

ศูนย์ข้อมูลข่าวสารของราชการ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดสุโขทัย



กองวิจัย

สมัครสมาชิก | เข้าสู่ระบบ

หน้าหลัก | แผนภาพหน่วยงาน | บุคลากร กวอ. | ติดต่อเรา | แผนผังเว็บไซต์

search ค้นหา

งานศึกษาและจัดทำข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการขนส่งระบบราง

ศึกษาเทคโนโลยีและวิเคราะห์ผลกระทบด้านคุณภาพไฟฟ้า พร้อมจัดทำข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการขนส่งระบบราง

Home > งานวิจัย > งานศึกษาและจัดทำข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการขนส่งระบบราง

1. เพื่อศึกษาแนวทางในการวางแผนระบบไฟฟ้าของ กฟภ. เพื่อรองรับระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง
2. เพื่อศึกษาผลกระทบทางด้านเทคนิคที่มีต่อระบบไฟฟ้าทั้งของ กฟภ. และของผู้ใช้ไฟฟ้าจากระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง พร้อมนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา

ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองของระบบไฟฟ้า และระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง สำหรับใช้ในการศึกษาแต่ละหัวข้อ
2. ได้แนวทางในการวางแผนระบบไฟฟ้า และได้ทางเลือกในการพัฒนาและปรับปรุงระบบไฟฟ้าของ กฟภ. เพื่อรองรับระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง
3. ได้ทราบถึงผลกระทบทางด้านเทคนิคที่มีต่อระบบไฟฟ้าทั้งของ กฟภ. และของผู้ใช้ไฟฟ้า พร้อมนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา

รายงานผลการศึกษา

ดาวน์โหลดเอกสารที่เกี่ยวข้อง [ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการขนส่งระบบราง](#)

เขตร์ จุฬาลักษณ์

2019-01-24 11:21:07

Copyright © 2014 Research Division (RSD), Provincial Electricity Authority (PEA) THAILAND Website: <http://rsd.pea.co.th>
กองวิจัย ฝ่ายวิจัยและพัฒนาการระบบไฟฟ้า ชั้น 12 อาคาร LED กฟภ. (สำนักงานใหญ่) เลขที่ 200 ถนน จามวงส์วาน แขวง ลาดยาว เขต วัฒนา กรุงเทพมหานคร 10900
โทร. 02-590-5570-9 โทรสาร. 02-590-5810

มาตรา 9(8) ข้อมูลข่าวสารอื่นตามที่คณะกรรมการข้อมูลข่าวสารของราชการกำหนด

5) ประกาศคณะกรรมการข้อมูลข่าวสารของราชการ เรื่อง กำหนดให้ข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับงานวิจัยที่ใช้เงินงบประมาณ เป็นข้อมูลข่าวสารที่ต้องจัดไว้ให้ประชาชนเข้าตรวจสอบได้ตามมาตรา 9 วรรคหนึ่ง (8) แห่งพระราชบัญญัติข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า ของการขนส่งระบบราง

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
มิถุนายน 2561

สารบัญ

ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการขนส่งระบบราง.....	1
1. คุณภาพไฟฟ้า.....	3
1.1. การควบคุมระดับแรงดัน และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	3
1.2. การควบคุมความถี่ไฟฟ้า.....	4
1.3. การควบคุมแรงดันกระเพื่อม.....	5
1.4. การควบคุมฮาร์มอนิกส์.....	6
1.5. การควบคุมแรงดันไม่ได้ดุล	7
1.6. การควบคุมการใช้กระแสไฟจากโครงข่ายไฟฟ้า.....	8
1.7. หม้อแปลงที่สถานีย่อย	9
2. การเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	9
3. ระบบป้องกัน.....	14
4. การหยุดรถแบบรีเจนเนอเรทีฟ	14
5. ความปลอดภัย	14
6. การต่อลงดิน.....	18
7. ระบบป้องกันฟ้าผ่า	20
8. การบำรุงรักษา.....	21
ภาคผนวก ก	i
ภาคผนวก ข.....	vii

ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบราง

1. คุณภาพไฟฟ้า

ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องออกแบบระบบควบคุมการจ่ายไฟจากการเชื่อมต่อระบบรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อ ซึ่งได้สรุปขีดจำกัดด้านคุณภาพไฟฟ้าและที่มาไว้ในตารางที่ 1 ในภาคผนวก ก นอกจากนี้มาตรฐาน Engineering recommendation G5/4 ซึ่งได้มีการปรับปรุงจากฉบับ G5/3 ในปี ค.ศ. 2001 ซึ่งได้เพิ่มเติมข้อกำหนดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ระดับวางแผน ดังที่ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ข

1.1. การควบคุมระดับแรงดัน และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

1.1.1 ผู้ขอเชื่อมต่อต้องออกแบบระบบควบคุมระดับแรงดัน เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังแสดงในตาราง 1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันที่สถานีย่อยพิจารณาแรงดันที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ใช้ตัวบันทึกแรงดัน (Voltage recorder) หรือ Digital data logger ที่ย่านความถี่สูงกว่า 2 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป

ตาราง 1.1 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระดับแรงดัน	ภาวะปกติ		ภาวะฉุกเฉิน	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
115 กิโลโวลต์	120.7	109.2	126.5	103.5
22 กิโลโวลต์	23.1	20.9	24.2	19.8

1.1.2 ผู้ขอเชื่อมต่อต้องออกแบบระบบควบคุมตัวประกอบกำลัง เพื่อใช้ในการรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) จะต้องสามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0.85 นำหน้าถึง 0.85 ตามหลัง หรือดีกว่า และจะต้องควบคุมได้อย่างน้อย 2 วิธี คือ

1) A fixed displacement factor $\cos \theta$

2) A variable reactive power depending on the voltage Q(U)

ในขณะที่ระบบจ่ายไฟของรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงแรงดันต่ำสุดถาวร 19 กิโลโวลต์ และแรงดันสูงสุดถาวร 27.5 กิโลโวลต์ แบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ [1] (หัวข้อ 6)

- ตัวประกอบกำลังแบบอินดักทีฟ (Inductive power factor) เมื่อแรงดันของระบบจ่ายไฟอยู่ในขอบเขตที่กำหนดในมาตรฐาน EN 50163 กรณีที่กำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้ไม่เกิน 2 เมกะวัตต์ตัวประกอบกำลังแบบอินดักทีฟต้องมากกว่า 0.85 และเมื่อกำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้เกิน 2 เมกะวัตต์ค่าตัวประกอบกำลังแบบอินดักทีฟต้องมากกว่า 0.95 ตลอดเส้นทางการเดินรถ โดยระหว่างการหยุดรถแบบรีเจนเนอเรทีฟค่าของตัวประกอบกำลังแบบอินดักทีฟลดลงได้อย่างอิสระ เพื่อรักษาแรงดันให้อยู่ในช่วงที่กำหนด การคำนวณหาตัวประกอบกำลังแบบอินดักทีฟ แสดงในสมการที่ (1.1) ซึ่งได้จากการทำแบบจำลองหรือการวัด

$$\lambda = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{W_Q}{W_P}\right)^2}} \quad (1.1)$$

โดย W_P และ W_Q คือ กำลังงานแอคทีฟและรีแอคทีฟของรถไฟ ตามลำดับ

- ตัวประกอบกำลังแบบคาปาซิทีฟ (Capacitive power factor) ในขณะกำลังเร่งเครื่อง
 - กรณีที่แรงดันอยู่ในขอบเขตแรงดันต่ำสุดถาวร 19 กิโลโวลต์ และแรงดันสูงสุดถาวร 27.5 กิโลโวลต์ จะไม่จำกัดตัวประกอบกำลังแบบคาปาซิทีฟ และระหว่างการหยุดรถค่ากำลังงานรีเจนเนอเรทีฟต้องไม่เกิน 150 กิโลวัตต์
 - กรณีที่แรงดันอยู่ในขอบเขตแรงดันสูงสุดถาวร 27.5 กิโลโวลต์และแรงดันสูงสุดชั่วคราว 29 กิโลโวลต์ ไม่ควรเกิดตัวประกอบกำลังแบบคาปาซิทีฟ

1.2. การควบคุมความถี่ไฟฟ้า

1.2.1 ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องเป็นผู้ควบคุมความถี่ของระบบจ่ายไฟของรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์ 50 ± 0.2 รอบต่อวินาที ในกรณีเกิดเหตุผิดปกติ ถ้าความถี่ของระบบไม่อยู่ในช่วง 47.00-52.00 รอบต่อวินาที ต่อเนื่องเกิน 0.1 วินาที ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องออกแบบให้ปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อด้วยระบบอัตโนมัติที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าทันที

1.2.2 หลังการเชื่อมต่อผู้ขอเชื่อมต่อควรแสดงการประเมินความถี่ของระบบจ่ายไฟของรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า โดยทำการวัดต่อเนื่องในระบบที่มีการควบคุมความถี่ โดยใช้ Digital data logger ที่ย่านความถี่สูงกว่า 2 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป สำหรับระบบจ่ายไฟแบบ AC แรงดัน 25 กิโลโวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ความถี่ต้องอยู่ในช่วง 49.5 ถึง 50.5 เฮิร์ตซ์ (ร้อยละ 1) เป็นเวลาอย่างน้อยร้อยละ 99.5 ต่อปี [2]

1.3. การควบคุมแรงดันกระเพื่อม

1.3.1 ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องออกแบบ ติดตั้ง และควบคุมอุปกรณ์ของระบบรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ไม่ทำให้เกิดแรงดันกระเพื่อม (Voltage fluctuation) ที่จุดต่อเชื่อมเกินกว่าค่าที่กำหนด ดังแสดงในตาราง 1.2

ตาราง 1.2 ค่าความรุนแรงของไฟกระพริบระยะสั้นและยาว เมื่อรวมแหล่งกำเนิดแรงดันกระเพื่อม

ทั้งหมดที่มีผลต่อระบบไฟฟ้าที่จุดต่อเชื่อมใดๆ

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อรวม	ค่าความรุนแรงไฟกระพริบระยะสั้น (Pst)	ค่าความรุนแรงไฟกระพริบระยะยาว (Plt)
115 กิโลโวลต์	1.0	0.8
> 115 กิโลโวลต์	0.8	0.6

- Pst (Short-term severity values) = ค่าที่ใช้ประเมินความรุนแรงของไฟกระพริบในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (10 นาที) โดยใช้ flicker meter ตรวจวัดค่าความรุนแรงของไฟกระพริบระยะสั้น

- Plt (Long-term severity values) = นำค่า Pst ที่ได้มาหาค่าความรุนแรงของไฟกระพริบระยะยาว ตามสมการดังนี้

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_{stj})^3}$$

โดย n คือจำนวนค่า Pst ที่ตรวจวัดซึ่งช่วงเวลาปกติที่ใช้ประมาณ 2 ชั่วโมง ดังนั้นค่า n จึงเท่ากับ 12

1.4. การควบคุมฮาร์มอนิกส์

ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องออกแบบ ติดตั้ง และควบคุมอุปกรณ์ของระบบรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ไม่ทำให้เกิดรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมผิดเพี้ยนเกินค่าที่กำหนด ดังแสดงในตาราง 1.3 และ ตาราง 1.4

ตาราง 1.3 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆ ที่จุดต่อร่วม

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ จุดต่อร่วม	อันดับฮาร์มอนิกส์และขีดจำกัดกระแสไฟฟ้า (Arms)																	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
400 โวลต์	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
11 และ 12 กิโล โวลต์	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
22, 24 และ 33 กิโล โวลต์	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
69 กิโลโวลต์	8.8	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1
115 กิโลโวลต์และ มากกว่า	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

ตาราง 1.4 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไฟฟ้าสำหรับผู้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ารายใดๆ

ที่จุดต่อร่วม รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (%)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันแต่ละอันดับ (%)	
		อันดับที่	อันดับคู่
400 โวลต์	5	4	2
11, 12, 22 และ 24 กิโลโวลต์	4	3	1.75
33 กิโลโวลต์	3	2	1
69 กิโลโวลต์	2.45	1.63	0.82
115 กิโลโวลต์และมากกว่า	1.5	1	0.5

1.5. การควบคุมแรงดันไม่ได้ดุล

ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด และควบคุมระดับแรงดันไม่ได้ดุลให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

ตาราง 1.5 ระดับวางแผนของแรงดันไม่ได้ดุลสำหรับระบบไฟฟ้าในประเทศไทย

ระบบแรงดันไฟฟ้า	ตัวประกอบแรงดันไม่ได้ดุล (%)
230 กิโลโวลต์	0.8
69 และ 115 กิโลโวลต์	1.4
12, 22, 24 และ 33 กิโลโวลต์	1.8
230/400 โวลต์	2.0

1.6. การควบคุมการใช้กระแสไฟจากโครงข่ายไฟฟ้า

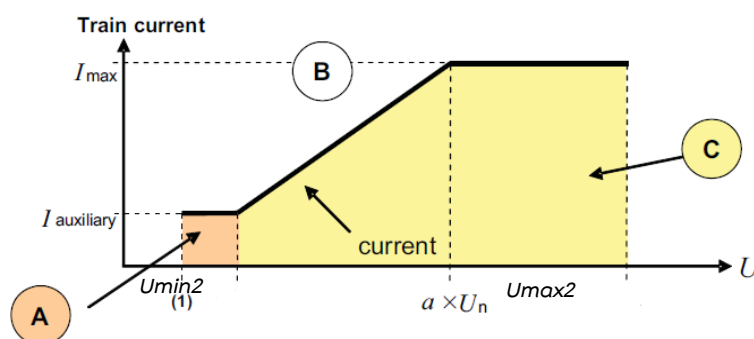
1.6.1 ผู้ขอเชื่อมต่อควรแสดงกระแสโหลด (Load diagram) ที่รถไฟความเร็วสูงต้องการกระแสสูงสุดของรถไฟ จะขึ้นกับรูปแบบของระบบจ่ายไฟและความเร็วของรถไฟ โดยที่ระบบจ่ายไฟแบบ AC แรงดัน 25 กิโลโวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ กระแสของรถไฟต้องไม่เกินพิกัดกระแสสูงสุดที่ความเร็วต่างๆ ดังแสดงในตาราง 1.6 [1] (หัวข้อ 3 และ 7.1)

ตาราง 1.6 พิกัดกระแสสูงสุดของรถไฟที่ความเร็วต่างๆ

ความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)	มากกว่า 250	200	รูปแบบพิเศษ
กระแสสูงสุด (แอมแปร์)	1500	600	500

หมายเหตุ รูปแบบพิเศษ หมายถึง รูปแบบของระบบจ่ายไฟเป็นแบบพิเศษ เช่น มีการวางรูปแบบพิเศษตามผังเมือง ซึ่งมีผลกับความเร็วรถสูงสุด

1.6.2 รถไฟควรมีระบบปรับการใช้กำลังไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ (Automatic regulation) เพื่อให้รถไฟสามารถวิ่งได้ต่อเนื่องแม้ว่าจะมีความผิดพลาดที่ระบบจ่ายไฟ รถไฟควรมีตัวปรับการใช้กำลังไฟฟ้าแบบอัตโนมัติให้เข้ากับแรงดันของระบบจ่ายไฟ ตามคุณลักษณะที่แสดงในรูป 1.1 [1] (หัวข้อ 7.2)



รูป 1.1 คุณลักษณะของการใช้กำลังไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ

โดย U คือ แรงดันของระบบจ่ายไฟ I_{max} คือ กระแสสูงสุดของรถไฟที่แรงดันปกติ โดย a มีค่าเท่ากับ 0.9 สำหรับระบบจ่ายไฟแบบ AC แรงดัน 25 กิโลโวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ พื้นที่ A คือกรณีที่รถไฟจอดนิ่ง พื้นที่ B คือระดับกระแสเกิน พื้นที่ C คือระดับกระแสอยู่ในช่วงยอมรับได้

1.7. หม้อแปลงที่สถานีย่อย

1.7.1 ผู้ขอเชื่อมต่อควรแสดงการทดสอบด้วยกระแสลัดวงจรของหม้อแปลง ณ สถานที่ติดตั้งจริงหรือจากห้องปฏิบัติการ โดยทดสอบกระแสลัดวงจรที่ฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลง และบันทึกแรงดันและกระแสก่อน-หลังการทดสอบ รวมทั้งความต้านทานก่อนและหลังโดยความต้านทานหลังการทดสอบไม่ควรเปลี่ยนแปลงเกินร้อยละ 3 [3] (หัวข้อ 2.4.2)

1.7.2 ผู้ขอเชื่อมต่อควรแสดงสเปคของหม้อแปลงที่สถานีย่อยที่จะติดตั้ง เช่น พิกัดกระแส (Rated current) ดังแสดงในสมการที่ (1.2) ซึ่งต้องไม่น้อยกว่าค่า r.m.s. ของกระแสโหลดที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ กระแสโหลดเกินพิกัด (Overload current) และกระแสโหลดต่ำกว่าพิกัด (Underload current) เป็นจำนวนเท่าของกระแสพิกัด (per unit) เพื่อแสดงถึงรูปแบบของกระแสโหลดที่หม้อแปลงต้องรับได้ [3] (หัวข้อ 2)

$$I_N = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} I^2(t) dt} \quad (1.2)$$

โดย คือ กระแสของหม้อแปลง

คือ ช่วงรอบเวลาของกระแสโหลด (Load cycle)

คือ เวลาเริ่มต้น

1.7.3 ผู้ขอเชื่อมต่อต้องแสดงผลการทดสอบการเพิ่มอุณหภูมิของหม้อแปลง โดยพิจารณาที่ช่วงเวลาที่กระแสเกินพิกัด สำหรับช่วงเวลาสั้นจะไม่เกิน 480 วินาที และช่วงเวลายาวตั้งแต่ 480 วินาทีจนถึง 7200 วินาทีซึ่งถูกแสดงในภาคผนวก A ของ [3] โดยวิธีการทดสอบและผลการทดสอบต้องเป็นไปตามมาตรฐาน EN 60076-2 และ EN 60076-11 โดยรวมผลจากกระแสฮาร์มอนิกส์ด้วย เช่น ที่กระแสพิกัดอุณหภูมิของส่วนบนของแท่งก้น้ำมันต้องไม่เกิน 60 เคลวิน

2. การเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1 ระบบรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าประกอบด้วยหลายระบบทำงานร่วมกัน เช่น ระบบจ่ายไฟ ระบบอาณัติสัญญาณ ระบบสื่อสาร ระบบป้องกัน ระบบควบคุม และระบบอื่นๆ ผู้ขอเชื่อมต่อควรต้องระบุถึงขอบเขต

ของระบบรถไฟ แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบ การ coupling ระหว่างอุปกรณ์ [4] โดยแบ่งรูปแบบการแผ่และภูมิคุ้มกัน (Emission and immunity) ของแม่เหล็กไฟฟ้า แบ่งได้เป็น

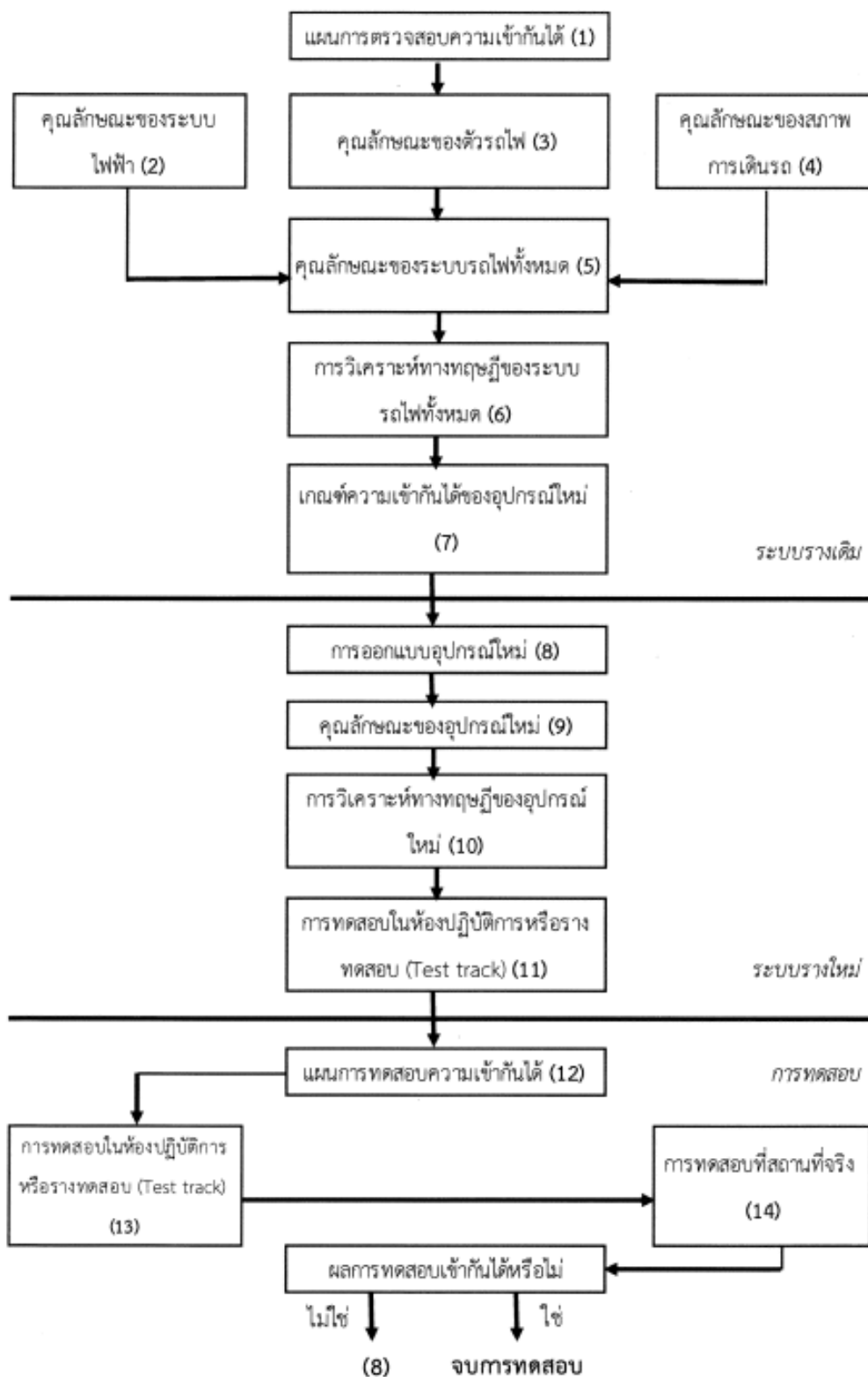
2.1.1 การรบกวนแบบนำไฟฟ้า (Conducted disturbance) กรณีการรบกวนความถี่ต่ำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ระบบไฟฟ้า เช่น แรงดันตก แรงดันกระเพื่อม ฮาร์โมนิกส์ ความถี่เปลี่ยนแปลง กรณีการรบกวนความถี่สูงจะทำให้เกิดการอสซิลเลชันแบบฉับพลัน (Oscillatory transient) กระแสเหนี่ยวนำและไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge)

2.1.2 การรบกวนแบบกระจาย (Radiated disturbance) จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า และคลื่นความถี่วิทยุ

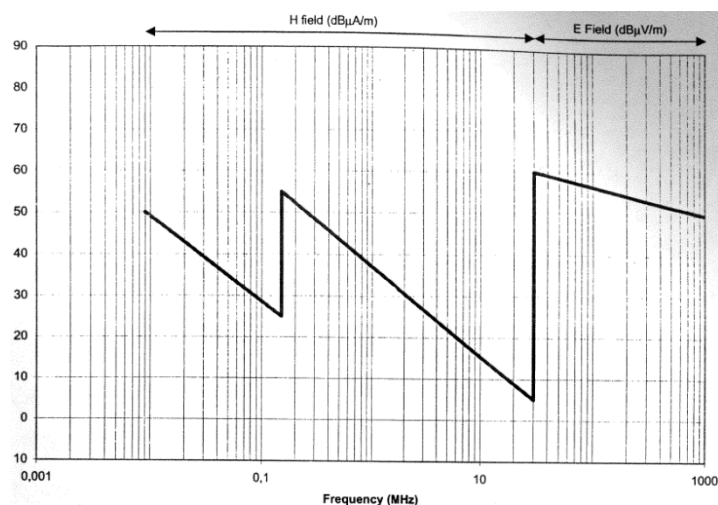
2.2 ผู้ขอเชื่อมต่อต้องทำการทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงข่ายไฟฟ้าและระบบรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ทั้งโครงสร้างที่มีอยู่เดิมและอุปกรณ์ที่เพิ่มใหม่ ตามขั้นตอนที่ระบุใน [1] ดังแสดงในรูป 1.2 โดยคุณลักษณะของโครงข่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า จะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ 20-60 เมกกะวัตต์ และมีความต้านทานโดยทั่วไป 2.5 โอห์ม และอยู่ในช่วง 2-3.5 โอห์ม (ตารางที่ D.1 [1])

2.3. ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องทำการวัดความถี่วิทยุที่แผ่จากสถานีย่อยของระบบรางออกไปข้างนอก ซึ่งจะต้องไม่เกินขีดจำกัด ดังแสดงในรูป 1.3 ซึ่งแสดงขีดจำกัดความถี่ระหว่าง 9 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 1 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยวิธีการวัดถูกระบุไว้ในภาคผนวก A ของเอกสารอ้างอิง [5] โดยจะวัดที่ระยะ 10 เมตรจากรั้วของสถานีย่อย หรือจากอุปกรณ์ที่อยู่รอบนอก และการแผ่ต้องไม่รวมการแผ่ของรถไฟ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.3.1 การเลือกความถี่ที่จะวัด ควรจะทดสอบอย่างน้อย 3 ความถี่ต่อ 1 ช่วงความถี่ 10 เท่า กรณีวัดความถี่เมื่อรถไฟวิ่งผ่าน ควรจะวัดแบบการกวาด (Sweep) ความถี่ โดยวัดสัญญาณรบกวนสูงสุดที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์ที่วัดจะต้องมีการอัตราการเปลี่ยนความถี่ที่เร็วเพียงพอ กรณีที่วัดได้สัญญาณรบกวนชั่วคราว (Transient) ระหว่างการวัด จะไม่นำมาพิจารณาด้วยจะวัดเฉพาะสัญญาณสูงสุดที่ได้



รูป 1.2 แผนการทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า



รูป 1.3 ขีดจำกัดการแผ่ของสถานีย่อย

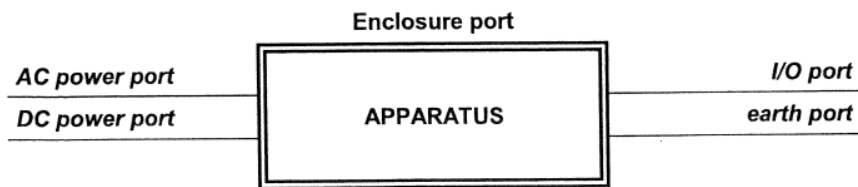
2.3.2 เพื่อลดผลกระทบการวัดจากสภาพอากาศ ควรวัดในวันที่มีอากาศแห้ง ซึ่งมีอุณหภูมิมากกว่า 5 องศาเซลเซียส และความเร็วลมน้อยกว่า 10 เมตรต่อวินาที ความชื้นควรจะต่ำจนไม่มีผลต่อความควบแน่น (Condensation) ต่อตัวนำของระบบจ่ายไฟ และควรบันทึกสภาพอากาศในขณะที่มีการวัดแนบไปกับผลการวัดด้วย

2.3.3 การวัดความถี่วิทยุควรวัดที่ 2 โหมด ได้แก่ โหมดแรกวัดที่ความเร็วมากกว่าร้อยละ 90 ของความเร็วสูงสุดของรถ โดยวัดที่กัลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วนั้นๆ และโหมดที่ 2 วัดที่กัลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วต่างๆ และควรวัดขณะหยุดรถที่กัลังไฟฟ้าอย่างน้อยร้อยละ 80 ของกัลังหยุดรถสูงสุด

2.3.4 รายงานการวัด ควรจะระบุลักษณะของสถานที่ทดสอบ ระบบวัด ชนิดของรถไฟ ผลการวัดเป็นตัวเลข สภาพอากาศ ชื่อบุคลากรที่ทำการวัดภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3.5 การทดสอบการแผ่และภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Emission and Immunity) ของอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่

- ระบบอาณัติสัญญาณและการสื่อสาร เช่น อุปกรณ์ของระบบควบคุมและระบบบังคับสัมพันธ์ (Interlocking) อุปกรณ์ที่ต่อเชื่อมกับตัวนำของระบบรถไฟ อุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในระยะ 3 เมตรหรืออุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในระยะ 10 เมตรและมีจุดเชื่อมต่อภายในระยะ 3 เมตร [6] รูป 1.4 แสดงตัวอย่างช่องทางเชื่อมต่อรูปแบบต่างๆของอุปกรณ์



รูป 1.4 ตัวอย่างช่องทางเชื่อมต่อของอุปกรณ์

- ช่องทางเชื่อมต่อต่างๆของอุปกรณ์ของระบบจ่ายไฟ เช่น อุปกรณ์ของระบบป้องกัน สวิตช์ หม้อแปลงทั้งแบบ Auto อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เป็นต้น แต่ไม่รวมอุปกรณ์กรองความถี่ ซึ่งตารางที่ 1-6 ในเอกสารอ้างอิงที่ [7] ระบุหัวข้อการทดสอบ เช่น การวัดภูมิคุ้มกันที่ความถี่วิทยุและความถี่ของระบบจ่ายไฟ (50 เฮิร์ตซ์) การออสซิลเลชัน แรงดันฉับพลันชั่วขณะ (Transients) เป็นต้น และวิธีการทดสอบโดยช่องทางเชื่อมต่อต่างๆของอุปกรณ์ ได้แก่
 - ช่องทางเชื่อมต่อของอุปกรณ์
 - ช่องทางเชื่อมต่อของสายสัญญาณและบัสข้อมูล
 - ช่องทางเชื่อมต่อของระบบควบคุม
 - ช่องทางขาเข้าและขาออกของระบบไฟตรง
 - ช่องทางขาเข้าและขาออกของระบบไฟสลับ
 - ช่องทางเชื่อมต่อของระบบต่อลงดิน

และภาคผนวก A ได้ระบุพิกัดการแผ่สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของสถานีย่อย ในช่วงการทำงานปกติ และช่วงที่เบรกเกอร์ทำงาน ระหว่างช่วงความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยการวัดควรทำเป็นลำดับที่ละการทดสอบ

2.4 การทดสอบอุปกรณ์ในตัวรถไฟ เมื่อไม่สามารถทดสอบได้ทุกฟังก์ชันการใช้งาน ควรเลือกทดสอบฟังก์ชันที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าหรือเกิดการรบกวนมากที่สุด ในช่วงความถี่ที่เหมาะสม ([8] หัวข้อ 5) โดยเงื่อนไขการทดสอบมีรายละเอียดใน EN 61000-4 series กรณีที่อุปกรณ์เป็นส่วนหนึ่งของระบบหรือต่อเชื่อมกับอุปกรณ์อื่นๆ ระหว่างการทดสอบอุปกรณ์นั้นควรต่อกับอุปกรณ์อื่นให้น้อยที่สุด ตามรายละเอียดใน EN

55022:2010 หัวข้อที่ 8 โหมดการทำงานของอุปกรณ์ควรถูกระบุในผลการทดสอบ เมื่ออุปกรณ์มีช่องทางเชื่อมต่อหลายช่อง ควรทดสอบอย่างน้อยร้อยละ 20 ของช่องทางเชื่อมต่อทั้งหมด หรืออย่างน้อย 4 ช่องทางเชื่อมต่อ

3. ระบบป้องกัน

3.1 ระบบป้องกันการลัดวงจร โดยทั่วไปสถานีย่อยของระบบรางไม่มีการเชื่อมต่อแบบขนาน สำหรับระบบจ่ายไฟ 25 กิโลโวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ กระแสความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นได้มีค่าประมาณ 15 กิโลแอมแปร์ เมื่อมีกระแสความผิดพลาดเกิดขึ้นที่ระบบจ่ายไฟ ระบบป้องกันที่ระบบจ่ายไฟและสถานีย่อยต้องทำงานทันที (หัวข้อที่ 11 ในเอกสารอ้างอิงที่ [1])

3.2 เมื่อไม่มีการจ่ายกำลังไฟจากระบบไฟฟ้า เบรกเกอร์ของระบบจ่ายไฟต้องทำงานภายใน 3 วินาที และควรหน่วงเวลาอย่างน้อย 3 วินาทีก่อนการปิดซ้ำ หลังจากการจ่ายไฟใหม่ (Re-energized) (หัวข้อที่ 11 ในเอกสารอ้างอิงที่ [1]) โดยเบรกเกอร์ที่สถานีย่อยไม่ควรมีการปิดซ้ำเพื่อจ่ายไฟใหม่ก่อนการทริบของเบรกเกอร์ของระบบจ่ายไฟของรถไฟ

3.3 การทริบที่เกิดจากแรงดันต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ (Undervoltage tripping) ควรตั้งค่าของรีเลย์ที่ 85%-95% ของแรงดัน 17.5 กิโลโวลต์ซึ่งเป็นแรงดันต่ำสุดชั่วคราวที่ยอมรับได้สำหรับระบบจ่ายไฟแบบ AC แรงดัน 25 กิโลโวลต์ (EN 50163:2004, หัวข้อ 4.1, หมายเหตุ 2)

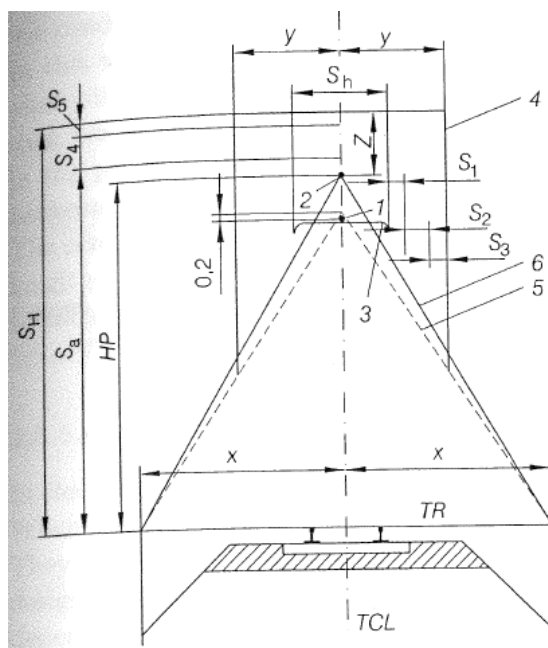
4. การหยุดรถแบบรีเจนเนอเรทีฟ

กรณีที่รถไฟใช้ระบบหยุดรถแบบรีเจนเนอเรทีฟ ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องแสดงวิธีการของระบบจ่ายไฟ เพื่อรับกำลังงานรีเจนเนอเรทีฟจากรถไฟ และรถไฟต้องไม่หยุดรถแบบรีเจนเนอเรทีฟ เมื่อไม่มีกำลังไฟจากระบบจ่ายไฟ หรือเกิดการลัดวงจรระหว่างสายสัมผัสหรือรางกับกราวด์ หรือเมื่อแรงดันของระบบจ่ายไฟสูงกว่าแรงดันสูงสุด [1] และกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์อื่นที่รับกำลังงานรีเจนเนอเรทีฟไปใช้ รถไฟจะต้องเปลี่ยนไปใช้ระบบหยุดรถแบบอื่นแทน (หัวข้อที่ 12)

5. ความปลอดภัย

5.1 ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ภายในพื้นที่ของระบบจ่ายไฟแบบสายเหนือหัวทั้งหมด ทั้งกรณีการเดินรถปกติและกรณีที่สายจ่ายไฟหรืออุปกรณ์รับไฟชำรุดเสียหาย ไม่ให้เกินพิกัดในแนวนอน

และแนวตั้งของอุปกรณ์ต่างๆของระบบจ่ายไฟ เช่น การเคลื่อนที่ด้านข้างของ pantograph หรือความสูงของ pantograph ดังแสดงในรูป 1.5 [9] และมีรายละเอียด ดังนี้



รูป 1.5 พื้นที่ของระบบจ่ายไฟ

โดย TR ด้านบนของราง

HP จุดสูงสุดของสายจ่ายไฟเหนือหัว

TCL จุดกึ่งกลางราง

1 Contact wire, 2 Catenary wire, 3 Pantograph

X ความกว้างของพื้นที่ของสายจ่ายไฟเหนือหัวที่ความสูงของราง

Y ความกว้างของพื้นที่ของ pantograph

Z ระยะห่างระหว่าง HP และ S_H

S_1 การเคลื่อนที่ด้านข้างของ pantograph

S_2 , S_4 ระยะห่าง (Clearance) สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า ตามมาตรฐาน EN 50119 = 270 มิลลิเมตร

S_3 , S_5 ระยะห่างกรณี pantograph ชำรุด (ขึ้นกับการออกแบบ)

S_a ความสูงของ pantograph เมื่อยืดสูงสุด

S_H ชีตจำกัดความสูงของ pantograph

S_h ความกว้างของ pantograph

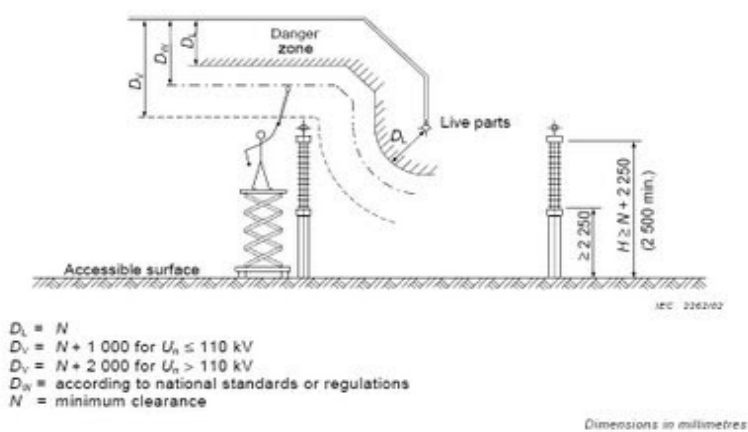
โดยทั่วไป X และ Y ควรมีความกว้างประมาณ 4 และ 2 เมตรตามลำดับ Z ควรมีความสูง 2 เมตร โดยการเคลื่อนที่แนวนอนของ pantograph ที่เกิดจากเส้นทางที่มีความโค้งจะถูกรวมอยู่ในระยะ X ด้วย ความกว้าง Y ควรมีค่าเท่ากับ $S_H/2 + S_1 + S_2 + S_3$ ความสูง Z มีค่าเท่ากับ $S_a + S_4 + S_5 - HP$ ดังแสดงในตัวอย่างการออกแบบของรถไฟของยุโรป ดังนี้

- การออกแบบของความกว้างของ pantograph ของประเทศยุโรป $S_h = 1600$ มิลลิเมตร
- การเคลื่อนที่ด้านข้างของ pantograph $S_1 = 345$ มิลลิเมตร
- ระยะห่าง (Clearance) สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า ตามมาตรฐาน EN 50119 $S_2 = 270$ มิลลิเมตร
- ระยะปลอดภัยกรณีที่สายไฟหรือ pantograph มีความเสียหาย $S_3 = 530$ มิลลิเมตร
- ความกว้าง Y เท่ากับ 1945 มิลลิเมตร

5.2 กรณีที่มีสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงอยู่ในบริเวณใกล้เคียงระยะห่างระหว่างสายส่งและระบบจ่ายไฟของระบบราง จะต้องมีการเว้นระยะห่างเพิ่มขึ้นตามมาตรฐานของระบบจ่ายไฟ ดังเช่น มาตรฐาน IEC 61936-1 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กับระบบรางและระบบไฟฟ้าที่แรงดันมากกว่า 1 กิโลโวลต์ แบ่งระยะห่างตามระดับแรงดันดังแสดงในตาราง 1.7 โดยระยะห่างจะขึ้นกับพิกัดความทนทานต่อแรงดันฟ้าผ่า (N) รวมกับระยะห่างขั้นต่ำดังแสดงในรูป 1.6 ระยะ D_L หรือ N ซึ่งเป็นระยะห่างขั้นต่ำหรือเป็นพื้นที่อันตราย ระยะ D_W เป็นระยะปลอดภัยของการทำงาน (Working safety clearance) ซึ่งแตกต่างกันตามมาตรฐานของแต่ละประเทศ เช่น มาตรฐาน BS 7354 ของประเทศอังกฤษที่แรงดัน 132 กิโลโวลต์ ระยะ D_W เท่ากับ 2.3 เมตร สำหรับระยะ D_V เป็นระยะห่างที่เพิ่มขึ้นเพื่อความปลอดภัย ที่แรงดันไม่เกิน 110 กิโลโวลต์ $D_V = D_L$ หรือ $N + 1$ เมตร และที่แรงดันมากกว่า 110 กิโลโวลต์ $D_V = D_L$ หรือ $N + 2$ เมตร

ตาราง 1.7 ระยะห่างของอุปกรณ์ไฟฟ้าตามระดับแรงดัน

แรงดันสูงสุดของอุปกรณ์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	พิกัดความหนาทันต่อแรงดัน ฟ้าผ่า (กิโลโวลต์)	ระยะห่างน้อยสุดของพิกัดความหนาทัน ต่อแรงดันฟ้าผ่า, N (มิลลิเมตร)
24	95	160
	125	220
	145	270
36	145	270
	170	320
52	250	480
72.5	325	630
123	450	900
	550	1100



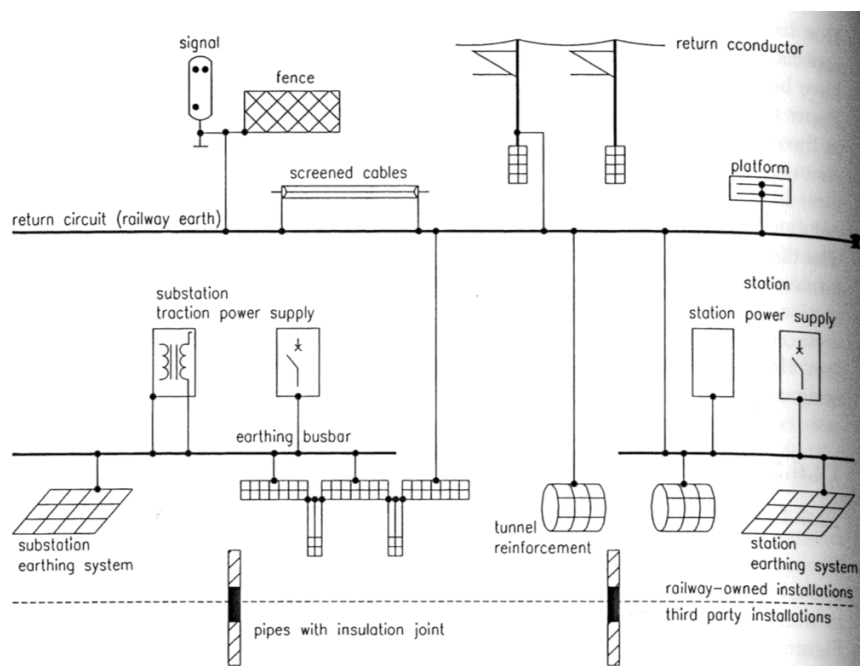
รูป 1.6 ความสูงขั้นต่ำและระยะห่างสำหรับการบำรุงรักษา

6. การต่อลงดิน

ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องแสดงถึงรูปแบบ และรายละเอียดการเชื่อมต่อในหัวข้อต่างๆ ดังนี้ [10]

6.1 วงจรกระแสไหลกลับ (return circuit) ของระบบจ่ายไฟ กรณีที่มีการเชื่อมต่อตัวนำกระแสไหลกลับ (Return conductor) สำหรับรถไฟแบบ AC ใช้หม้อแปลงแบบ Auto วงจรกระแสไหลกลับประกอบด้วย สายป้อนลบ (Negative feeder) สายป้องกัน (Protective wire) หรือสายดิน (Earth wire) ซึ่งอยู่บริเวณเสาจ่ายไฟ และราง โดยวงจรกระแสไหลกลับจะต้องเชื่อมต่อกับระบบลงดินของอุปกรณ์อื่นๆ ดังแสดงในรูป 1.7

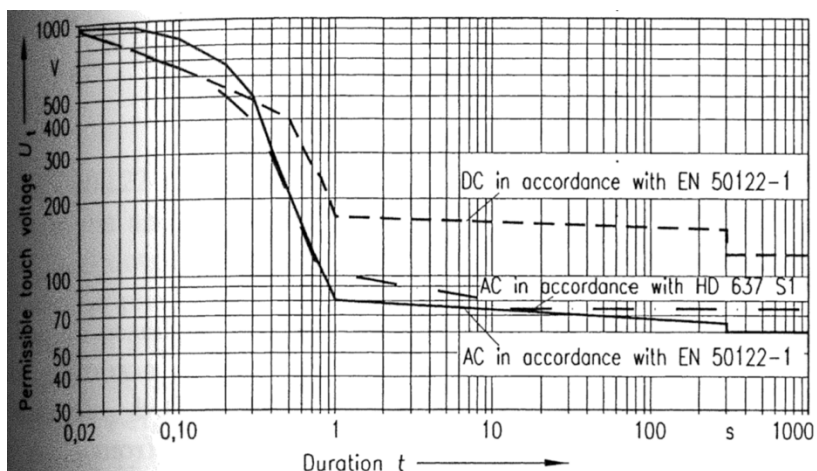
หมายเหตุ เอกสารอ้างอิงของประเทศจีนและญี่ปุ่นจะเรียกว่า สายป้องกัน ในขณะที่เอกสารอ้างอิงของประเทศยุโรปจะเรียกว่าสายดิน



รูป 1.7 วงจรกระแสไหลกลับและการต่อลงดินของระบบจ่ายไฟ

6.2 แรงดันสัมผัสที่สถานีย่อย ในขณะที่เดินรถปกติและขณะที่เกิดความผิดพลาด ที่ได้จากการทำแบบจำลองหรือการคำนวณโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัด เช่น ความต้านทานของดิน ค่าที่ได้จะต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนดโดย [11] ได้กำหนดแรงดันสัมผัสที่ยอมรับได้ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบ AC กระแสไฟ 3 เฟสที่สถานีย่อย ดังแสดงในรูป 1.8

หมายเหตุ แรงดันช่วงก้าว (Step voltage) ไม่ได้ถูกกำหนดเกณฑ์ขั้นต่ำไว้ในมาตรฐานการต่อลงดินของระบบรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ซึ่งใช้มาตรฐาน EN 50122-1 สำหรับประเทศยุโรปและมาตรฐาน IEC 62128-1 สำหรับประเทศญี่ปุ่น ทั้งสองมาตรฐานมีเนื้อหาคล้ายคลึงกัน ซึ่งระบุเกณฑ์กระแสและแรงดันของร่างกายมนุษย์ และแรงดันสัมผัสที่ยอมรับได้ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยมาตรฐาน IEC พัฒนามาจากมาตรฐาน EN



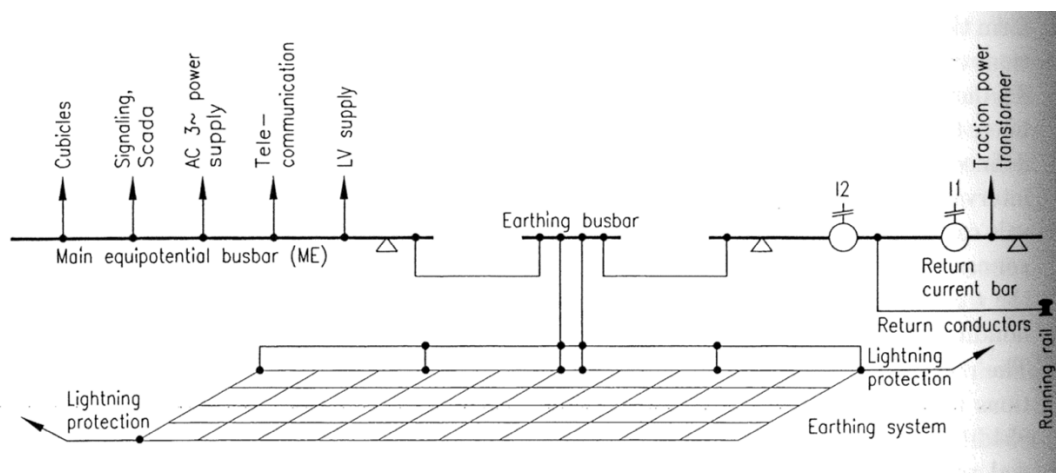
รูป 1.8 แรงดันสัมผัสที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานต่างๆ

6.3 ระบบต่อลงดินซึ่งรวมถึงวงจรกระแสไหลกลับที่สถานีย่อย ดังแสดงในรูป 1.9 โดยต้องมีตัวนำกระแสไหลกลับอย่างน้อย 2 ตัวนำระหว่างรางและสถานีย่อย และต้องออกแบบให้กรณีที่เกิดการเสียหายของตัวนำกระแสไหลกลับ 1 ตัว ตัวนำที่เหลือสามารถนำกระแสได้ทั้งหมด และต้องมีการติดตั้งหม้อแปลงกระแสเพื่อวัดกระแสไหลกลับ จากรูป หม้อแปลงกระแส I1 วัดกระแสไหลกลับทั้งหมดผ่านหม้อแปลงที่สถานีย่อย และหม้อแปลงกระแส I2 วัดกระแสไหลกลับบางส่วนที่ไหลลงระบบต่อลงดินที่สถานีย่อย

6.4 กรณีที่รับกำลังไฟจากโครงข่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำด้วย ตัวนำนิวทรัล (Neutral conductor) ของโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งต่อเชื่อมกับจุดนิวทรัล จะไม่ถูกต่อร่วมกับระบบต่อลงดินของระบบรถไฟแบบ AC เพื่อป้องกันความเสียหายจากกระแสไหลกลับซึ่งบางส่วนจะไหลผ่านระบบต่อลงดิน

6.5 กรณีที่มีการต่อบัสบาร์ศักย์ไฟฟ้าเสมอ (Main equipotential busbar, ME) ดังแสดงในรูป 1.9 กระแสไหลกลับจะต้องไม่ไหลผ่านบัสบาร์ศักย์ไฟฟ้าเสมอ เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนระบบ SCADA ระบบสื่อสาร และระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยบัสบาร์ศักย์ไฟฟ้าเสมอจะเชื่อมต่อกับบัสบาร์ของระบบต่อลงดิน (Earthing busbar)

เพียงด้านเดียว ในขณะที่กราวด์กริดจะเชื่อมต่อกับบัสบาร์ของระบบต่อลงดินด้วยตัวนำ 2 ตัว ซึ่งแต่ละตัวนำถูกออกแบบให้สามารถนำกระแสสูงสุดในขณะเดินรถปกติและเกิดความผิดพลาด กรณีที่ตัวนำใดเกิดความเสียหาย



รูป 1.9 การต่อลงดินที่สถานีย่อย

7. ระบบป้องกันฟ้าผ่า

7.1 ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องแสดงการป้องกันฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 62305 โดยส่วนที่ 3 (IEC 62305-3) ของมาตรฐานเป็นการป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับสิ่งมีชีวิต และส่วนที่ 4 (IEC 62305-4) เป็นการป้องกันอันตรายที่เกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าทั้งหมดต้องเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดิน และต้องออกแบบให้มีความยาวของตัวนำที่เชื่อมต่อสั้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อให้ความต้านทานของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าน้อยที่สุด

7.2 ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่สถานีย่อย เพิ่มเติมจากระบบป้องกันฟ้าผ่าที่มีอยู่ เพื่อป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อที่สถานีย่อยซึ่งเกิดความเสียหายได้ง่าย

7.3 ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องแสดงความต้านทานของดินชั่วขณะ (Impulse earthing resistance) ของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันเกินซึ่งจะต้องเป็นไปตามสมการที่ (7.1) จากมาตรฐาน EN 62305-2 พบว่าประมาณร้อยละ 95 ของกระแสฟ้าผ่าจะไม่เกิน 40 กิโลแอมแปร์ และประมาณร้อยละ 99 ของกระแสฟ้าผ่าจะไม่เกิน 60 กิโลแอมแปร์ โดยตาราง 1.8 แสดงค่าความต้านทานของดินชั่วขณะสำหรับระบบรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าแบบ AC แรงดัน 25 กิโลโวลต์

$$R_{dis} \leq U_{in}/I_P \quad (7.1)$$

โดย R_{dis} คือ ความต้านทานของดินชั่วคราว

U_{in} คือ แรงดันที่ฉนวนสามารถทนได้

I_P คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เสาหรือโครงเหล็ก

ตาราง 1.8 พิกัดความต้านทานของดินชั่วคราวของระบบจ่ายไฟแบบ AC

ประเภทของอุปกรณ์แรงดันเกิน	III	IV
แรงดันฉับพลันที่ทนได้ (Surge voltage), (โวลต์)	145	170
ความต้านทานของดินชั่วคราว (โอห์ม)	3.6	4.3

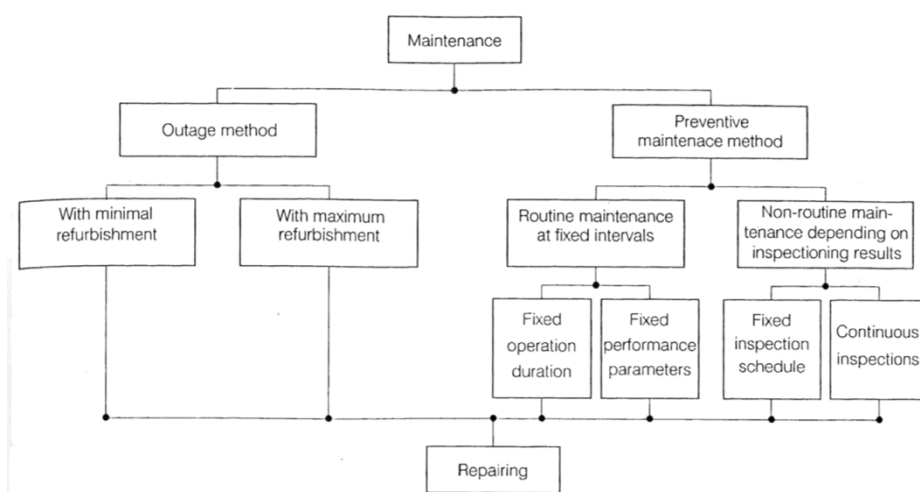
โดย - อุปกรณ์แรงดันเกินประเภท III เป็นอุปกรณ์ที่ติดอยู่กับโครงสร้างแบบถาวร เช่น สวิตช์หรือเบรกเกอร์

- อุปกรณ์แรงดันเกินประเภท IV เป็นอุปกรณ์ใช้งานที่จุดติดตั้งแรงดันต่ำ เช่น มิเตอร์

8. การบำรุงรักษา

8.1 ผู้ขอเชื่อมต่อจะต้องแสดงแผนงานการบำรุงรักษาระบบจ่ายไฟที่สถานีย่อยของระบบรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟทั้งหมด ซึ่งรวมถึงแผนการป้องกันปัญหา (Preventive method) และแผนการซ่อมแซมอุปกรณ์กรณีที่เกิดความเสียหายแล้ว (Corrective method) ดังแสดงตัวอย่างในรูป 1.10 โดยไม่ควรมีการเกิดกรณีที่ระบบจ่ายไฟดับ (Outage)

8.2 กรณีที่ต้องมีการซ่อมแซม หรือเปลี่ยนอุปกรณ์ที่สถานีย่อยซึ่งอาจทำให้เกิดผลกระทบกับโครงข่ายไฟฟ้า ผู้ขอเชื่อมต่อต้องแจ้งให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทราบล่วงหน้า รวมทั้งแสดงรายละเอียดขั้นตอนการทำงาน



รูป 1.10 ตัวอย่างแผนการบำรุงรักษา

ภาคผนวก ก

ตารางที่ 1 สรุปมาตรฐานการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าภายในประเทศและต่างประเทศ

ตัวแปร	ประเทศไทย	ประเทศจีน	ประเทศญี่ปุ่น	กลุ่มประเทศยุโรป
ระดับแรงดัน ของระบบแรง	กรณีที่ 1 ระดับแรงดัน 115 kV * - แรงดันปกติ 115 kV - แรงดันสูงสุด 120.7 kV - แรงดันต่ำสุด 109.2 kV กรณีที่ 2 ระดับแรงดัน 22 kV * - แรงดันปกติ 22 kV - แรงดันสูงสุด 23.1 kV - แรงดันต่ำสุด 20.9 kV * อ้างอิงตามมาตรฐานของ กฟภ.	- แรงดันปกติ 25 kV - แรงดันสูงสุด 27.5 kV - แรงดันต่ำสุด 19.0 kV	ค่าจำกัด Voltage drop - 22 kV => 2 kV - 33 kV => 3 kV - 77 kV => 7 kV - 154 kV => 14 kV	กรณีที่ 1 ระดับแรงดัน 15 kV - แรงดันปกติ 15 kV - แรงดันสูงสุด 17.25 kV - แรงดันต่ำสุด 12.0 kV กรณีที่ 2 ระดับแรงดัน 25 kV - แรงดันปกติ 25 kV - แรงดันสูงสุด 27.5 kV - แรงดันต่ำสุด 19.0 kV

ตัว แปร	ประเทศไทย	ประเทศจีน	ประเทศญี่ปุ่น	กลุ่มประเทศยุโรป
ระดับแรงดัน ของโครงข่าย แรงดันไฟฟ้า	1. แรงดัน 33 kV - แรงดันสูงสุด 34.7 kV - แรงดันต่ำสุด 31.3 kV 2. แรงดัน 380 V - แรงดันสูงสุด 410 V - แรงดันต่ำสุด 342 V 3. แรงดัน 220 V - แรงดันสูงสุด 120.7 V - แรงดันต่ำสุด 109.2 V	1. ระบบส่งกำลัง (Transmission system) แรงดันต้องไม่เกิน $\pm 10\%$ ประกอบด้วยแรงดัน 35, 66, 110, 330, 500 kV 2. ระบบจำหน่าย (Distribution system) ที่แรงดัน 20 kV ต้องไม่เกิน $\pm 7\%$ และแรงดัน 220 V ต้องไม่เกิน $+7\%$ และไม่ต่ำกว่า - 10%	1. ระดับแรงดันต่ำสุด - แรงดัน 100V ต้องไม่เกิน $\pm 6V$ - แรงดัน 200V ต้องไม่เกิน $\pm 20V$ 2. ค่าแรงดันตก - แรงดัน 6.6 kV ไม่เกิน 0.6 kV - แรงดัน 22 kV ไม่เกิน 2 kV - แรงดัน 33 kV ไม่เกิน 3 kV - แรงดัน 77 kV ไม่เกิน 7 kV - แรงดัน 154 kV ไม่เกิน 14 kV	ประเทศฝรั่งเศส 1. แรงดัน 63 kV - แรงดันสูงสุด 73.5 kV - แรงดันต่ำสุด 50 kV 2. แรงดัน 90 kV - แรงดันสูงสุด 102 kV - แรงดันต่ำสุด 72 kV 3. แรงดัน 225 kV - แรงดันสูงสุด 250 kV - แรงดันต่ำสุด 180 kV

ตัวแปร	ประเทศไทย	ประเทศจีน	ประเทศญี่ปุ่น	กลุ่มประเทศยุโรป
				4. แรงดัน 400 kV - แรงดันสูงสุด 440 kV - แรงดันต่ำสุด 320 kV ประเทศเยอรมนี 1. แรงดัน 230 V - แรงดันสูงสุด 253 V - แรงดันต่ำสุด 207 V 2. แรงดัน 400 V - แรงดันสูงสุด 440 V - แรงดันต่ำสุด 360 V 3. แรงดัน 6 kV - แรงดันสูงสุด 6.6 kV

ตัวแปร	ประเทศไทย	ประเทศจีน	ประเทศญี่ปุ่น	กลุ่มประเทศยุโรป
				- แรงดันต่ำสุด 5.4 kV 4. แรงดัน 60 kV - แรงดันสูงสุด 66 kV 5. แรงดัน 110 kV - แรงดันสูงสุด 123 kV 6. แรงดัน 220 kV - แรงดันสูงสุด 245 kV 7. แรงดัน 380 kV - แรงดันสูงสุด 420 kV

ตัวแปร	ประเทศไทย	ประเทศจีน	ประเทศญี่ปุ่น	กลุ่มประเทศยุโรป
ความถี่	50 Hz $\pm$ 0.5 Hz	50 Hz $\pm$ 0.2 Hz	50 Hz และ 60 Hz $\pm$ 0.1 ถึง 0.3 Hz ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของแต่ละบริษัท	- ระบบ 50 Hz แบบที่มีการเชื่อมชิงโครนัสใช้ 50 Hz $\pm$ 1% (50 Hz $\pm$ 0.5 Hz) - ระบบ 50 Hz แบบที่ไม่มีการเชื่อมชิงโครนัสใช้ 50 Hz $\pm$ 2% (50 Hz $\pm$ 1.0 Hz) - ระบบ 16.7 Hz แบบที่มีการเชื่อมชิงโครนัสใช้ 16.7 Hz $\pm$ 1% (16.7 Hz $\pm$ 0.167 Hz) - ระบบ 16.7 Hz แบบที่ไม่มีการเชื่อมชิงโครนัสใช้ 16.7 Hz $\pm$ 2% (16.7 Hz $\pm$ 0.334 Hz)

ตัวแปร	ประเทศไทย	ประเทศจีน	ประเทศญี่ปุ่น	กลุ่มประเทศยุโรป
แรงดัน กระพือ	- ≤ 115 kV: ค่า $P_{st} \leq 1.0$ และค่า $Plt \leq 0.8$ - > 115 kV: ค่า $P_{st} \leq 0.8$ และค่า $Plt \leq 0.6$	- ≤ 110 kV: ค่า $Plt \leq 1.0$ - > 110 kV: ค่า $Plt \leq 0.8$	- $\Delta V_{10(\text{mean})} \leq 0.32$ - $\Delta V_{10(\text{max})} \leq 0.45$	- $Plt \leq 1.0$ สำหรับ 95% ของเวลาทั้งหมด
ฮาร์มอนิกส์ -THD voltage	- 11 kV, 12 kV, 22 kV, 24 kV: THD $\leq 4\%$ - 33 kV: THD $\leq 3\%$ - 69 kV: THD $\leq 2.45\%$ - ≥ 115 kV: THD $\leq 1.5\%$	- 35 kV และ 66 kV: THD $\leq 3\%$ - ≥ 110 kV: THD $\leq 2\%$	- ≤ 6.6 kV: THD $\leq 5\%$ - > 6.6 kV: THD $\leq 3\%$	- ≤ 36 kV: THD $\leq 8\%$ * - > 36 kV: ไม่ระบุค่า THD *คิดรวมจนถึงฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 40
แรงดันไม่ได้อุล	- 230 กิโลโวลต์ $\leq 0.8\%$ - 69 และ 115 กิโลโวลต์ $\leq 1.4\%$ - 12, 22, 24 และ 33 กิโลโวลต์ $\leq 1.8\%$ - 230/400 โวลต์ $\leq 2.0\%$	$\leq 2\%$ * * กำหนดไว้เฉพาะการเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ (< 1 kV)	$\leq 3\%$	$\leq 2\%$

ภาคผนวก ข

ข้อกำหนดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ระดับวางแผน

มาตรฐาน Engineering recommendation G5/4 ได้กำหนดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมที่แรงดันตั้งแต่ 400 โวลต์ถึง 400 กิโลโวลต์ ดังแสดงในตารางที่ 2 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันแต่ละอันดับที่แรงดัน 400 โวลต์ ดังแสดงในตารางที่ 3 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันที่แรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ 11 กิโลโวลต์และ 20 กิโลโวลต์ ดังแสดงในตารางที่ 4 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันที่แรงดันสูงกว่า 20 กิโลโวลต์และไม่เกิน 145 กิโลโวลต์ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 2 ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมที่แรงดันตั้งแต่ 400 โวลต์ถึง 400 กิโลโวลต์

แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ (กิโลโวลต์)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (%)
0.4	5
6.6, 11 และ 20	4
22 ถึง 400	3

ตารางที่ 3 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันแต่ละอันดับที่แรงดัน 400 โวลต์

ฮาร์มอนิกส์ลำดับคี่ที่ไม่ใช่ จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกส์ลำดับคี่ที่เป็น จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกส์ลำดับคู่	
อันดับ	แรงดัน ฮาร์มอนิกส์ (%)	อันดับ	แรงดัน ฮาร์มอนิกส์ (%)	อันดับ	แรงดัน ฮาร์มอนิกส์ (%)
5	4.0	3	4.0	2	1.6
7	4.0	9	1.2	4	1.0
11	3.0	15	0.3	6	0.5
13	2.5	21	0.2	8	0.4
17	1.6	>21	0.2	10	0.4
19	1.2			12	0.2
23	1.2			>12	0.2
25	0.7				
>25	0.2+0.5 (25/h)				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกส์รวม (THDv) = 5%					

ตารางที่ 4 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันแต่ละอันดับที่แรงดัน 6.6, 11 และ 20 กิโลโวลต์

ฮาร์มอนิกส์ลำดับคี่ที่ไม่ใช่ จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกส์ลำดับคี่ที่เป็น จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกส์ลำดับคู่	
อันดับ	แรงดัน ฮาร์มอนิกส์ (%)	อันดับ	แรงดัน ฮาร์มอนิกส์ (%)	อันดับ	แรงดัน ฮาร์มอนิกส์ (%)
5	3.0	3	3.0	2	1.5
7	3.0	9	1.2	4	1.0
11	2.0	15	0.3	6	0.5
13	2.0	21	0.2	8	0.4
17	1.6	>21	0.2	10	0.4
19	1.2			12	0.2
23	1.2			>12	0.2
25	0.7				
>25	0.2+0.5 (25/h)				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกส์รวม (THDv) = 4%					

ตารางที่ 5 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันแต่ละอันดับที่แรงดัน >20 และ <145 กิโลโวลต์

ฮาร์มอนิกส์ลำดับคี่ที่ไม่ใช่ จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกส์ลำดับคี่ที่เป็น จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกส์ลำดับคู่	
อันดับ	แรงดัน ฮาร์มอนิกส์ (%)	อันดับ	แรงดัน ฮาร์มอนิกส์ (%)	อันดับ	แรงดัน ฮาร์มอนิกส์ (%)
5	2.0	3	2.0	2	1.0
7	2.0	9	1.0	4	0.8
11	1.5	15	0.3	6	0.5
13	1.5	21	0.2	8	0.4
17	1.0	>21	0.2	10	0.4
19	1.0			12	0.2
23	0.7			>12	0.2
25	0.7				
>25	0.2+0.5 (25/h)				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกส์รวม (THDv) = 3%					

นอกจากนี้ ยังกำหนดขั้นตอนการประเมินการเชื่อมต่อของอุปกรณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นทั้งโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแบ่งการเชื่อมต่อออกเป็น 3 ชั้น และมีขั้นตอนการประเมินก่อนการเชื่อมต่อ ดังแสดงด้วยแผนภูมิในรูปที่ 1

1. ชั้นที่ 1 เป็นการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่แรงดันต่ำ 230 และ 400 โวลต์ กรณีที่จุดเชื่อมต่อมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แรงดันเข้าใกล้เคียงกันในตารางที่ 3 การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควรเพิ่มความระมัดระวัง กรณีที่อุปกรณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ต้องการเชื่อมต่อมีค่าพิกัดกระแสโหลดแต่ละเฟสรวมไม่เกิน 16 แอมแปร์ และปฏิบัติตามข้อกำหนด EN 61000-3-2 สามารถเชื่อมต่อได้โดยไม่ต้องมีตรวจสอบเพิ่มเติม สำหรับกรณีที่อุปกรณ์มีค่าพิกัดกระแสโหลดแต่ละเฟสรวมเกิน 16 แอมแปร์ และปฏิบัติตามข้อกำหนดชั้นที่ 1 หรือ 2 ของ IEC 61000-3-4 สามารถเชื่อมต่อได้โดยไม่ต้องมีตรวจสอบเพิ่มเติม แต่ถ้าไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนดต้องพิจารณาเพิ่มเติมถึงลักษณะและพิกัดของโหลดต่อไป
2. ชั้นที่ 2 เป็นการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่แรงดันต่ำกว่า 33 กิโลโวลต์ ซึ่งมีพิกัดกำลังของตัวแปลงกำลังไฟฟ้าสูงกว่า หรือมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แรงดันเกินกว่าที่กำหนดในชั้นที่ 1 จะต้องทำการตรวจวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แรงดันของระบบไฟฟ้าเดิมก่อนการทำการคาดการณ์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แรงดันหลังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ กรณีที่อุปกรณ์เป็นตัวแปลงกำลังไฟฟ้าหรือตัวควบคุมที่เชื่อมต่อที่แรงดัน 6.6, 11, 20 หรือ 22 กิโลโวลต์มีพิกัดกำลังไม่เกินดังแสดงในตารางที่ 6 สามารถเชื่อมต่อได้โดยไม่ต้องมีตรวจสอบเพิ่มเติม กรณีที่ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แรงดันของระบบไฟฟ้าเดิมไม่เกินร้อยละ 75 ของที่กำหนดในตารางที่ 3 และ 4 และค่ากระแสฮาร์มอนิกส์รวมไม่เกินที่กำหนดในตารางที่ 7 สามารถเชื่อมต่อได้โดยไม่ต้องมีตรวจสอบเพิ่มเติม

ตารางที่ 6 พิกัดกำลังของตัวแปลงกำลังไฟฟ้าหรือตัวควบคุม

แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ (กิโลโวลต์)	พิกัดกำลังของตัวแปลงกำลังไฟฟ้า		พิกัดกำลังของตัวควบคุม
	6 พัลส์	12 พัลส์	6 พัลส์ไธริสเตอร์
6.6, 11, 20 หรือ 22	130 kVA	250 kVA	150 kVA

ตารางที่ 7 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์รวมของผู้เชื่อมต่อใดๆ (อาร์เอ็มเอสแอมแปร์ต่อเฟส)

ลำดับฮาร์โมนิกส์	แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ 6.6, 11, 20 kV	แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ 22 kV	ลำดับฮาร์โมนิกส์	แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ 6.6, 11, 20 kV	แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ 22 kV	ลำดับฮาร์โมนิกส์	แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ 6.6, 11, 20 kV	แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ 22 kV	ลำดับฮาร์โมนิกส์	แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ 6.6, 11, 20 kV	แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ 22 kV
2	4.9	3.3	15	0.3	0.3	28	0.2	0.2	41	0.4	0.4
3	6.6	4.4	16	0.4	0.4	29	0.8	0.8	42	0.1	0.1
4	1.6	1.3	17	3.3	2.0	30	0.1	0.1	43	0.4	0.4
5	3.9	2.6	18	0.2	0.3	31	0.7	0.7	44	0.2	0.2
6	0.6	0.6	19	2.2	1.8	32	0.2	0.2	45	0.1	0.1
7	7.4	5.0	20	0.3	0.3	33	0.1	0.1	46	0.2	0.2
8	0.9	0.9	21	0.1	0.1	34	0.2	0.2	47	0.3	0.3
9	1.8	1.5	22	0.3	0.3	35	0.6	0.6	48	0.1	0.1
10	1.4	1.4	23	1.8	1.1	36	0.1	0.1	49	0.3	0.3
11	6.3	4.7	24	0.1	0.1	37	0.5	0.5	50	0.1	0.1
12	0.2	0.2	25	1.0	1.0	38	0.2	0.2			
13	5.3	4.0	26	0.3	0.3	39	0.1	0.1			
14	0.5	0.5	27	0.1	0.1	40	0.2	0.2			

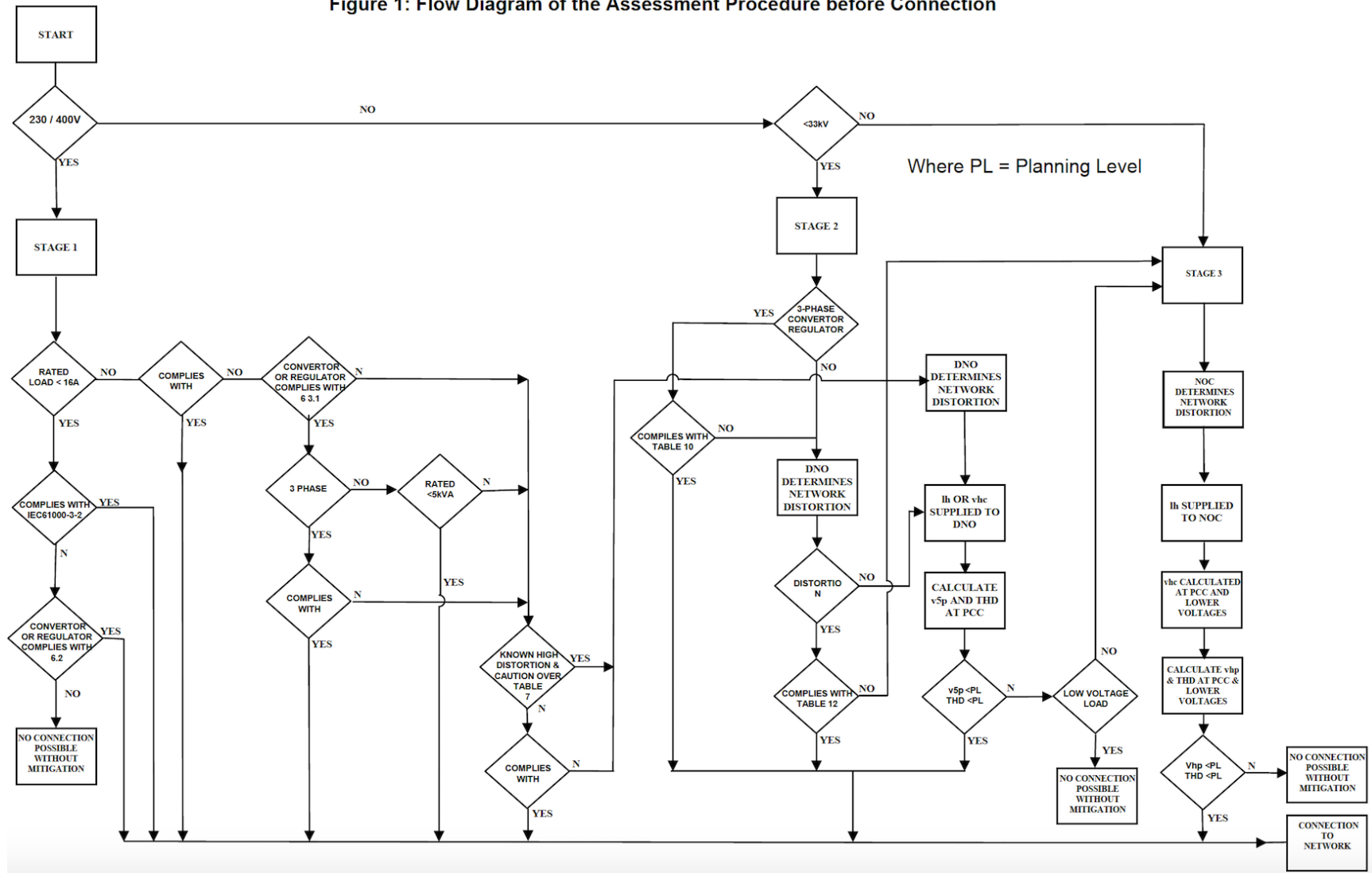
3. ขั้นตอนที่ 3 เป็นการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่แรงดันตั้งแต่ 33 กิโลโวลต์ขึ้นไป หรือที่แรงดันต่ำกว่า 33 กิโลโวลต์ และไม่สามารถพิจารณาเป็นอุปกรณ์ในขั้นที่ 2 ก่อนการเชื่อมต่อผู้จำหน่ายไฟฟ้าจะแจ้งค่าความต้านทานฮาร์มอนิกส์เพื่อให้ผู้ขอเชื่อมต่อประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์จากอุปกรณ์ที่ต้องการเชื่อมต่อ หรือปรับปรุงอุปกรณ์ให้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ไม่เกินขีดกำหนดที่ระบุไว้ (รายละเอียดเพิ่มเติมใน Application Guide ETR 122) ขั้นตอนการประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์จากอุปกรณ์ที่ต้องการเชื่อมต่อ มีดังนี้

- ตรวจสอบวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์เดิมของระบบไฟฟ้าที่มีอยู่
- คำนวณหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์จากอุปกรณ์ที่ต้องการเชื่อมต่อ
- ทำการคาดการณ์ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ที่จะเกิดจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์นั้นจากผลลัพธ์ของ 2

ขั้นตอนข้างต้น

กรณีที่ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ไม่เกินกว่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 3-5 สามารถเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าได้ กรณีที่มีค่ามากกว่าที่ระบุไว้ในตาราง จะต้องทำการปรับปรุงอุปกรณ์ก่อนการเชื่อมต่อ

Figure 1: Flow Diagram of the Assessment Procedure before Connection



รูปที่ 1 ขั้นตอนการประเมินอุปกรณ์ก่อนการเชื่อมต่อ

บรรณานุกรม

- [1] "EN 50388," European standard, 2012.
- [2] "EN 50163," European standard, 2004.
- [3] "EN 50329," European standard, 2003.
- [4] *EN 50121-part 1*, European standard, 2017.
- [5] *EN 50121- part 2*, European standard, 2006.
- [6] *EN 50121- part 4*, European standard, 2016.
- [7] *EN 50121-part 5*, European standard, 2015.
- [8] *EN 50121- part 3*, 2016: European standard.
- [9] "EN 50122- part 1," European standard, 2011.
- [10] P. Kiessling and S. Schmieder, "Current return circuit and earthing," in *Contact lines or electric railways*, Sirmens, Ed., Germany, 2009, pp. 771-848.
- [11] "HD 637 S1," Dansk Standard , 1999.