากต่างประเทศเพื่อใช้เป็นแนวทางป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายในระบบรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลที่ให้บริการอยู่และสายสีม่วงช่วงบางใหญ่ – บางซื่อที่กำลังก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานของระบบรถไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาการเกิดกระแสรั่วไหลจากผลงานวิจัยในระบบรถไฟฟ้าต่างประเทศ การศึกษาจากข้อกำหนดตามมาตรฐาน EN 50122-2 ทำให้เข้าใจถึงสาเหตุการเกิดกระแสรั่วไหลซึ่งมีผลกระทบที่ก่อให้เกิดความเสียหายพร้อมทั้งมีแนวทางการป้องกัน จากผลงานวิจัยที่มีการทดลองมาแล้วสามารถนำมาประกอบการออกแบบและก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าในประเทศไทยสายที่กำลังจะเกิดใหม่และบำรุงรักษาสายเฉลิมรัชมงคล จากการจำลองปรับค่าตัวแปรต่างๆจนได้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องกับมาตรฐานโดย การทำให้ค่าความต้านทานรางวิ่งต่ำลง และค่าความนำไฟฟ้าให้มีค่าน้อยลงทำให้แรงดันรางวิ่งลดลงส่งผลให้กระแสรั่วไหลลดลง การตรวจวัดค่าแรงดันเพื่อป้องกันการเกิดกระแสรั่วไหลเป็นระบบที่ทำให้มั่นใจได้ถึงความปลอดภัยของระบบสายเฉลิมรัชมงคล

ข้อเสนอแนะ

ในการทำวิจัยครั้งต่อไปควรทำวิจัยในช่วงระหว่างการก่อสร้างระบบรถไฟฟ้า เพื่อจะได้รับรู้ข้อมูลตั้งแต่การออกแบบ การควบคุมการก่อสร้างและการทดสอบระบบ จะได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากผู้ผลิตมาสู่ผู้ใช้ ในอนาคตวิศวกรประเทศไทยก็จะมีความสามารถเทียบเท่าผู้ชำนาญงานจากต่างประเทศ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. 2552. **โครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล**. สายเฉลิมรัชมงคล. แหล่งที่มา: http://www.mrta.co.th/project/project_.htm, 11 ธันวาคม 2552.

ดร.สมบัติ กิจจาลักษณ์. 2554. **นำส่งข้อมูลประกอบการทำวิทยานิพนธ์ BMCL/MCD/0097/54.** บริษัท รถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน). (อัดสำเนา)

สมเกียรติ พงษ์กันทา. 2547. **คำบรรยาย เรื่อง กระแสรั่วไหล(Stray Current)**. (อัดสำเนา)

C. Charalambous and I. Cotton. 2007. Influence of Soil Structures on Corrosion Performance of Floating-DC Transit Systems, pp. 9-16. **IET Electr. Power Appl**., Vol. 1, No. 1, January 2007. n.p.

Chien-Hsing Lee. 2005. Evaluation of the Maximum potential Rise in Taipei Rail Transit Systems, pp. 1379-1384. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 20, No. 2, April 2005. n.p.

Chien-Hsing Lee and Chien-Jung Lu. 2006. Assessment of Grounding Schemes on Rail Potential and Stray Currents in a DC Transit System, pp. 1941-1947. **IEEE Transactions on Power Delivery,** Vol. 21, No. 4, October 2006. n.p.

European Committee for Electrotechnical Standardisation. 1998. **Railway Applications Fixed Installations Protective Provisions against the effects of stray currents cause by d.c. traction systems** EN 50122-2. 26 pp.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Ian Cotton, Charalambos Charalambous, Pete Aylott and Petra Ernst. 2005. Stray Current Control in DC Mass Transit Systems, pp. 722-730. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, Vol. 54, No. 2, March 2005. n.p.

Jeong-Hyo Bae, Yoon-Cheol Ha, Tae-Hyun Ha, Hyun-Goo Lee, Dae-Kyeong Kim and Jae-Duck Lee. 2004. Data Logger Apparatus for Stray Current Measurment of Subway and Power Line, pp. 1563-1566. **The 30th Annual Conference of the IEEE Industrail Electronics Society**, November 2-6, 2004, Busan, Korea.

Jamali S., Alamuti M.M. and Savaghebi M., Center of Excellence for Power System Automation and Operation Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology. n.d. **Effects of Different Earthing Schemes on the Stray Current in Rail Transit Systems**. 5 pp.

Kinh D. Pham, Ralph S. Thomas and Walt E. Stinger. 2001. Analysis of Stray Current,Track-to-Earth Potentials & Substation Negative Grounding in DC Traction Electrification System, pp. 141-160. **IEEE/ASME Joint Rail Conference**. April 17-19, 2001, Toronto, Ontario, Canada.

Liu Y.C. and Chen J.F. 2005. Control Scheme for Reducing Rail Potential and Stray Current in MRT Systems, pp. 612-618. **IEE Proc.-Electr. Power Appl.**, Vol. 152, No. 3, May 2005. n.p.

MESC Association. n.d. **Traction Power Supply Distribution and Stray Current protection.** (Technology Transfer report). M&E System Consultant Contract, Zuellig Bldg Silom Road Bangkok Thailand. (Mimeographed)

Mu Longhua and Zhouwei. 2007. Stray Current Automatic Monitoring System and Intelligent Obviating Current Device in Metro, pp. 1070-1074. **The 8th International Power Engineering Conference (IPEC 2007)**. n.p.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Siemens AG Transportation Systems Electrification. 2003. **SITRAS® SMS Stray-current Monitoring System for DC Traction Power Supplies Central Evaluation Unit.** (Mimeographed)

Siemens Ltd. 2002. **Outline Design Chapter 7 Power Supply Version B. M&E Equipment Contract.** M.R.T. Chaloem Ratchamongkhon Line, Bangkok. (Mimeographed)

Siemens Ltd. 2002. **Stray Current Control Provisions for Stray Current Mitigation. M&E Equipment Contract.** M.R.T. Chaloem Ratchamongkhon Line, Submission No: PSY/0014.B, Bangkok. (Mimeographed)

Sim W.M., Melvyn Thong T.L. and Chan C.F., Land Transport Authority, Singapore. n.d. **Touch Voltage Protection on Singapore MRT System**. 6 pp.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

การเกิดการกัดกร่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

http://www.kmitl.ac.th/~kssutha/

ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์

ห้องปฏิบัติการวิจัยการกัดกร่อน สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

หน่วยวิจัยเฉพาะทางด้านการกัดกร่อน

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Email: kssutha@kmitl.ac.th

Tel: +66 (0)2 329 8400 ext. 6229

Fax: +66 (0)2 329 8428

การกัดกร่อนคืออะไร

จากนิยามตามมาตรฐาน DIN EN ISO 8044 การกัดกร่อน (Corrosion) คือปฏิกิริยาระหว่างวัสดุกับสิ่งแวดล้อมซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุนั้นๆ และยังผลให้ความสามารถในการทำหน้าที่ของวัสดุดังกล่าวเสียไป ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเป็นได้ทั้งปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า หรือปฏิกิริยาทางกายภาพของวัสดุ

รูปแบบโดยทั่วไป

การกัดกร่อนสามารถจำแนกออกเป็นหมวดหมู่ได้หลายลักษณะโดยใช้เกณฑ์ต่างๆกัน เช่น จำแนกตามกลไก ตามลักษณะทางกายภาพ หรือตามตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อน

1. การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion)

เกิดขึ้นทั่วทั้งผิวหน้าของวัสดุที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมแบบสม่ำเสมอ สามารถประยุกต์ใช้กฎของฟาราเดย์ในการคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนในมิติต่างๆได้ เช่น มวลต่อพื้นที่ต่อเวลา ความลึกของการกัดกร่อนต่อเวลา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Localized corrosion)
เกิดขึ้นเฉพาะในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ไม่เกิดขึ้นทั่วทั้งผิวหน้าของวัสดุ ในบางกรณีอาจจะไม่สามารถสังเกตเห็นการกัดกร่อนแบบนี้ได้ด้วยตาเปล่า ตัวอย่างเช่น

2.1 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion)
การกัดกร่อนแบบนี้เกิดจากการสัมผัสหรือเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปที่มีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่างกันและอยู่ในสารละลายที่นำไฟฟ้าได้ โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่ำกว่ามีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่า และเกิดการกัดกร่อนกับโลหะนั้นอย่างรุนแรงที่บริเวณรอยต่อของการสัมผัส นอกจากนี้ในบางกรณี แม้ว่าจะมีโลหะเพียงชนิดเดียวแต่ถ้าปลายทั้งสองด้านของโลหะนั้นอยู่ในสภาวะที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ต่างกัน ก็สามารถเอื้อให้เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกได้

2.2 การสูญเสียส่วนเจือ (Dealloying)
ตัวอย่างที่คลาสสิกที่สุดของการกัดกร่อนแบบนี้คือการสูญเสียสังกะสีของทองเหลือง ซึ่งนอกจากจะทำให้ทองเหลืองมีสีแดงเข้มมากขึ้นตามสัดส่วนเชิงมวลที่เพิ่มขึ้นของทองแดงแล้ว ทองเหลืองยังจะสูญเสียความแข็งแรงด้วย เนื่องจากโครงสร้างโดยรวมจะมีความพรุนมากขึ้น

2.3 การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion)
การกัดกร่อนแบบนี้มักจะเกิดกับโลหะที่มีความสามารถในการสร้างชั้นป้องกันได้ (Passivation) หลุมที่เกิดขึ้นมีได้หลายลักษณะ เช่น หลุมแบบปากกว้าง หลุมแบบรูเข็ม หลุมแบบปากแคบแต่ด้านในกลวง ในเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีการประมาณค่าความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (PREN, pitting resistance equivalent number) เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุได้ด้วย

2.4 การกัดกร่อนบริเวณซอก (Crevice corrosion)
จะเกิดขึ้นในบริเวณที่การถ่ายเทของเหลวทำได้ไม่ดีนัก ด้านในและด้านนอกของซอกจะส่งผลให้การแพร่ของสารเคมีบางชนิด เช่น ออกซิเจน ทำได้ยาก อันจะส่งผลให้ด้านในและด้านนอกมีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่ต่างกัน ซึ่งนำไปสู่การกัดกร่อนเฉพาะบริเวณด้านในซอก นอกจากนี้ค่า pH ด้านในซอกอาจจะลดลงได้ถึง 1 หรือ 0 ในขณะที่ค่า pH ด้านนอกคงที่ที่ 7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.5 การกัดกร่อนร่วมกับการกัดเซาะ (Erosion corrosion)
การกัดกร่อนของโลหะที่ผิวหน้าจะมีอัตราสูงขึ้นเมื่อมีของไหลไหลผ่านด้วยความเร็วสูงและเกิดกระแสการไหลแบบปั่นป่วน นอกจากนี้ถ้ามีอนุภาคของแข็งปะปนกับของไหล ก็จะยิ่งทำให้อัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงมากขึ้นอีก

2.6 การกัดกร่อนจากการถูครูด (Fretting corrosion)
เกิดจากการสัมผัสกันของพื้นผิวโดยที่มีแรงกระทำและมีการเคลื่อนที่ ในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ซึ่งจะทำให้การสึกหรอเกิดขึ้นมากกว่าปกติ

2.7 การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular corrosion)
เมื่อคาร์บอนที่เจืออยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแพร่เข้าจับกับโครเมียม เกิดเป็นสารประกอบ Cr23C6 และตกตะกอนอยู่ที่ขอบเกรน บริเวณที่อยู่ถัดไปจากขอบเกรนจะมีปริมาณโครเมียมน้อยลงอย่างมาก ส่งผลให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อยลงไปด้วย และเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมสัมผัสกับสารกัดกร่อน บริเวณข้างขอบเกรนจึงถูกกัดกร่อนเป็นอันดับแรกอย่างจำเพาะเจาะจง

2.8 การแตกร้าวจากแรงเค้นและการกัดกร่อน (Stress corrosion cracking)
การกัดกร่อนแบบนี้ต้องอาศัยองค์ประกอบ 3 ส่วนที่พอดีกัน คือ แรงเค้น วัสดุที่อ่อนแอ และสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ถ้าองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งขาดหายไป หรือมีขนาดไม่เพียงพอก็จะไม่เกิดการแตกร้าวจากแรงเค้นและการกัดกร่อน

2.9 การกัดกร่อนร่วมกับความล้า (Corrosion fatigue)
วัสดุที่ได้รับแรงกระทำแบบวนรอบสามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลานานในสภาพแวดล้อมที่เฉื่อย แต่เมื่อนำวัสดุดังกล่าวมารับแรงกระทำแบบวนรอบเช่นเดิม โดยอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน อายุการใช้งานของวัสดุดังกล่าวจะสั้นลงอย่างเห็นได้ชัด

2.10 การแตกร้าวจากไฮโดรเจน (Hydrogen embrittlement)
การกัดกร่อนแบบนี้เกิดจากอะตอมของไฮโดรเจนที่แพร่เข้าไปในเนื้อโลหะ แล้วรวมตัวกันเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่มีแรงดันสูงซึ่งลดความเหนียวและความแข็งแรงของโลหะลง จนสามารถสร้างรอยแตกหรือรอยระเบิดออกได้ในที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกประเภทของการกัดกร่อนตามสภาพการใช้งานของวัสดุได้อีก เช่น การกัดกร่อนในบรรยากาศ (Atmospheric corrosion) การกัดกร่อนโดยจุลินทรีย์ (Microbial corrosion) การกัดกร่อนของวัสดุทางการแพทย์ที่ใช้ฝังในร่างกาย (Corrosion of implant materials) การกัดกร่อนในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี (Corrosion in petroleum and petrochemical industry) การกัดกร่อนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ(Corrosion in hard disk drive)

ภาพผนวกที่ ก1 การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน เห็นได้ชัดเจนหลังจากดัดงอชิ้นงาน

ภาพผนวกที่ ก2 การแตกร้าวจากแรงเค้นและการกัดกร่อนของเหล็กสมอยึดผนังอุโมงค์

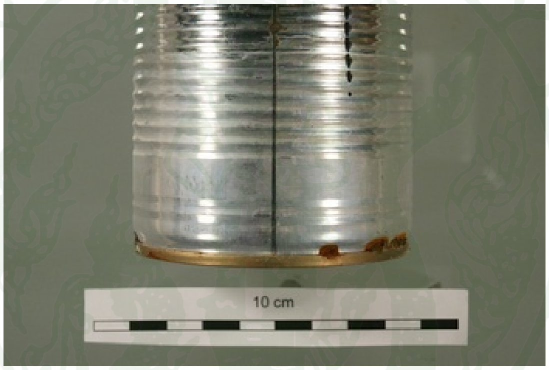
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ก3 การกัดกร่อนแบบกัลวานิกของท่อเหล็กที่ต่อกับข้อต่อทองเหลือง

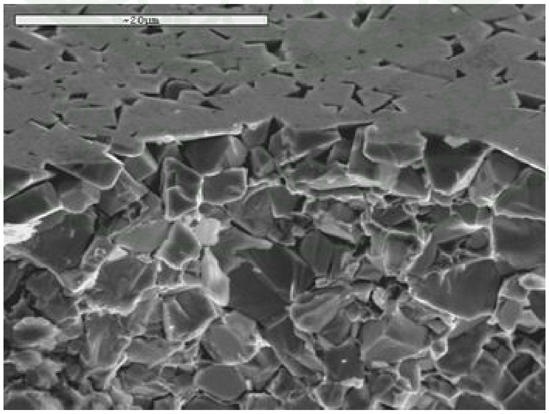
ภาพผนวกที่ ก4 การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดซุปเปอร์ออสเตไนท์ (ปกติจะทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดอื่น) แบบสม่ำเสมอ แบบหลุม และแบบบริเวณซอก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ก5 การกัดกร่อนแบบหลุมของวัสดุทางการแพทย์ที่ใช้ฝังในร่างกายเพื่อการรักษา

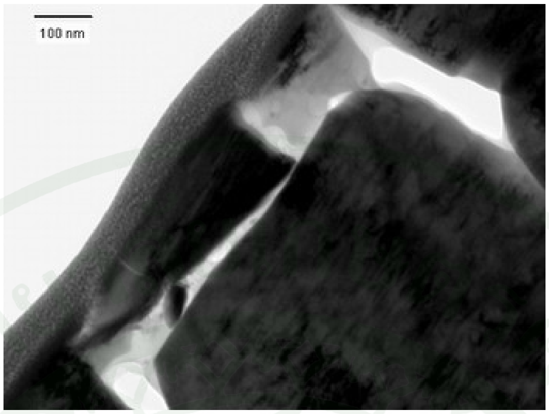


ภาพผนวกที่ ก6 การกัดกร่อนของกระป๋องบรรจุอาหารบริเวณตะเข็บฝาและตะเข็บข้าง



ภาพผนวกที่ ก7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) แสดงการสูญเสียโคบอลต์ของซีเมนเตททังสเตนคาร์ไบด์เนื่องจากการกัดกร่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ก8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของซีเมนเตททังสเตนคาร์ไบด์หลังจากการกัดกร่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

http://www.rmutphysics.com/charud/specialnews/2/corrosion/corrosionthaiintro1.htm
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

การกัดกร่อน หรือ corrosion คือ การเสื่อมสภาพของโลหะที่ทำให้สมบัติของโลหะ เปลี่ยนไปในทางเลวลง โดยโลหะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของโลหะหรือที่เรียกว่าสนิม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อนเป็นเหตุให้โลหะเกิดความเสียหาย ในแต่ละปีโลกมีค่าใช้จ่าย จากปัญหาการกัดกร่อนมากมาย ทั้งที่เป็นการซ่อมแซม บำรุงรักษา หรือการรื้อใหม่ทดแทน ส่วนที่ชำรุดเสียหายจนไม่อาจใช้การได้อีกต่อไป บางครั้งก็เป็นค่าใช้จ่ายที่มากเกินควรเช่น การออกแบบเผื่อ ใช้โลหะหนาเกินความจำเป็น นอกจากนั้นยังมีค่าใช้จ่ายของการค้นคว้าวิจัย เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้พัฒนาให้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สามารถใช้ได้แม้ในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน

การกัดกร่อน คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น(oxidation reaction) ของโลหะซึ่งเป็นปฏิกิริยาให้อิเลคตรอน โดยที่โลหะประกอบด้วยอะตอมโลหะเกาะเกี่ยวกันตลอดเนื้อโลหะด้วยพันธะโลหะซึ่งเป็นพันธะโควาเลนท์ ที่มีคู่อิเลคตรอนที่พันธะเป็นชนิดไม่ประจำ โลหะจึงมีอิเลคตรอนที่เคลื่อนย้ายได้ ที่ยึดเหนี่ยวทั้งหมดเข้า ด้วยกัน โลหะจึงมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อน อิเลคตรอนที่พันธะจะหลุดออก ทำให้อะตอมโลหะเปลี่ยนเป็น อิออนโลหะประจุบวก

เมื่อมีการให้และรับอิเลคตรอนครบเซลไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า เซลการกัดกร่อน โลหะที่ให้อิเลคตรอนเป็นขั้วแอโนด (anode) อิเลคตรอนเดินทางไปตามเนื้อโลหะ สิ่งแวดล้อมที่รับอิเลคตรอนเป็นขั้วคาโธด (cathode) และความ ชื้นหรือสารละลายที่ผิวโลหะเป็นอิเลคโตรไลท์ (electrolyte)ให้อิออนเดินทางให้ครบเซล

ดังนั้น การกัดกร่อนจึงสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไป อาจกล่าวได้ว่า โลหะเกือบทุกชนิดเกิดการกัดกร่อนได้เสมอ ต่างกันที่ความยากง่ายของการเกิดการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนเร็ว-ช้า สาเหตุของการเกิดการกัดกร่อนจึง มาจากทั้งโลหะและสิ่งแวดล้อม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

http://www.saneengineer.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=538959321&Ntype=57

การกัดกร่อนของโลหะและการป้องกัน

วันที่ 30/08/2009 14:21:54

ปัจจุบัน เรามีการใช้เหล็กเป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับงานต่างๆ มากมาย ซึ่งข้อพิจารณาในการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์เหล็ก นอกจากจะดูที่ความแข็งแรง ความเหนียว (Toughness) ความสามารถในการขึ้นรูปและความสามารถในการเชื่อมประกอบแล้ว เรายังต้องพิจารณาถึงความต้านทานการกัดกร่อนด้วย เพื่อให้ใช้งานเหล็กได้อย่างคุ้มค่า ลดความจำเป็นในการซ่อมบำรุง และมั่นใจในความปลอดภัย เช่น อุตสาหกรรมอาหาร การขนส่งเชื้อเพลิงโดยท่อเหล็ก เป็นต้น บทความนี้จะเสนอเนื้อหาเกี่ยวกับรูปแบบการกัดกร่อนบางประเภทที่เกิดกับโลหะและการป้องกัน

1. การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากโลหะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมโดยอัตราการสูญเสียของเนื้อโลหะที่บริเวณต่างๆ จะใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถวัดอัตราการกัดกร่อนและออกแบบการบำรุงรักษาตามช่วงระยะเวลาได้

2. การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic corrosion) เช่น เมื่อโลหะ 2 ชนิดที่ต่างกันมาเชื่อมต่อกันจะเกิดความต่างศักย์ขึ้น ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างโลหะทั้งสอง โลหะที่ต้านทานการกัดกร่อนได้น้อยกว่าจะเป็นอาโนด โลหะที่ต้านทานการกัดกร่อนได้มากกว่าทำหน้าที่เป็นคาโธด โดยระดับการกัดกร่อนขึ้นกับสภาพสิ่งแวดล้อมที่โลหะทั้งสองสัมผัส ระยะห่างจากรอยต่อ (การกัดกร่อนแบบกัลวานิคจะรุนแรงที่สุดบริเวณใกล้รอยต่อระหว่างโลหะทั้งสอง และอัตราการกัดกร่อนจะลดลงเมื่อระยะห่างจากรอยต่อนั้นเพิ่มขึ้น) สัดส่วนพื้นที่ของคาโธดต่อพื้นที่ของอาโนด (ยิ่งสัดส่วนดังกล่าวมาก ความรุนแรงของการกัดกร่อนที่อาโนดก็จะยิ่งสูงขึ้น)

3. การกัดกร่อนแบบช่องแคบ (Crevice corrosion) เป็นการกัดกร่อนเฉพาะบริเวณ (localised corrosion) แบบหนึ่ง มักเกิดขึ้นบริเวณช่องแคบหรือรอยแยกของโลหะที่สัมผัสกับสารละลายที่สามารถแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า (electrolyte) ได้ การกัดกร่อนแบบนี้สามารถเกิดขึ้นได้แม้โลหะสัมผัสกับอโลหะ เช่น rubber gasket อัตราการกัดกร่อนในช่องแคบจะสูงกว่าของเนื้อโลหะโดยรวม (bulk) นอกจากนี้การกัดกร่อนแบบช่องแคบมักเกิดกับโลหะที่โลหะผสมที่ผิวเป็น passiveเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting) เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ (localized attack) อีกแบบหนึ่ง การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้เกิดความเสียหายได้แม้สูญเสียน้ำหนักโลหะเพียงเล็กน้อย แต่เป็นอันตรายเพราะมักเป็นการเสียหายแบบฉับพลัน โดยจะทะลุเป็นรูและยากที่จะตรวจหา เพราะขนาดเล็กและอาจถูกปกคลุมด้วยผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน (corrosion product) การกัดกร่อนแบบเป็นหลุมมักจะเกิดกับโลหะที่ผิวเป็น passive ซึ่งจะทำให้มีแรงขับ (driving force) ที่จะทำให้เกิดกระแสการกัดกร่อนไหลไปในหลุมสูง ถ้าผิวภายนอก active ก็จะขาดแรงขับต่อการเกิดการกัดกร่อนกัดแบบหลุม การกัดกร่อนแบบหลุมจะพบบ่อยในสารละลายที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ เช่น น้ำทะเล

5. การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) โดยปกติการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (grain boundary) จะเกิดได้ดีกว่าที่โลหะพื้น (matrix) เล็กน้อย แต่ในบางสภาวะ การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนจะไวมาก เช่น ปัญหาที่พบบ่อยของการกัดกร่อนแบบนี้ในเหล็กกล้าไร้สนิม คือ บริเวณรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เกิดการสูญเสียโครเมี่ยมในรูปของคาร์ไบด์ (Cr23C6) ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ในบริเวณใกล้แนวเชื่อม เนื่องจากขาดโครเมี่ยมสำหรับการสร้างฟิล์มโครเมี่ยมออกไซด์ที่แน่นและป้องกันเนื้อเหล็ก

6. การผุกร่อนแบบเลือก (Selective leaching or Dealloying) จะเกิดกับโลหะผสมที่ธาตุหนึ่งเสถียรกว่าอีกธาตุหนึ่งเมื่อสัมผัสกับบรรยากาศ เช่น

6.1 การผุกร่อนแบบ Dezincification ของทองเหลือง (ทองแดงผสมสังกะสี) ที่สังกะสีจะถูกละลายออกไป เหลือไว้เหลือแต่ทองแดงที่เป็นรูพรุน ซึ่งแม้ว่ารูปทรงจะเหมือนเดิม แต่ความแข็งแรงจะลดลง ปัญหาดังกล่าวสามารถลดลงได้โดยการเติมดีบุกประมาณ 1 % ลงในทองเหลือง

6.2 Graphitization ของเหล็กหล่อเทา คือ การผุกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากเหล็ก (อาโนด) ผุกร่อนไป เหลือตาข่ายกราไฟต์ลักษณะแผ่น (Graphite flake) ที่เป็นคาโธดไว้ ทำให้โครงสร้างเหล็กหล่อเทาสูญเสียความแข็ง การแก้ปัญหาทำโดยการใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลม หรือเหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable cast iron) แทน

7. การกัดเซาะ (Erosion corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากทั้งทางเคมีและทางกล เช่น ในท่อส่งสารละลายที่กัดกร่อนซึ่งอาจมีสารแขวนลอยของแข็งผสม การกัดกร่อนแบบนี้จะถูกเร่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ด้วยการชนของอนุภาค ซึ่งอาจทำให้เนื้อโลหะหลุดออก หรือแค่ทำให้ออกไซด์แน่นที่ปกป้องผิวหลุดออก เปิดให้เนื้อโลหะถูกกัดกร่อนง่ายขึ้น

8. Stress corrosion เป็นการกัดกร่อนที่เกิดโดยความเค้นและสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อน โดยสภาพความเค้นของโลหะอาจเกิดจาก

8.1 ความเค้นภายในเหลือค้าง (Residual internal stress) เช่น

8.1.1 จากการขึ้นรูปเย็น (Cold forming) ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยทำการอบอ่อน (Annealing) หลังการขึ้นรูป

8.1.2 การเย็นตัวอย่างไม่สม่ำเสมอจากอุณหภูมิสูง เป็นต้น

8.2 ความเค้นจากภายนอก เช่น

8.2.1 การสั่นสะเทือน

8.2.2 การรับการดัดโค้ง

8.2.3 ผลของความร้อน (ขยายตัวหรือหดตัว) เป็นต้น

การป้องกันการกัดกร่อน

เราสามารถชะลอการกัดกร่อนของโลหะได้โดย

1. การเลือกใช้วัสดุ (Material selection) ที่เหมาะสม เช่น

1.1 ในกรณีที่ต้องเชื่อมต่อโลหะ 2 ชนิดที่ต่างกัน ควรเลือกโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน (Reduction potential) ใกล้เคียงกัน เพื่อป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic corrosion)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 ในกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้งานบริเวณที่ใกล้ทะเล เราสามารถลดแนวโน้มการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting) ได้โดยเลือกใช้เกรด 316 ที่ผสมโมลิบดินั่มประมาณ 2 % แทนเกรด 304

1.3 ในกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิมที่หนาและต้องทำการเชื่อม เราสามารถป้องกันการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) ได้โดยเลือกใช้เกรดที่มีคาร์บอนต่ำ (ไม่เกิน 0.03% เช่น เกรด 316L) หรือเกรดที่ผสม Ti หรือ Nb (ซึ่งมีความสามารถในการจับกับคาร์บอนได้ดีกว่าโครเมียม)

1.4 ใส่ใจเรื่องการเลือกใช้ลวดเชื่อม เพื่อป้องกันการกัดกร่อนบริเวณรอยเชื่อม (ดูรายละเอียดในบทความเรื่อง “การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม” ได้ที่ http://www.isit.or.th/techinfo.asp) เป็นต้น

2. การออกแบบ (Design) ที่เหมาะสม เช่น ออกแบบให้สัดส่วนพื้นที่ของอาโนดต่อพื้นที่ของคาโธดที่สูงจะลดการกัดกร่อนแบบ Galvanic ได้ดีกว่า

2.1 ทำการเคลือบโดยการพิจารณาอย่างรอบคอบ เช่น การทาสีบนโลหะที่ทนการกัดกร่อนน้อย (anode) โดยไม่ทาสีบนโลหะที่ต้านทานการกัดกร่อนมากกว่า (คาโธด) นั้นเป็นสิ่งที่ไม่ควรทำ เนื่องจากรูขนาดเล็ก (pin-holes) ในบริเวณที่ทาสีไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดพื้นที่อาโนดขนาดเล็ก แต่มีพื้นคาโธดที่ขนาดใหญ่ จึงเป็นการเร่งการกัดกร่อนเฉพาะบริเวณที่อาโนด

2.2 ลดการสัมผัสทางไฟฟ้าระหว่างโลหะต่างชนิดกันเพื่อป้องกัน Galvanic corrosion เช่น ใช้ฉนวน (insulator) คั่น

2.3 ใช้ปะเก็น (Gasket) ที่เป็นของแข็ง เช่น เทฟลอนแทนวัสดุที่ดูดซับของเหลวได้

2.4 ออกแบบควบคุมการไหลของสารที่ขนส่งในท่อและวาล์วให้เหมาะสม โดยคำนึงถึงรูปร่างและลักษณะทางเรขาคณิต หรือการเพิ่มความหนาของวัสดุบริเวณที่ถูกกัดเซาะสูง (Erosion corrosion) เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

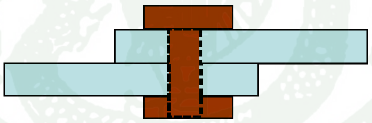
2.5 ในกรณีที่ส่งผ่านของเหลวที่มีตะกอนตามท่อโลหะ อาจพิจารณาใช้ตัวกรองเพื่อกรองของแข็งออก เพื่อช่วยลดการกัดเซาะ

2.6 ออกแบบเผื่อให้ชิ้นงานให้มีความหนามากขึ้น หรือออกแบบให้ชิ้นงานที่เป็นอาโนดสามารถถอดเปลี่ยน ซ่อมบำรุงได้ง่าย

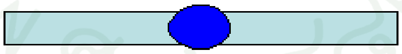
2.7 สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้สูญเสียโครเมี่ยมไปในรูปของคาร์ไบด์ (sensitised) เช่น ชิ้นงานหนาที่ผ่านการเชื่อม การปรับปรุงโดยกระบวนการทางความร้อนเพื่อละลายคาร์ไบด์จะสามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้

2.8 เราสามารถลด Stress corrosion cracking ได้โดยการลดความเค้นเหลือค้างในชิ้นงานให้ต่ำลง โดยการอบคลายความเครียด

2.9 ใช้การเชื่อมแทนการใช้หมุดย้ำ (Rivet) หรือสลักเกลียว (Bolt) ในการยึดวัสดุ



ภาพผนวกที่ ก9 การใช้ Bolt ยึดโลหะ



ภาพผนวกที่ ก10 การเชื่อมยึดโลหะ

2.10 การเชื่อมต่อโลหะ 2 ชนิดที่ต่างกัน ควรเลือกใช้โลหะที่ใช้เชื่อมที่ต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าโลหะพื้น (Base metal) ที่ต้องการยึดต่ออย่างน้อย 1 ตัว

3. การปรับสภาพแวดล้อม (Modification of environment) และการบำรุงรักษาโลหะ เช่น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.1 การใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน (inhibitor) เติมในสารละลายที่ต้องการใช้ลำเลียง จัดเก็บหรือใช้ทำการผลิต เพื่อลดการกัดกร่อนของอุปกรณ์โลหะที่สัมผัส

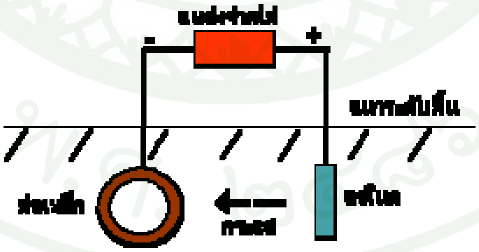
3.2 การศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่มีต่อการกัดกร่อน เช่น การเปลี่ยนสภาพจากคาโธดเป็นอาโนดในระบบสิ่งแวดล้อมต่างๆ เป็นต้น

3.3 ทำความสะอาด ตรวจสอบอุปกรณ์และขจัดตะกอนที่ตกค้างอย่างสม่ำเสมอ

4. การเคลือบผิว/ทาสี (Coating/painting) มีด้วยกันหลายแบบ เช่น การเคลือบผิวเหล็กด้วยสังกะสี ดีบุก หรืออีนาเมล (ดูรายละเอียดในบทความเรื่อง “เหล็กแผ่นเคลือบอีนาเมล” ได้ที่ http://www.isit.or.th/techinfo.asp) เป็นต้น

5. วิธีการทางไฟฟ้า-เคมี (Electrochemical methods)

5.1 วิธี Cathodic protection โดยการทำให้โครงสร้างที่ต้องการป้องกันเป็นคาโธด ซึ่งอาจทำโดยการให้กระแสไฟฟ้า (impressed current) หรือการใช้อาโนดสิ้นเปลือง (sacrificial anode) โดยใช้วัสดุตัวอื่นซึ่งทำหน้าที่เป็นอาโนดต่อเข้ากับโลหะที่ต้องการป้องกัน เพื่อให้ผุกร่อนแทน



ภาพผนวกที่ ก11 Cathodic protection ของท่อเหล็กโดยแบบใช้กระแสไฟฟ้า

5.2 วิธี Anodic protection โดยการใช้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกทำให้โลหะที่ต้องการปกป้องสร้างชั้นฟิล์มที่เสถียร (protective film) ที่ผิวซึ่งจะใช้ได้กับโลหะเพียงบางชนิด ต่างจาก Cathodic protection ที่สามารถใช้กับโลหะได้ทุกชนิด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

http://www.lpnpm.co.th/th/knowledge6.php

การกัดกร่อนของโลหะ

ปัจจุบัน เรามีการใช้เหล็กเป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับงานต่างๆ มากมาย ซึ่งข้อพิจารณาในการเลือก ใช้ผลิตภัณฑ์เหล็ก นอกจากจะดูที่ความแข็งแรง ความเหนียว (Toughness) ความสามารถใน การขึ้นรูป และความสามารถในการเชื่อมประกอบแล้ว เรายังต้อง พิจารณาถึงความต้านทาน การกัดกร่อนด้วย เพื่อให้ใช้งานเหล็กได้อย่าง คุ้มค่า ลดความจำเป็นในการซ่อมบำรุง และมั่นใจ ในความปลอดภัย เช่น อุตสาหกรรม อาหาร การขนส่ง เชื้อเพลิงโดยท่อเหล็ก เป็นต้น

1. การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากโลหะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม โดยอัตราการสูญเสียของเนื้อโลหะที่บริเวณต่างๆ จะใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถวัดอัตราการกัดกร่อน และออกแบบการบำรุงรักษาตามช่วงระยะเวลาได้

2. การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic Corrosion)

เช่น เมื่อโลหะ 2 ชนิดที่ต่างกันมาเชื่อมต่อกันจะเกิดความต่างศักย์ขึ้นทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างโลหะทั้งสองโลหะที่ต้านทานการกัดกร่อนได้น้อยกว่าจะเป็น อาโนด โลหะที่ต้านทานการกัดกร่อนได้มากกว่าทำหน้าที่เป็นคาโธด

โดยระดับการกัดกร่อน ขึ้นกับสภาพสิ่งแวดล้อมที่โลหะทั้งสองสัมผัส ระยะห่างจาก รอยต่อ (การกัด กร่อนแบบกัลวานิคจะรุนแรงที่สุดบริเวณใกล้รอยต่อระหว่าง โลหะทั้งสองและอัตราการ กัดกร่อนจะลดลงเมื่อระยะห่างจากรอยต่อนั้นเพิ่มขึ้น) สัดส่วน พื้นที่ของคาโธดต่อพื้นที่ของ อาโนด (ยิ่งสัดส่วนดังกล่าวมากความรุนแรงของ การกัดกร่อนที่อาโนด ก็จะยิ่งสูงขึ้น)

3. การกัดกร่อนแบบช่องแคบ (Crevice Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนเฉพาะบริเวณ (Localized Corrosion) แบบหนึ่ง มักเกิดขึ้นบริเวณ ช่องแคบหรือรอยแยกของโลหะที่สัมผัสกับสารละลายที่สามารถแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า (Electrolyte) ได้ การกัดกร่อนแบบนี้สามารถเกิดขึ้นได้แม้โลหะ สัมผัสกับ อโลหะ เช่น Rubber Gasket อัตราการ กัดกร่อนในช่องแคบจะสูงกว่าของเนื้อโลหะโดยรวม(Bulk) นอกจากนี้การกัดกร่อนแบบช่องแคบ มักเกิดกับโลหะที่โลหะผสมที่ ผิวเป็นpassive เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting)

เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ (Localized Attack) อีกแบบหนึ่ง การกัดกร่อนแบบนี้ ทำให้เกิดความเสียหายได้แม้สูญเสียน้ำหนักโลหะเพียงเล็กน้อย แต่เป็นอันตรายเพราะมักเป็นการเสียหายแบบฉับพลัน โดยจะทะลุเป็นรูและยากที่จะตรวจหา เพราะขนาดเล็ก และอาจถูกปกคลุมด้วย ผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน (Corrosion Product) การกัดกร่อน แบบเป็นหลุมมักจะเกิดกับโลหะ ที่ผิวเป็น passive ซึ่งจะทำให้ มีแรงขับ (driving force) ที่จะทำให้เกิดกระแสการกัดกร่อน ไหลไปในหลุมสูง ถ้าผิวภายนอก active ก็จะขาดแรง ขับต่อการเกิดการกัดกร่อนกัดแบบหลุม การกัดกร่อนแบบหลุมจะพบบ่อยในสารละลาย ที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ เช่น น้ำทะเล

5. การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

โดยปกติการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Grain Boundary) จะเกิดได้ดีกว่าที่โลหะพื้น (Matrix) เล็กน้อย แต่ในบางสภาวะการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนจะไวมาก เช่น ปัญหาที่พบบ่อยของการ กัดกร่อนแบบนี้ในเหล็กกล้าไร้สนิม คือ บริเวณรอยเชื่อมของ เหล็กกล้าไร้สนิมที่เกิดการสูญเสียโครเมี่ยมในรูปของคาร์ไบด์ (Cr23C6) ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ในบริเวณใกล้แนวเชื่อม เนื่องจากขาดโครเมี่ยมสำหรับการสร้างฟิล์ม โครเมี่ยมออกไซด์ที่แน่นและป้องกันเนื้อเหล็ก

6. การผุกร่อนแบบเลือก (Selective Leaching or Dealloying)

การผุกร่อนแบบเลือกจะเกิดกับโลหะผสมที่ธาตุหนึ่งเสถียรกว่าอีกธาตุหนึ่งเมื่อสัมผัสกับบรรยากาศ เช่น

6.1 การผุกร่อนแบบ Dezincification ของทองเหลือง (ทองแดงผสมสังกะสี) ที่สังกะสีจะถูก ละลายออกไป เหลือไว้เหลือแต่ทองแดงที่เป็นรูพรุน ซึ่งแม้ว่ารูปทรงจะเหมือนเดิม แต่ความแข็งแรงจะลดลง ปัญหาดังกล่าวสามารถลดลงได้โดยการเติมดีบุกประมาณ1%ลงในทองเหลือง

6.2 Graphitization ของเหล็กหล่อเทา คือ การผุกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากเหล็ก (อาโนด) ผุกร่อนไป เหลือตาข่ายกราไฟต์ลักษณะแผ่น (Graphite Flake) ที่เป็นคาโธดไว้ ทำให้โครง สร้างเหล็กหล่อเทาสูญเสียความแข็ง การแก้ปัญหาทำโดยการใช้เหล็กหล่อ กราไฟต์กลมหรือ เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable Cast Iron) แทน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. การกัดเซาะ (Erosion Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากทั้งทางเคมีและทางกล เช่น ในท่อส่งสารละลายที่กัดกร่อน ซึ่งอาจมี สารแขวนลอยของแข็งผสม การกัดกร่อนแบบนี้จะถูกเร่งด้วยการชนของอนุภาค ซึ่งอาจทำให้ เนื้อโลหะหลุดออก หรือแค่ทำให้ออกไซด์แน่นที่ปกป้องผิวหลุดออก เปิดให้เนื้อโลหะถูกกัด กร่อนง่ายขึ้น

8. Stress corrosion

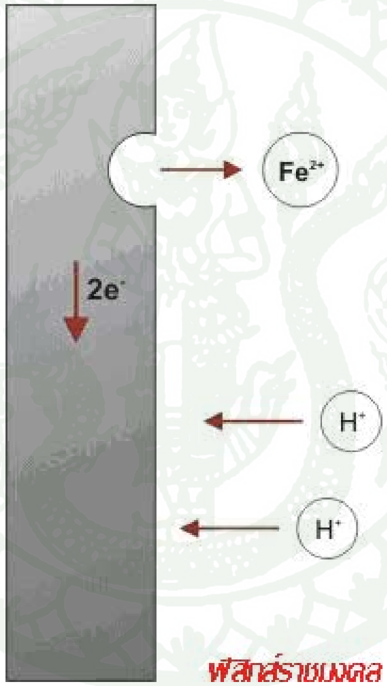
เป็นการกัดกร่อนที่เกิดโดยความเค้นและสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อน โดยสภาพความเค้นของ โลหะอาจเกิดจากความเค้นภายในเหลือค้าง (Residual internal stress) เช่น จากการขึ้นรูปเย็น (Cold forming) ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยทำการอบอ่อน (Annealing) หลังการขึ้นรูป, การเย็นตัวอย่างไม่สม่ำเสมอจากอุณหภูมิสูง เป็นต้น หรืออาจเกิดจาก ความเค้นจากภายนอก เช่น การสั่นสะเทือน, การรับการดัดโค้ง, ผลของความร้อน (ขยายตัวหรือหดตัว) เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

http://www.electron.rmutphysics.com/physics-glossary/index.php?option=com_content&task=view&id=1273&Itemid=32

anodic reaction ปฏิกิริยาแอโนดิก

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อน M - > M^{n+} + ne^- เมื่อ M คืออะตอมของโลหะซึ่งให้อิเล็กตรอนออกมา n ตัวแล้วกลายเป็นไอออนบวก



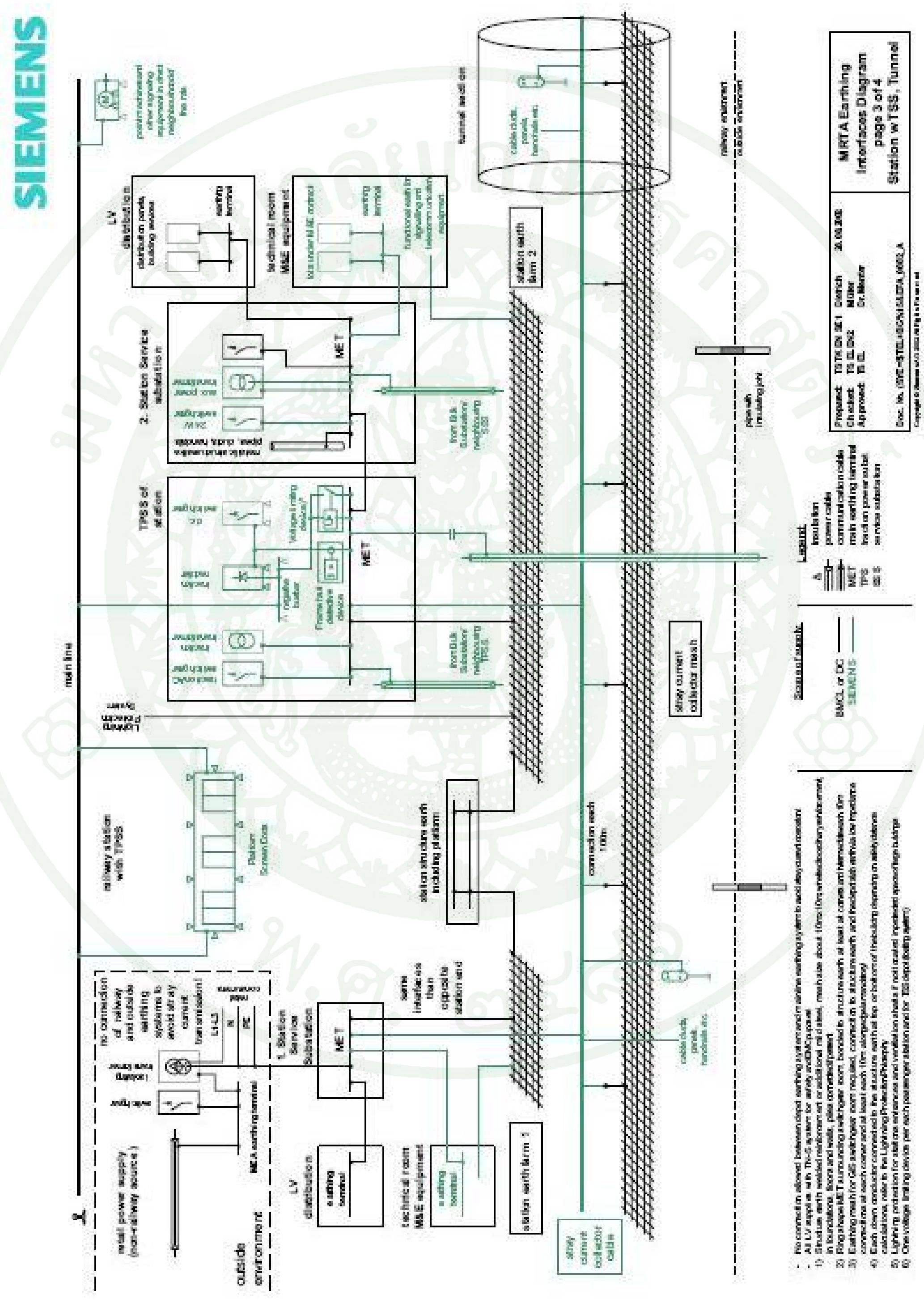
ภาพผนวกที่ ก12 ปฏิกิริยาแอโนดิก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ระบบการเชื่อมต่อการต่อลงดินของโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ข1 ระบบการเชื่อมต่อการต่อลงดินของโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

มาตรฐาน EN 50122-2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

EN 50122-2

December 1998

SC9XC/WG C1 (Con) 235

English version

RAILWAY APPLICATIONS

Fixed Installations

**Protective Provisions
against the effects
of
stray currents
caused by d.c. traction systems**

Applications Ferroviaires

Installations fixes

Mesures de protection
contre les effets des
courants vagabonds issus
de la traction électrique
à courant continu

Bahnanwendungen

Ortsfeste Anlagen

Schutzmaßnahmen gegen
die Auswirkungen von
Streuströmen verursacht durch
Gleichstrombahnen

Revision green Group 3.12.98 Brüssel

Will, Armstron, Roth, Schneider

CENELEC

European Committee for Electrotechnical Standardisation
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung

Central Secretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brussels

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Contents:

		Page:
Foreword		2
1	Scope	3
2	Normative references	4
3	Definitions	5
4	General	9
5	Traction power supply system	10
6	Track system	11
7	Influenced structures	14
8	Protection methods applied to metallic structures	17
Annex A	(informative) Measurement of the conductance per unit length of the running rails	18
Annex B	(informative) Examples for protection methods applied to metallic structures	22
Annex C	(informative) Estimation of the longitudinal voltage in reinforced railway structures	24
Annex D	(informative) Bibliography	26

Foreword

To be added by CLC/CS

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1 Scope

This standard specifies requirements for protective provisions against the effects of stray currents which result from the operation of d.c. traction systems.

As experience for several decades has not shown evident corrosion effects from a.c. traction systems and actual investigations are not completed, this standard only deals with stray currents flowing from a d.c. traction system.

This standard applies to all metallic fixed installations which form part of the traction system, and also to any other metallic components located in any position in the earth, which may carry stray currents resulting from the operation of the railway system.

This standard applies to all new electrification of a d.c. railway system. The principles may also be applied to existing electrified systems where it is necessary to consider the effects of stray currents.

The range of application includes:

- railways;
- guided mass transport systems such as:
Tramways, elevated and underground railways, mountain railways, trolleybus systems and magnetic levitated systems;
- material transportation systems.

This standard does not apply to:

a) mine traction systems in underground mines;

b) cranes, transportable platforms and similar transportation equipment on rails, temporary structures (e.g. exhibition structures) in so far as these are not supplied directly from the contact line system and are not endangered by the traction power supply system;

c) suspended cable cars;

d) funicular railways;

e) maintenance work.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2 Normative references

This European Standard incorporates by dated or undated references, provisions from other publications. These normative references are cited at the appropriate places in the text and the publications are listed hereafter. For dated references, subsequent amendments to or revisions of any of these publications apply to this European Standard only when incorporated in it by amendment or revision. For undated references the latest edition of the publication referred to applies.

EN 50122-1	Railway Applications Fixed installations Protective provisions relating to electrical safety and earthing
EN 50162*)	Cathodic protections of buried or immersed metallic structures - General principles (Dealt by CEN/TC262/SC2/WG1)
IEC 60050(826)	International Electrotechnical Vocabulary Chapter 826: Electrical installations of buildings

*) in preparation

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3 Definitions

For the purposes of this standard, the following definitions apply:

3.1 stray current

A current which follows paths other than the intended paths.

3.2 stray current zone

Zone in which currents may be exchanged between a d.c. traction system and metallic structures or earth.

NOTE: Such a stray current zone may extend over a distance of a few kilometres.

3.3 corrosion

The chemical or electrochemical reaction of a metal with its environment, resulting in its progressive degradation or destruction.

NOTE: This standard deals with with corrosion by electrochemical reaction.

3.4 cathodic protection

A method to protect a metal from corrosive attack by causing a direct current to flow from its electrolytic environment into the entire metal surface.

3.4.1 polarized electric drainage; polarized drainage

A form of drainage of stray currents in which the connection between a protected structure and a traction system includes a unidirectional device or devices such as rectifier or a relay and contactor.

3.4.2 forced drainage

A form of drainage in which the connection between a protected structure and a traction system includes an independent source of direct current.

3.4.3 impressed current installation

A rectifier or other d.c. source supplying direct current to a protected structure in order to achieve the necessary protection potential.

3.5 protection potential

The more negative level to which the potential of a metallic structure, with respect to a specified reference electrode in an electrolytic environment, has to be depressed in order to effect cathodic protection of the structure.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.6 return circuit

All conductors which form the intended path for the traction return current and the current under fault conditions.

NOTE: The conductors may be for example:

- running rails;
- return conductor rails;
- return conductors;
- return cables.

3.7 track return system

A system in which the running rails form a part of the return circuit.

3.8 return conductor

Conductor, which parallels the track and which is connected to the running rails at periodic intervals.

3.9 return conductor rail

A conductor rail used instead of the running rails for the traction return current.

3.10 return cable

An insulated return conductor forming part of the return circuit and connecting the rest of the return circuit to the substation.

3.11 return cable busbar

A busbar in substations at which return cables terminate.

3.12 d.c. (traction) substation

An installation the main function of which is to supply a contact line system, at which the voltage of a primary supply system is converted to the voltage of the contact line.

3.13 traction return current

The sum of the traction currents returning to the supply source.

Note: The supply source may be a regenarerating vehicle.

3.14 rail joint bond

A conductor ensuring the electrical continuity of a rail at a joint.

3.15 insulated rail joint

A mechanical rail joint which longitudinally separates the rail electrically.

3.16 rail-to-rail cross bond

An electrical bond that interconnects the running rails of the same track.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.17 track-to-track cross bond

An electrical bond that interconnects tracks.

3.18 earth [IEC 50 - 826-04-01]

The conductive mass of the earth, whose electric potential at any point is conventionally taken as zero.

3.19 earth electrode [IEC 50 - 826-04-02]

A conductive part or a group of conductive parts in intimate contact with and providing an electrical connection with earth.

3.20 tunnel earth

The electrical interconnection of the reinforcing rods of reinforced concrete tunnels, and in the case of other modes of construction, the conductive interconnection of the metallic parts of the tunnel.

3.21 structure earth

The electrical interconnection of the reinforcing rods of structures, and in the case of other modes of construction, the conductive interconnection of the metallic parts. Examples are reinforced railway structures such as bridges, viaducts and reinforced trackbed.

3.22 rail to earth resistance

The electrical resistance between the running rails and the earth.

NOTE 1: For d.c. traction systems in tunnels the measurement is made between the running rails and tunnel earth.

NOTE 2: In this standard the rail to earth resistance refers to a single-track installation, unless otherwise explicitly specified.

3.23 conductance per unit length

The reciprocal value of the rail to earth resistance per unit of length.

NOTE : In this standard the conductance per unit length refers to a single-track installation, unless otherwise explicitly specified.

3.24 **equipotential bonding** [IEC 50 - 826-04-09]

Electrical connection putting various exposed conductive parts and extraneous conductive parts at a substantially equal potential.

3.25 **equipotential bonding conductor** [IEC 50 - 826-04-10]

A protective conductor for ensuring equipotential bonding.

3.26 rail potential

The voltage occurring under operating conditions when the running rails are utilized for carrying the traction return current, or under fault conditions, between running rails and earth.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.27 (effective) touch voltage

Voltage under fault conditions between parts when touched simultaneously.

NOTE: The value of the effective touch voltage may be appreciably influenced by the impedance of the person in contact with these parts.

3.28 accessible voltage

That part of the rail potential under operating conditions which can be bridged by persons, the conductive path being conventionally from hand to both feet through the body or from hand to hand (horizontal distance of 1 m to a touchable part).

3.29 closed formation

Area where the top of the running rails is at the same level as the surface.

3.30 open formation

Area where the running rails are laid above the surface.

3.31 railway authority

The person or organisation who owns or is responsible for the overall management of the relevant railway infrastructure.

3.32 validation

The process of demonstrating by test and analysis that the system under consideration meets in all respects the specification for that system.

3.33 verification

The process of determining for each phase of the safety lifecycle that the output meets in all respects the objectives and requirements set for the specific phase, for example, forward traceability from the requirements specification through each stage of the design documentation to the final design.

NOTE: Verification may include testing.

3.34 earthing

The connection of conductive parts to an appropriate earth electrode.

3.35 open traction system earthing

The connection of conductive parts to the track return system or the track return system to earth by a voltage-limiting device or by circuit-breakers, which make a conductive connection either temporarily or permanently if the limited value of the voltage is exceeded.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4 General

4.1 d.c.traction systems may cause stray currents which could adversely affect both the railway concerned and / or outside interests. In order to determine the extent of the problem an assessment study shall be carried out in co-operation with the affected parties. The outcome of this action will assist at the design stage to establish the optimum range of solutions for any identifiable effects. Any provisions adopted to control the effects of stray currents shall be subjected to validation and verification according to the provisions of this standard. If no specific effect / remedy is determined consideration shall be given to the establishment of a regime of periodical checks.

All connections to the track return systems shall be approved by the railway authority.

Protective provisions against electric shock shall take precedence over provisions against the effects of stray currents. See EN 50122-1.

NOTE: The major effects of stray currents can be:

- corrosion and subsequent damage of metallic structure where stray currents leave the metallic structures;
- the risk of overheating, arcing and fire and subsequent danger to equipment and persons not necessarily within the railway authority's area of responsibility;
- influence on non-immunized signalling and communication systems;
- influence on unrelated cathodic protection installations;
- influence on unrelated a.c. and d.c. power supply systems.

4.2 The following systems which may produce stray currents shall be considered:

- d.c. traction systems using running rails carrying the traction return current including track sections of other traction systems bonded to the tracks of d.c. traction systems

- d.c. trolleybus systems which share the same power supply with a system using the running rails carrying the traction return current;

- d.c. traction systems not using running rails carrying the traction return current.

4.3 All systems which may be affected by stray currents shall be considered such as:

- pipeworks;
- cables with armour or metal shield;
- tanks and vessels;
- earthing systems;
- concrete constructions containing metal;
- buried metallic structures;
- unrelated cathodic protection installations;
- signalling and telecommunication systems.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5 Traction power supply system

5.1 The traction power supply system, the return circuit and the earthing system shall be considered by a study. In order to allow the assessment of the stray current effects, the study shall include aspects such as:

- distance between the substations;
- return circuit bonding;
- insulation of the rails and other structures from earth;
- additional corrective provisions (see 6 and 7).

5.2 Where required the output voltage of individual substations shall be adjusted in order to minimize stray current effects.

5.3 If trolleybuses and tramways receive their traction current from the same substation, one of the trolley contact wires may be connected with the track return system at one or several points provided that the track return system allows the continuous passage of current. In this case it shall be checked to determine whether the protective provisions for tramways to minimize stray current effects are still sufficient.

5.4 The return cable busbars in substations and similar installations shall be operated so that they are insulated from earth. Where required for safety reasons an automatic voltage-limiting device to connect between the return cable busbar and earth shall be provided in accordance with 7.2.6. For substations in depots and workshops see 7.4.

5.5 Return cables shall have an insulating outer sheath. Return conductors and return conductor rails shall be insulated from earth.

NOTE 1: Where mechanical damage is likely, return cables should have an additional protection.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6 Track system

6.1 Rail system

NOTE 1: In order to minimize stray current caused by a d.c. traction system, the most effective provisions are those which aim at confining the traction return current inside their intended metallic return circuit. This can be achieved either by providing a dedicated conductor for the traction return current (fourth rail), or, when the running rails are used as part of the return circuit, by assuring a high level of insulation of the running rails and of the whole return circuit from earth. Additional improvements can be attained by decreasing the longitudinal resistance of the return circuit.

NOTE 2: When pre-existing earth current distribution is a concern, a high level of insulation of the running rails from earth is also important in limiting the disturbance of the pre-existing earth current distribution by the new railway structures.

6.1.1 Rail to earth insulation

6.1.1.1 Values for conductance per unit length

For areas where there is a risk of serious stray current effects the conductance per unit length shall be sufficiently low during construction in order that the values given in table 1 can be maintained during normal operation.

Table 1: Recommended conductance per unit length *G'* for single track sections

Traction system	Open air *S* / km	Tunnel *S* / km
railway	0,5	0,5
Mass transportation system in open formation	0,5	0,1
Mass transportation system in closed formation	2,5	-

NOTE 1: The values given in table 1 are based on two running rails per track.

NOTE 2: Provisions to achieve the values for railways and mass transportation systems in open and closed formation are:

- clean ballast
- wooden sleepers or concrete sleepers with insulated fastening systems
- adequate clearance between running rails and ballast
- effective water drainage

NOTE 3: Provisions to achieve the improved (lower) values for closed formation systems are for instance:

- embedding the running rails in an insulating resin bed
- interposing insulating layers between the tracks and the supporting structure.

NOTE 4: In order to demonstrate compliance with table 1 a recognized measurement method should be used such as given in Annex A.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.1.1.2 Level crossings

At level crossings, where the running rails are laid in a closed formation, care shall be taken to avoid increasing the conductance per unit length significartly above the typical value of the adjoining track.

6.1.1.3 Grassed areas

For tracks in grassed areas special provisions shall be taken to achieve and maintain the level of insulation (according to table 1).

6.1.1.4 Fourth rail systems

In the case of return conductor rail systems (fourth rail), both conductor rails shall be effectively insulated from earth at a level commensurate with the maximum voltages to ground that can be applied to the rails.

6.1.1.5 Stray current assessments

When stray current assessments are to be made over a period of time, a recognized method shall be used. Annex A shows a method of deterimining the value cf cunductance per unit length.

NOTE: Successive measurements should use the same method as used for the first value or the reference value.

6.1.2 Return circuit resistance

The longitudinal resistance of the track return system shall be low; therefore rails shall be welded or connected by rail joint bonds of low resistance such that the overall longitudinal resistance of the rails is not increased by more than 5%.

NOTE: The longitudinal resistance can be reduced by:

- use of running rails with greater square section
- cross bonding of the running rails and / or the tracks (where signalling considerations allow)
- additional cables connected in parallel with the tracks (where signalling considerations allow)

6.2 Other parts of the track system

6.2.1 No part of the traction return circuit shall have direct conductive connections to installations, components or structures which are not insulated from earth.

If the connection with a return circuit is unavoidable for reasons of protection against electric shock, provisions shall be taken to reduce the stray current effects. These can be for example:

- open traction system earthing. In this case the voltage-limiting device shall conform to the requirements given in 7.2.6;

- insulation of the equipment or components that are connected to the running rails, relative to foundations or components that are earthed;

- insulation of the structure from earth.

6.2.2 Insulation of the running rails shall be co-ordinated with other provisions to ensure that accessible voltages due to the traction return currents and touch voltages due to currents under fault conditions do not exceed the admissible values given in EN 50122-1.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.2.3 Stationary and portable electrical installations and equipment which are connected to the return circuit shall not be supplied directly from a public low-voltage network of the TN system. (Solutions see EN 50122-1, 6.2.4.3).

6.2.4 The tracks of d.c. traction systems shall not have any direct conductive connection to track sections of other traction systems.

NOTE: Track sections of other traction systems can, if necessary, be connected in special cases to the return circuit if they fulfil the requirements given in 6.1.

However at certain interfaces, particularly those between a.c. and d.c. traction systems, additional provisions shall be made in order to minimize stray current from the common track that forms part of the return circuit for both systems.

Any additional provisions shall not affect other safety criteria particularly accessible voltage limits, and the operation of power supply protection, track circuits and communication systems.

6.2.5 Rail-to-rail cross bonds, track-to-track cross bonds and other bonds which may come in contact with earth shall be insulated from earth. This does not apply to rail tie bars.

6.2.6 Where d.c. traction systems approach buried pipes or cables, efforts shall be made to ensure that the metal parts are kept as far away as practicable to avoid stray currents.

NOTE: A minimum distance of 1 m has been found to be adequate for this purpose.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7 Influenced structures

7.1 General

The resistance between conductive structures which are not insulated from earth and the track return system shall be high. Especially a direct connection is not allowed except in the case of depots and workshops(see 7.4). A direct connection to earth may also be allowed in certain industrial systems with d.c. traction taking into consideration the particular surrounding conditions.

7.2 Tunnel structures

7.2.1 In a tunnel structure which incorporates conductive components it may be necessary to make provisions to limit possible effects of stray currents. The requirements for protection against electric shock shall be taken into account.

NOTE 1: The provisions to reduce the stray current effects in tunnel structures with conductive components can depend on:

- whether the predominant source of the stray current is internal or external to the tunnel;
- whether the main priority is to protect the tunnel metallic structures, or to protect other metallic structures external to the tunnel and the railway.

7.2.2 At the end of tunnels where the tracks outside the tunnel are bedded in a closed formation and when they are not insulated from earth, there shall be installed insulated rail joints in each running rail. The insulated rail joints shall be run open to reduce stray current both into and within the tunnel. In this case a separate tunnel traction power supply is necessary and the overhead contact line of the tunnel shall be electrically segregated from that outside the tunnel.

7.2.3 In the case of tunnels with reinforced concrete structures or other conductive structures it is possible that stray currents can flow into such structures and from there cause influence to other conductive structures outside the tunnel. In this case the effect of such influence shall be reduced by means of equipotential bonding in the lower part of the individual tunnel sections or other conductive structures. For this purpose a sufficient number of reinforcing bars, mats connected together, other conductive structural parts and if necessary, additional conductors of appropriate cross section laid within the tunnel shall be used.

NOTE 1: As a direct measurement of stray currents is impractical, the potential of the structures against earth is taken for the assessment. Experience has shown that there is no cause for concern, if the average value of the potential shift in the hour of highest traffic does not exceed +100 mV.

In order to avoid inadmissible stray current effects at the tunnel structure and at structures outside of the tunnel, the longitudinal voltage between any two points of the tunnel structure should be calculated. As an example for calculation see Annex C. This is a conservative procedure which ensures that the actual values for the tunnel potential against earth will be lower.

NOTE 2: Individual tunnel sections in particular cases may be excepted from the equipotential bonding of the rest of the tunnel. The equipotential bonding of the other tunnel sections may be achieved by means of an insulated cable extending over the segregated tunnel section.

NOTE 3: For stray current purposes only, it is possible to achieve adequate electrical conductivity of rebars by means of conventional steel wire wrapping.

7.2.4 In areas where the influence of stray currents on structures outside the tunnel is not significant and when a sufficiently high value of rail to earth resistance cannot be achieved (due to humidity or ballast

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

which is not sufficiently clean) the main consideration shall be the corrosion of the tunnel metallic structures.

Reinforced concrete tunnel structures shall be divided into longitudinal sections by insulated joints in the case where stray currents from other adjacent systems can flow along the tunnel structure, thus causing an undesirable electrical connection between different and very distant city areas.

NOTE: If the resistance between these structures and earth is relatively high, for example in rock tunnels, the reinforced concrete tunnel structures may also be divided into longitudinal sections by insulated joints.

If there is any risk of an inadmissible voltage between simultaneously accessible parts, refer to EN 50122-1.

At ring joints between each section terminals shall be provided for test purposes. A reliable electrical connection shall be made between these terminals and the longitudinal reinforcing bars.

NOTE: Normally, no connection will be made between the terminals of adjacent sections.

7.2.5 The reinforcement of steel-reinforced concrete tunnels and tunnel components in iron materials shall not have any conductive connection to pipes and cables located outside the tunnel or to the return circuit or to any adjacent systems which are not insulated from earth. Connections of the tunnel reinforcement to its own earth leads in order to satisfy earthing requirements for protective provisions is permissible.

7.2.6 If the voltage-limiting devices between the return circuit and the metallic components of the tunnel structure are provided as a protective provision to prevent inadmissible voltages in accordance with EN 50122-1, the following conditions shall be satisfied:

If the voltage-limiting device has operated, either it shall automatically reset after a maximum of 10 s or, if it is not reset, a procedure shall be established to note and rectify the cause of such event rapidly.

The voltage-limiting device shall be designed to operate under the highest envisaged value of current under fault conditions. Once closed, it shall not open until this current has reduced to a safe value (lower than the rated breaking current of the device).

7.2.7 In tunnel structures which have conductive connections to adjacent buildings (e.g. railway stations, shops) consideration shall be given to monitor the potential of the track return system of the d.c. traction system so that appearance of low-resistance conductive connections between the return circuit and the structure can be detected. Such connections shall be removed without delay.

7.3 Bridges, viaducts and reinforced trackbed

For such structures the same principles shall be applied as for tunnels.

7.4 Depots and workshops

If in deviation from the general statement in 7.1 a direct connection between the conductive structure and the return circuit is appropriate provisions shall be taken as follows:

The running rails in depots or workshops shall be separated from the main line by insulated rail joints and the traction power shall be supplied by separate rectifiers or other means (see EN 50122-1).

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7.5 Cables, pipework and power supply from outside

At the entrance of reinforced concrete or metallic railway structures (such as viaducts, depots and workshops), all metallic pipework, hydraulic lines, cable sheaths (either power or telecommunication cables) and connections to earth (e. g. for protective purposes) coming from outside shall be separated electrically from structure in order to avoid any conductive connection between structure earth and external earth electrodes. Metal pipework inside the tunnel shall not bypass insulated ring joints.

NOTE 1: This may be achieved by:

- fitting of insulation parts in the pipes or alternatively complete insulation from the structure earth
- installation of transformers with separate windings or by the use of the TT or IT systems in accordance with EN 50122-1.

NOTE 2: When necessary for safety reasons, every section of metal pipe may be connected to the metallic structure.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8 Protection methods applied to metallic structures

The provisions in this standard are intended to reduce stray currents and their corrosive effects. Conventional protection methods against natural corrosion can be used if they are considered to be necessary. If additional protection methods are taken in account, the overall protection concept shall be agreed with affected parties and comply with the relevant standards concerning corrosion protection.

Examples for protection methods for offended structures are given in Annex B.

NOTE: Non-polarized (direct) drainage systems should not be connected to the traction system.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Annex A (informative)

Measurement of the conductance per unit length of the running rails

A.1 General

The measurement of the rail resistance is necessary to get the relation between the rail current and the resulting voltage for the subsequent determination of the conductance per unit length.

NOTE: The measuring d.c. current I is periodically to be switched on and off in order to check other effects during the off-period. The resulting voltage is called:

$$\Delta U = U_{on} - U_{off}$$

Variation of reading values should be taken into account by several measurements. Significant differences resulting from changed polarity of the measuring circuit should be investigated.

The method is valid only if these measurements are performed without any traction current. Where this is not practical, the measurements should be made at the same time in order to eliminate the effect of currents other than the measuring current.

The measuring points at the running rails should be at least 1 m away from the injection points.

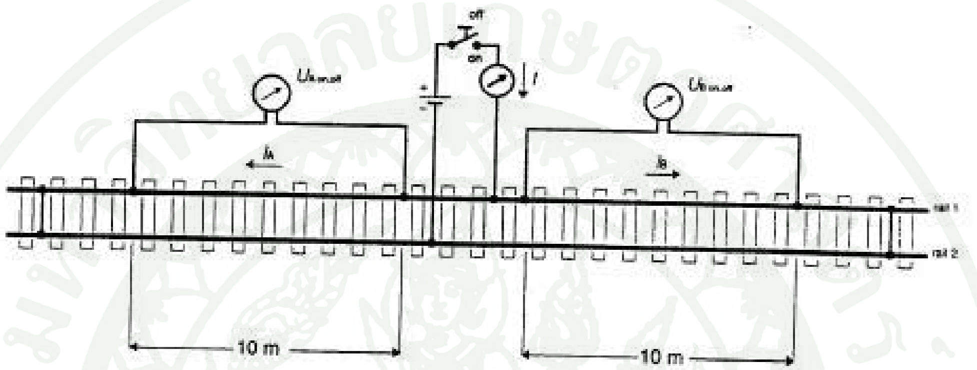
A.2 Measurement of the rail resistance

For the measurement of the rail resistance the method shown in Figure A.1 is recommended.

The longitudinal voltage drop U_A and U_B is measured for each of the two adjacent sections of rail. The resistance of rail 1 and rail 2 is calculated according to the equations in Figure A.1 .

The measurement postulates that no rail-to-rail crossbonds or track-to-track crossbonds are connected within the measuring area.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



$$R_{R\,10m} = \frac{(U_{A\,on} - U_{A\,off}) + (U_{B\,on} - U_{B\,off})}{I}$$

Where:

$R_{R\,10\,m}$ is the longitudinal resistance of a rail section of 10 of rail 1 in Ohms; rail 2 accordingly

I is the injected current, in Amperes

$U_{on,off}$ is the voltage drop in the rail 1 in Volts, with and without injected current; rail 2 accordingly

Figure A.1: Measurement of the rail resistance for a rail of 10 m length

A.3 Determination of the conductance per unit length between running rails and tunnel

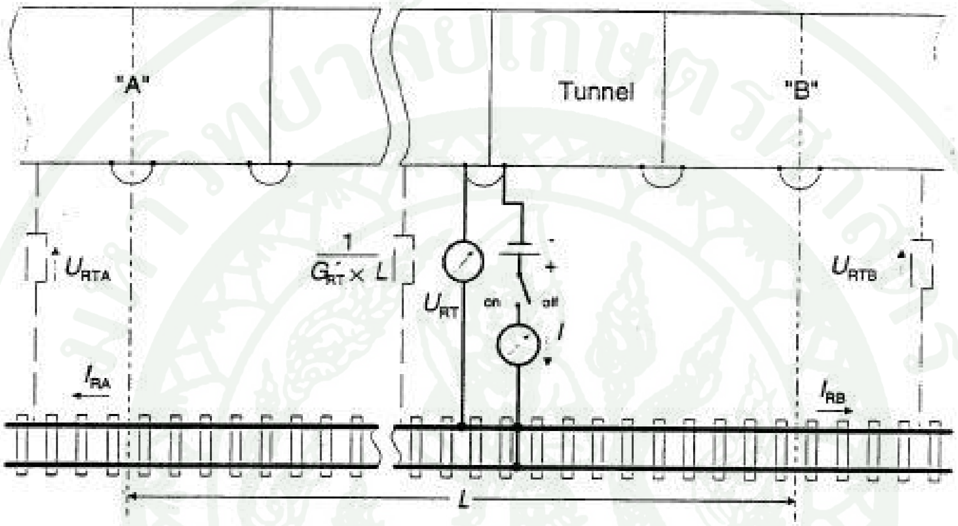
A special measuring arrangement and measuring sequence allows the measurement of the conductance per unit length without the need of insulated rail joints. The conductance per unit length G'_{RT} is to be measured in accordance with Figure A.2. The same method can be applied for viaducts and for reinforced trackbed.

The measuring d.c. current I, injected between the rails and the structure, is periodically switched on and off. The values necessary to determine G'_{RT} in equation fig. A.2 will be measured. Especially the currents I_{RA} and I_{RB} can be gained with help of the procedure described in A.2 and shown in Figure A.1.

It should be sure that no accidental connection and no voltage-limiting device between the running rails and the tunnel structure can influence the measurements.

Insulated rail joints should separate tracks in open air, which may adjoin to tunnel sections in order to exclude effects from outside.

Practical experience shows that the length L of a measuring section should not exceed 4 km.



$$G'_{RT} = \frac{3}{L} \times \frac{I - I_{RA} - I_{RB}}{\Delta U_{RT} + \Delta U_{RTA} + \Delta U_{RTB}} \qquad \Delta U = U_{on} - U_{off}$$

Where:

G'_{RT}	is the conductance per unit length between rails and tunnel, in Siemens per kilometre
I	is the injected current, in Amperes
I_{RA}, I_{RB}	is the current flowing beyond the ends A, B of the measured section, in Amperes
U_{RT}	is the voltage between the rail and the tunnel at the point of injection, in Volts
U_{RTA}, U_{RTB}	is the voltage between the rail and the tunnel at the ends A, B of the tunnel section, in Volts
L	is the length of the section to be measured, in kilometres

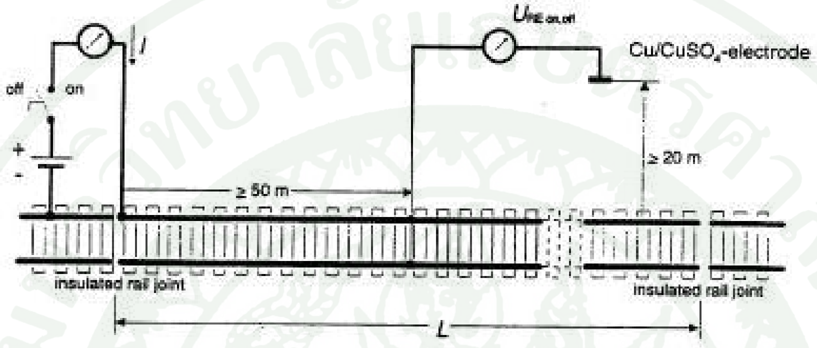
Figure A.2: Measuring arrangement for the conductance per unit length G'_{RT} between rails and tunnel

A.4 Determination of the conductance per unit length for track sections in open air

The track section to be examined is separated from the continuing lines by insulated rail joints. The length of the track section to be examined should not exceed 2 km.

The conductance per unit length of the separated track section is determined in accordance with the method shown in Figure A.3. A measuring d.c. current I is injected into the rails at both sides of the insulated rail joints. The current should be periodically switched on and off. The injected current flows from the rails of the track section to be examined into the earth and from there into the rails of the connected track section. The voltage between rail and earth U_{RE} and the injected current I is decisive for the determination of the conductance per unit length. The voltage should be measured using an unpolarized copper/copper sulphate electrode ($Cu/CuSO_4$-electrode) as earth electrode. This electrode is to be placed in the track section to be measured, at least 50 m away from the injection point (insulated rail joint) and at least 20 m away from the track.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



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

Where:

G'_{RE}	is the conductance per unit length between track and earth in Siemens per kilometre
I	is the injected current, in Amperes
U_{RE}	is the voltage between the rail and earth, in Volts
L	is the length of the section to be measured, in kilometres

Figure A.3: Determination of the conductance per unit length G'_{RE} for track sections in open air

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Annex B (informative)

Examples for protection methods applied to metallic stuctures

B.1 General

This Annex provides examples for protection methods. For further information refer also to standard EN 50162*)

B.2 Polarized electric drainage

If the location of the offending structure permits, the potential of the running rails being sufficiently and continuously mainly negative, it is possible to bring stray currents back to their intended circuit (track return system). The "polarized electric drainage" is obtained by means of diodes or relays, which lets the current flow in one direction only. An example is given in figure B.1.

NOTE 1: Drainage can provide linear or voltage dependent resistance, adjustable in certain cases, in order to limit the intensity of the current at the source of the influence.

NOTE 2: The connection of any structure to the negative busbar in a substation even via a polarized electric drainage device will increase the overall stray current. Therefore the connection of any conductive structure to the negative busbar should be made only with due consideration given to the overall effect on other structures which may be influenced. This is generally applicable only when the structure to be protected is remote from other structures.

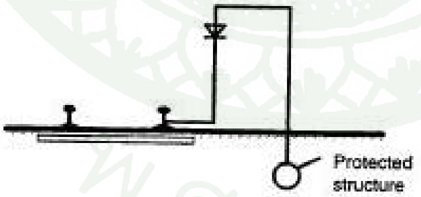


Figure B.1: Polarized electric drainage

B.3 Forced drainage

In certain very exceptional cases it is possible to use a forced drainage method. This is an impressed current system, where the running rails are the anode. The use of this method requires the limitation of the drainage current, especially in densely populated areas. An example is given in figure B.2.

---

*) in preparation

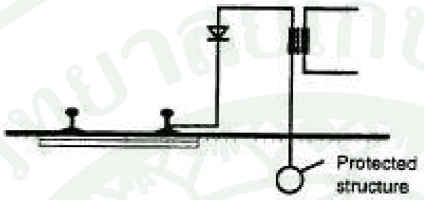


Figure B.2: Forced drainage

B.4 Impressed current cathodic protection

A system in which the impressed current is caused to flow from the impressed current anode to the protected structure via earth. An example is given in figure B.3.

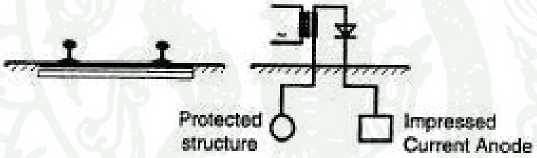


Figure B.3: Impressed current cathodic protection

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Annex C (informative)

Estimation of the longitudinal voltage in reinforced concrete railway structures

The longitudinal voltage drop in reinforced structures of tunnels, viaducts and reinforced trackbeds can be used for the assessment of stray current effects.

If the longitudinal voltage drop is less than 0.1 V, the conditions according to 7.2.3 are matched.

The longitudinal voltage drop in reinforced railway structures, caused by train operation, depends on the following affecting parameters:

- length of the considered line section
- length of the adjacent line sections
- conductance per unit length between the running rails and the structure
- conductance per unit length between the structure and earth
- longitudinal resistance of the running rails
- longitudinal resistance of the interconnected strucure
- traction return current of the considered line section
- traction return currents of adjacent lines

For the calculation of the longitudinal voltage drop U_T of the interconnected structure for one line section equation (1) can be used.

> NOTE: The calculation method in equation (1) is very conservative. The formula assumes a infinitely long tunnel on each site of the considered section. Furthermore it doesn't take into account the reducing effects of the train movement in adjacent sections and the conductance per unit length of the tunnel structure versus earth. The calculated values can be much higher than in reality.

If the result of the calculation is higher than 0,1 V, a more detailed calculation method should be used.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$U_T = 0{,}5 \times I \times L \times \frac{R'_R \times R'_T}{(R'_R + R'_T)} \times \left(1 - \frac{L_C}{L} \times \left(1 - e^{-(\frac{L}{L_C})}\right)\right) \quad (1)$$

$$L_C = 1/\sqrt{(R'_R + R'_T) \times G'_{RT}} \quad (2)$$

Where:

- U_T is the longitudinal voltage in reinforced railway structure, in Volts
- G'_{RT} is the conductance per unit length, in Siemens per kilometre
- I is the average value of the traction return current of the considered section in the hour of the highest load, in Amperes
- L is the length of the considered line section, in kilometres
- L_C is the characteristic length of the system running rails/structure, in kilometres
- R'_R is the resistance of the running rails per unit length, in Ohms per kilometre
- R'_T is the resistance of the interconnected structure per unit length, in Ohms per kilometre

พ.ศ. ๒๔๘๖
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Annex D (informative)

Bibliography

IEC 60050(811) International Electrotechnical Vocabulary
Chapter 811: Electric traction

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ง

นำส่งข้อมูลประกอบการทำวิทยานิพนธ์

BMCL/MCD/0097/54

22 เมษายน 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บริษัท รถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) BANGKOK METRO PUBLIC COMPANY LIMITED
189 ถนนพระราม 9 แขวงห้วยขวาง เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10310 โทรศัพท์ : 66 (0) 2354-2000 โทรสาร : 66 (0) 2354-2020
189 Rama IX Road, Huai Khwang, Bangkok 10310, Thailand Tel. 66 (0) 2354-2000 Fax. 66 (0) 2354-2020
ทะเบียน บมจ เลขที่ 0107547000451
http://www.bangkokmetro.co.th

ที่ BMCL/MCD/0097/54

22 เมษายน 2554

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
1028
29 เม.ย. 2554
13.30

เรื่อง นำส่งข้อมูลประกอบการทำวิทยานิพนธ์

เรียน รองศาสตราจารย์ วิชัย สุระพัฒน์
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

อ้างถึง หนังสือภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ที่ ศธ 0513.10807/243 ลงวันที่ 28 มีนาคม 2554

สิ่งที่ส่งมาด้วย ข้อมูลเพื่อประกอบวิทยานิพนธ์

ตามที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ขอความอนุเคราะห์จากบริษัท รถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) (บริษัทฯ) ในการให้ข้อมูลแก่ นายสุวิทย์ บัวเพชร นิสิตระดับปริญญาโท เพื่อใช้ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง "การศึกษาการเกิดกระแสรั่วไหล (Stay Current) ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบโครงสร้างใต้ดิน" รายละเอียดตามอ้างถึงนั้น

บริษัทฯ ขอนำส่งข้อมูลดังกล่าว ตามสิ่งที่ส่งมาด้วย และใคร่ขอสงวนสิทธิ์ในการเผยแพร่ข้อมูลดังกล่าว โดยให้ใช้เฉพาะวัตถุประสงค์ที่ระบุมาเท่านั้น ทั้งนี้บริษัทฯ ขอความกรุณาให้จัดส่งวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ ให้กับบริษัทฯ จำนวน 1 ฉบับ ด้วย จักขอบคุณยิ่ง

จึงเรียนมาเพื่อกรุณาทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ดร. สมบัติ กิจจาลักษณ์)
กรรมการผู้จัดการ

เรียน ดร.กันย์
เพื่อทราบ
2 พค.54

ส่วนพัฒนาธุรกิจ
ฝ่ายการตลาดและพัฒนาเชิงพาณิชย์
โทร. (02) 354 – 2000 ต่อ 3291 - 2
โทรสาร (02) 354 – 2000 ต่อ 3264

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อมูลเพื่อประกอบวิทยานิพนธ์

ที่ BMCL/MCD/0097/54

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. Introduction

The purpose of this document is to describe in more detail the Stray Current Monitoring Device (SITRAS® SMS) which will be used to monitor the efficient insulation of the running rails (DC negative pole) from structure earth. It is mandatory to ensure a proper insulation in order to prevent substantial corrosion damage to the steel reinforced tunnel structure. Prolonged connection of running rail and earth is not permissible. Accidental or intended connections between the two systems can be identified by the SITRAS® SMS device, so that proper rectification measures (e.g., by trackwork maintenance) can be directed to the correct locations.

The central stray current monitoring device collects the measured potentials from the short circuiting devices, which are located in the passenger stations. It compares the average positive potentials with reference values taken from the properly insulated system and stored in the monitoring device. In case of discrepancies between stored and measured values, the system generates a fault analysis report.
Please refer to Design Submission PSY/0014.B, section 6, for a description of the methodology and principles of the device. The figure below is taken from this submission.

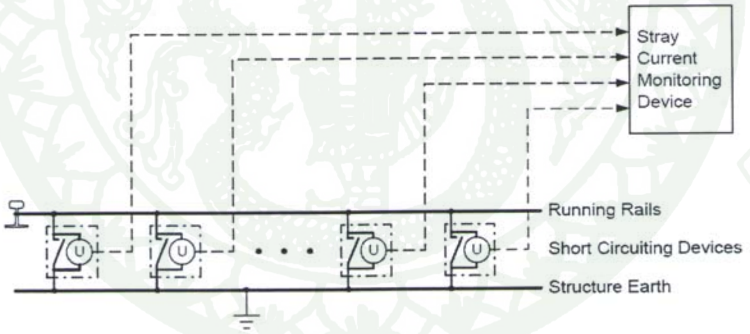


Figure 1: Principle of stray current monitoring

2. Scope

The SITRAS® SMS device consists of a standard industry Personal Computer (PC) running WinCC controller software, which is installed in a 600 mm wide rack together with a customized interfacing controller (based in standard industry SIIMATIC® S7). The PC is equipped which large hard disks, CD-writer, printer and backup UPS system.

The SITRAS® SMS device connects to the OTN node in the main workshop building through RS-422 interface cables. The device shall be placed inside this room.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. Design

3.1. Principle

For a description of the SITRAS®SMS device, please refer to enclosed product bulletin (Attachment 2).

3.2. Architecture and Data Exchange

Please refer to Attachment 1 for an overview diagram of the system.

Each passenger station is equipped with a SCD (short-circuiting device) that records a measurement reading between the rails (negative return) and the earth (structure earth). This value will sent via 4…20 mA current loop to two RTU devices within the respective stations.
This signal and other signals will sent to control station to the SCADA system via OTN (Open transport network) with superposed IEC 60870-5-101 protocol.

The existing COM/SCADA system duplicates all data, which were sent by the RTU 2 in each station from communication network (CN) node in the OCC to the CN-node located in the COM Room in the Main Workshop Building (see picture "Overview structure" line labeled "mirror"). The SITRAS®SMS device makes use of this duplication of the process image as derived from the individual RTU 2's.

The customized control system (based on SIMATIC S7-400) that is part of the SITRAS®SMS device will establish connections to each station over this CN-node. One communication channel (RS 422) is assigned for each of the 19 SCD devices in the system. Because the connections are realized with transparent point-to-point architecture, it is necessary to install one RS 422 -- cable for each station.

The communication is inherently unidirectional: the SITRAS®SMS device can only "listen" to the data on the OTN, not influence or actuate in any way by design. A filter discards all telegrams non related to the data generated by the SCDs, and ensures that only rail voltage data will be further processed. Only this data will be transferred via PROFIBUS-DP to the PC.

The SITRAS®SMS MS device comes with a telephone line modem. It is recommended to make provisions for connection to the telephone network, for purposes of remote diagnosis, troubleshooting or user guidance. During normal operation, the modem connection is not essential and can be unplugged or disabled. Even in connected state, it is definitely impossible to control or supervise any portion of the underground system through this modem connection.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.3. Operation

Operating the SITRAS® SMS device is described in detail in the enclosed product bulletin (Attachment 3).

The system complies with all contractual requirements for recording and analysis of stray current phenomena. For instance, it provides several "baseline measurements", which can be saved during different scenarios (e.g., peak rush hour, off-peak operation, nightly break), and can be used to compare these baselines against the continuous monitoring of the actual situation along the line.

The software uses expert system techniques to analyze the data and identify abnormal situations, and suggest suspected location of the poor rail insulation.

4. Drawing List

Item	Supplier's Drawing Number	Manufacturer	Description
1	Walther/TS EL EN2/02.06.04	Siemens	Overview structure SITRAS® SMS @ MRTA (1 sheet)
2	A52811-E2740-D0001-01-76B1	Siemens	SITRAS® SMS Product Information (4 sheets)
3	A52811-C2740-D0001-01-7619	Siemens	SITRAS® SMS Operating Instructions (54 sheets)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

SITRAS® SMS

Stray-current Monitoring System for DC Traction Power Supplies

The SITRAS SMS stray-current monitoring system is used to monitor the track potential of DC railway networks.

This system permits evaluation of the stray-current conditions of the track and the early detection of insulation deficiencies, thus enabling measures to be taken to prevent damage due to stray-current corrosion.

Features

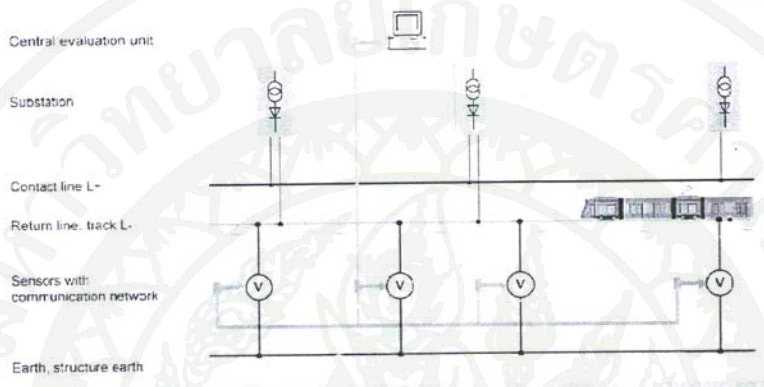
- Continuous monitoring of track potentials during operation
- Automatic location of insulation deficiencies
- Representation, archiving and analysis of track potentials in a central evaluation unit
- Transmission of measured values via the communication network, existing networks can be used
- No interference with stray-current conditions because SITRAS SMS is based on potential measurement

Data acquisition	
Via communication network and SIMATIC NET® interface module	
Maximum number of measuring points	60
Maximum number of lines	5
Representation and archiving	
Instantaneous values	represented as a time characteristic
Short-term and long-term values:	
Average values / Averages of the absolute value	time characteristic characteristic along the line
Dialog languages*	English/German
Analysis of track potentials (location of insulation deficiencies)	
Reference value recording	during operation
Automatic analysis	during operation

*other languages on request

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Design



SITRAS SMS basic design

The SITRAS SMS stray-current monitoring system consists of the following main components:

- Measuring sensors along the track (located about every 1 to 3 km)
- Communication network
- Central evaluation unit (PC with communication interface and SIMATIC® WinCC® software), such as
located in the operations control centre.

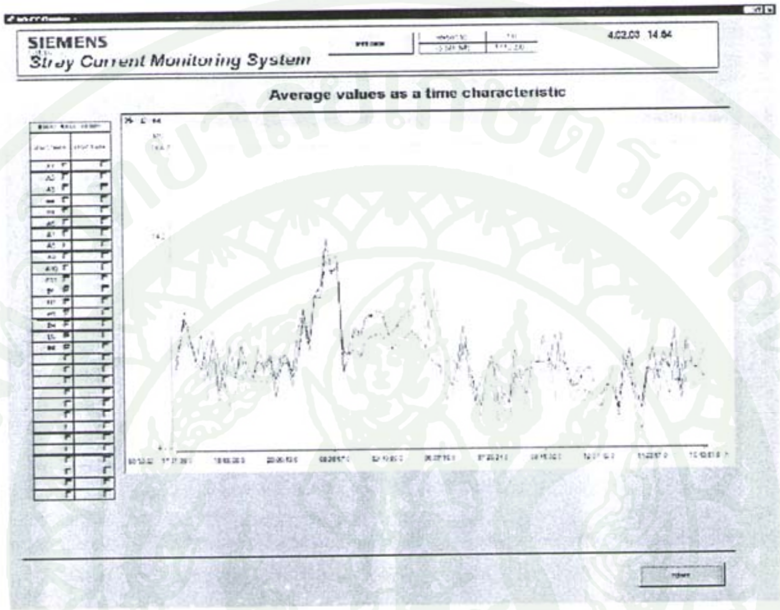
SITRAS SMS collects information about the voltages between return line L- and earth (structure earth) at several measuring points along the tracks to be monitored during railway operations.
The measured values are represented and evaluated in order to locate any insulation deficiencies.

The measured values are transmitted from the sensors to the central evaluation unit via a communication network, by SCADA for example. Existing networks can be used.

Functions
The central evaluation unit with the basic software SIMATIC WinCC performs the following functions:

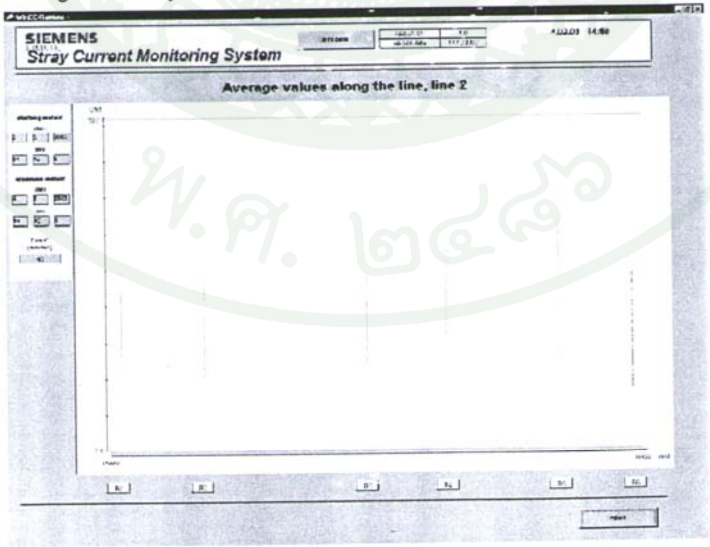
- Data acquisition
- Archiving with multi-level data compression
- Representation of the track potentials at all measuring points
– Instantaneous values as a time characteristic
– Average values and averages of the absolute value as short-term and long-term averages
– Representation of average values as a time characteristic or at a line location
- Location of insulation deficiencies
– Reference value recording
– Automatic analysis

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



Representation of average values as a time characteristic

To locate insulation deficiencies, SITRAS SMS compares the current measured values with previously recorded reference values ("fingerprint"). If the track potentials exceed the tolerance range with respect to certain criteria, a message will be generated. The location of the suspected insulation deficiencies can be pinpointed by means of integrated analysis functions.



Representation of average values along the line

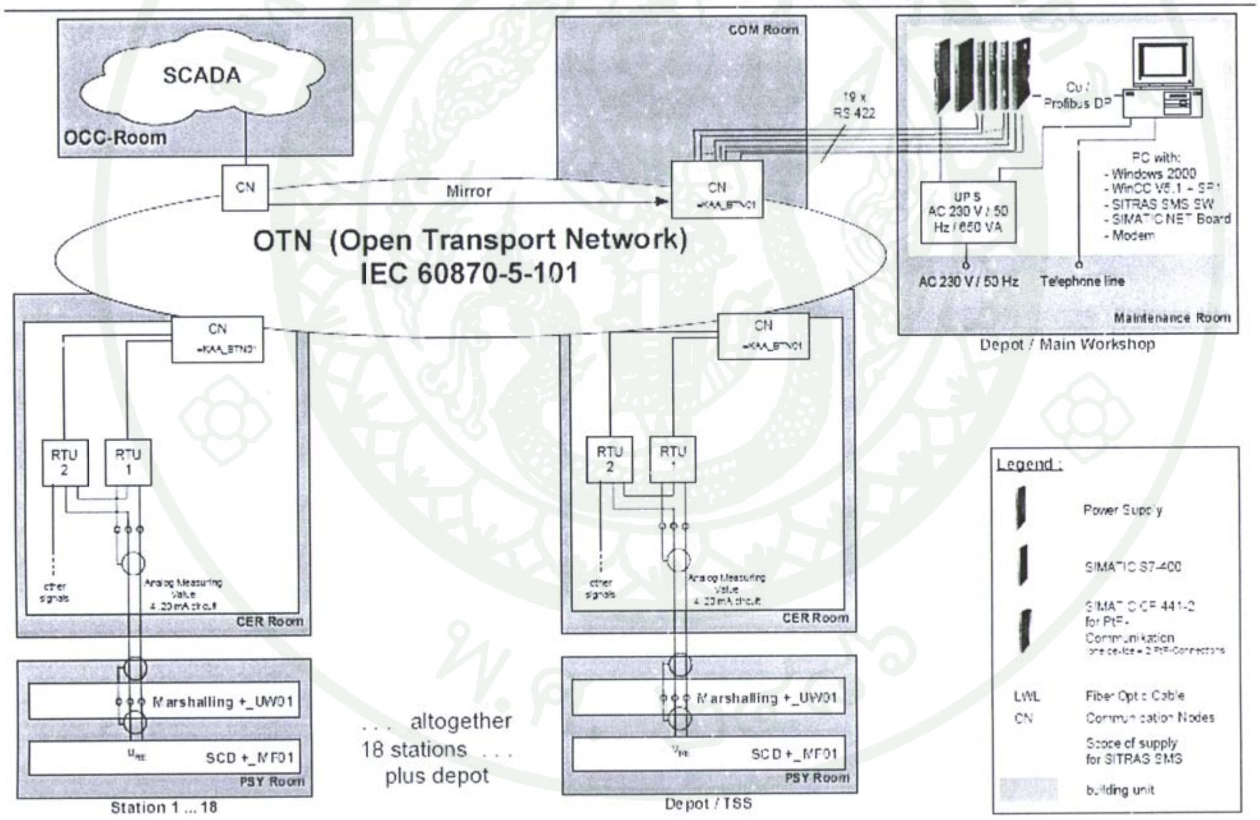
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Data acquisition	
Communication protocols*	Industrial Ethernet, TCP/IP, MPI, PROFIBUS DP / FMS / S7
Representation and archiving	
Archiving of instantaneous values	last 10 days
Short-term values:	
Width of average value window	1...60 minutes
Archiving of average values / Averages of the absolute value	last 500 days
Long-term values:	
Width of average value window	1...7 days
Archiving of average values / Averages of the absolute value	virtually unlimited (only limited by size of hard disc)
Analysis of track potentials (location of insulation deficiencies)	
Width of average value window	1...60 minutes
Daily recording period	parameterizable
Maximum number of reference value records	10

*other protocols on request

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Overview structure SITRAS SMS@MRTA **Transportation Systems**



ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายสุวิทย์ บัวเพชร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	14 ธันวาคม 2523
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับสอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร ระดับ 6 สังกัดฝ่ายวิศวกรรมไฟฟ้าและเครื่องกล
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์