เอกสารแนวทางการสอบเลื่อนระดับ

ใบอนุญาตเป็นสามัญวิศวกร สาขา

วิศวกรรมไฟฟ้า

เรื่อง

การต่อลงดิน

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
1. บทนำ	1
2. สภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน	1
3. ความต้านทานดิน	5
4. การต่อลงดินของระบบไฟฟ้า	10
5. การต่อลงดินของบริภัณฑ์	13
6. ส่วนประกอบของการต่อลงดิน	15
บรรณานุกรม	18

การต่อลงดิน

1. บทนำ

การต่อลงดิน (Earthing หรือ Grounding) หมายถึง การต่อตัวนำไม่ว่าโดยตั้งใจหรือบังเอิญระหว่างวงจรไฟฟ้าหรือบริภัณฑ์กับดิน หรือกับส่วนที่เป็นตัวนำซึ่งทำหน้าที่แทนดิน การต่อลงดินที่ถูกต้องตามมาตรฐานและหลักวิศวกรรมเป็นมาตรการหนึ่งที่เพิ่มความปลอดภัยในการใช้ไฟฟ้าและยังส่งผลถึงคุณภาพไฟฟ้าอีกด้วย แม้ว่าระบบต่อลงดินมีปริมาณงานน้อยเมื่อเทียบกับงานอื่นๆ ในระบบไฟฟ้า แต่ถ้าติดตั้งอย่างไม่ถูกต้องผลเสียหายที่เกิดขึ้นกับบุคคล หรือบริภัณฑ์ไฟฟ้าอาจสูงมากกว่ามูลค่าของระบบต่อลงดินเสียอีก การต่อลงดินมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1) เพื่อความปลอดภัยของบุคคล และป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า

2) เป็นการอ้างอิงแรงดันของระบบไฟฟ้า และช่วยลดการรบกวนที่มีต่อระบบไฟฟ้าที่อ่อนไหว

3) เป็นการจัดเส้นทางการระบายกระแสไฟฟ้าจากระบบป้องกันฟ้าผ่า

4) จำกัดแรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัสที่เกิดจากการระบายกระแสฟ้าผ่า หรือกระแสผิดพร่อง ให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าขีดอันตราย

การต่อลงดินสำหรับระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์ของการต่อลงดินได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

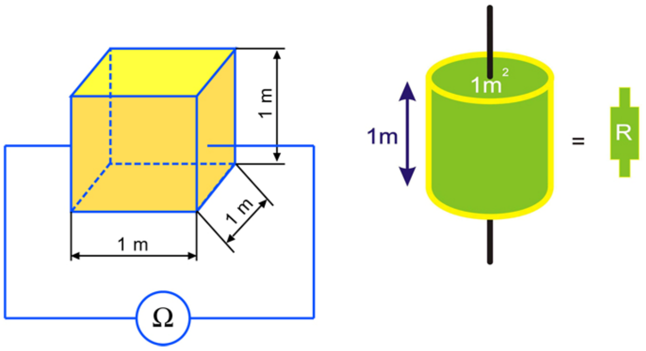
1. การต่อลงดินของระบบ (System Grounding) เป็นการต่อตัวนำเฟสใดเฟสหนึ่งหรือตัวนำนิวทรัลลงดินโดยจงใจ เพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุมระดับแรงดันของระบบเทียบกับดิน และให้มีเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งใช้ตรวจจับการลัดวงจรลงดินของตัวนำในระบบไฟฟ้า

2. การต่อลงดินของบริภัณฑ์ (Equipment Grounding) เป็นการต่อส่วนโลหะของบริภัณฑ์ ซึ่งไม่ได้ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าในภาวะปกติลงดิน เช่น ท่อโลหะสำหรับร้อยสายไฟฟ้า หรือโครงโลหะของมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อวัตถุประสงค์ในการป้องกันบุคคลจากอันตราย เนื่องจากไฟฟ้าช็อกและเป็นเส้นทางการไหลของกระแสผิดพร่องลงดินที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำเพียงพอที่จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินทำงาน

การเลือกแบบชนิดของระบบต่อลงดิน สำหรับระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลางและแรงดันต่ำขึ้นอยู่กับโครงแบบ แบบชนิดของการติดตั้งของระบบไฟฟ้า แบบชนิดของโหลด และความต่อเนื่องของการจ่ายไฟฟ้าที่ต้องการ วิธีการต่อลงดินแบบต่าง ๆ ของบริภัณฑ์ไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าย่อยระบบจำหน่ายระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง และแรงดันต่ำ จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2. สภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน

สภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน ρ_E คือ ค่าที่ได้จากการวัดความต้านทานทางไฟฟ้าของดินที่มีปริมาตรหนึ่งหน่วย โดยทั่วไปมีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร (Ω-m) ซึ่งหมายถึง ค่าความต้านทานที่วัดระหว่างผิวหน้าของด้านตรงข้ามดินหนึ่งลูกบาศก์เมตร ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 นิยามค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน

$$R = \rho_E . \frac{L}{A} \qquad (1)$$

จะได้

$$\rho_E = R.\frac{A}{L}$$

พิจารณาหน่วย

$$= \Omega.\frac{m^2}{m}$$

$$= \Omega.m$$

สภาพต้านทานไฟฟ้าของดินขึ้นอยู่กับชนิดของดิน สามารถพิจารณาง่าย ๆ ได้จากองค์ประกอบของเนื้อดินนั้น ตามลักษณะ และปริมาณความชื้นในเนื้อดิน สารละลายในดินและแร่ธาตุธรรมชาติ สรุปได้ดังตารางที่ 1

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และปริมาณเกลือแร่ที่ละลายอยู่ในเนื้อดินด้วย ดังเช่นตารางที่ 2 และรูปที่ 2 นอกจากนี้ถ้านำดินมาไล่ความชื้นออกไปจนหมดจะกลายเป็นฉนวนที่ดี เพราะจะพบว่าค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าสูงมาก และดินจะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นมากที่ความชื้นประมาณร้อยละ 20 ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 สภาพต้านทานไฟฟ้าของดินแต่ละประเภทโดยประมาณ

ชนิดของดิน	**สภาพต้านทานไฟฟ้าของดินเฉลี่ย (Ω.m)**	**ความต้านทานดินเมื่อใช้หลักดิน ขนาด 16 มม. ยาว 3 ม. 1 ชุด (Ω)**
หินกรวด	600 - 2,500	180 - 750
ดินเหนียวผสมหินกรวด	200 - 400	60 - 120
ดินโคลนปนทราย	100 - 500	30 - 150
ดินเหนียวปนทราย	50 - 200	15 - 60
ดินโคลน	80 - 300	24 - 90
ดินเหนียว	25 - 60	17 - 18
ดินผิวหน้า ดินปุ๋ย	10 - 55	3 - 16

ที่มา : IEEE Std 142-2007

ตารางที่ 2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	**สภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน (Ω.m)**
-5	700
0 (น้ำแข็ง)	300
0 (น้ำ)	100
10	80
20	70
30	60
40	50
50	40

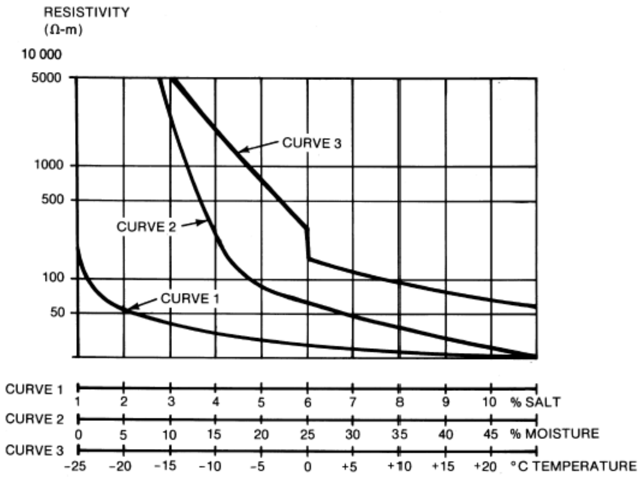
ที่มา : IEEE Std 142-2007

ตารางที่ 3 ผลของความชื้นที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน

ร้อยละของความชื้นในดินตามน้ำหนัก	**สภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน (Ω.m)**		
	Top soil	Sandy Loam	Red Clay
2	ไม่มีข้อมูล	1,850	ไม่มีข้อมูล
4	ไม่มีข้อมูล	600	ไม่มีข้อมูล
6	1,350	380	ไม่มีข้อมูล
8	900	280	ไม่มีข้อมูล
10	600	220	ไม่มีข้อมูล
12	350	170	1,800
14	250	140	550
16	200	120	200
18	150	100	140
20	120	90	100
22	100	80	90
24	100	70	80

ที่มา : IEEE Std 142-2007

เนื่องจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินมีการเปลี่ยนแปลงตามความชื้น และอุณหภูมิ ดังนั้นค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินทุกระบบจึงเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลในแต่ละช่วงเวลา ในการออกแบบระบบการต่อลงดินใด ๆ ควรมีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินจากสภาพหน้างานจริงก่อน จึงจะสามารถนำไปคำนวณหาความต้านทานของระบบต่อลงดินได้



รูปที่ 2 ผลของปริมาณเกลือแร่ ความชื้น และอุณหภูมิ ที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน [3]

วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินที่ได้รับการยอมรับ และนิยมใช้ในปัจจุบันคือวิธีการวัดแบบ 4 จุด (four-point method) หรือวิธีการวัดแบบ Wenner ทำการวัดโดยใช้หลักดินทดสอบจำนวน 4 แท่งไปปักไว้บนพื้นดินที่ต้องการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน 4 จุด ที่ระยะเท่าๆ กันเท่ากับ a ดังรูปที่ 3 (ปักให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน) และปักให้ลึกลงไปไม่เกิน 1/20 ของระยะห่าง a กระแสทดสอบจากเครื่องวัด (I) จะจ่ายออกมาผ่านหลักดินทดสอบที่อยู่ด้านนอกสุด 2 หลัก (C1 และC2) ไหลลงสู่ใต้ดิน และทำให้มีแรงดันไฟฟ้า (V) ตกคร่อมที่หลักดินทดสอบที่อยู่ด้านในทั้ง 2 หลัก (P1 และP2) แรงดันไฟฟ้าจะแปรตามความต้านทานดิน ซึ่งค่าความต้านทานที่ได้จะเท่ากับอัตราส่วนระหว่างแรงดันกับกระแส (V/I) ที่ป้อนค่าความต้านทาน R มีหน่วยเป็นโอห์ม ค่านี้เป็นค่าเฉลี่ยของความต้านทานของเนื้อดินที่ความลึกจากผิวลงไปเท่ากับระยะ a ของแท่งอิเล็กโทรด ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน (ρ_E) ที่ความลึก D (ดังรูปที่ 3) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

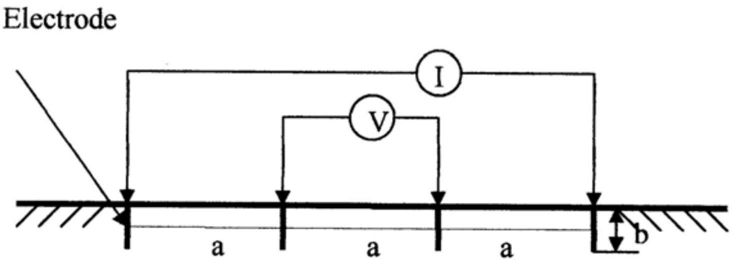
$$\rho_E = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \qquad (2)$$

เนื่องจากระยะความลึก b มีค่าไม่เกิน $a/20$ ซึ่งมีค่าน้อยมาก สมการที่ (2) จึงลดรูปลง

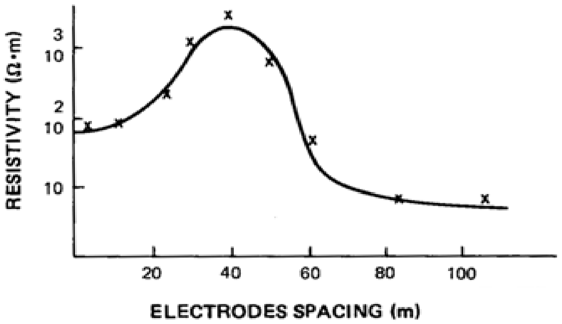
$$\rho_E = 2\pi a R \qquad (3)$$

โดยที่

ρ_E คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน มีหน่วยเป็น โอห์ม – เมตร
R คือ ค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ มีหน่วยเป็น โอห์ม
a คือ ระยะห่างระหว่างหลักดินทดสอบแต่ละอัน ซึ่งห่างเท่ากันทุกแห่ง มีหน่วยเป็นเมตร
b คือ ความลึกของหลักดินทดสอบที่ตอกลงไปในดิน มีหน่วยเป็นเมตร



รูปที่ 3 แสดงวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินด้วยวิธีของ Wenner [12]



รูปที่ 4 แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน [3]

3. ความต้านทานดิน (Earth Resistance หรือ Ground Resistance)

3.1 ความต้านทานดิน หรือ ความต้านทานของระบบต่อลงดิน เป็นความต้านทานโดยรวมของ

1) ความต้านทานของสายต่อหลักดิน
2) ความต้านทานของผิวสัมผัสระหว่างหลักดินกับเนื้อดิน
3) ความต้านทานของดิน

โดยทั่วไปแล้วความต้านทานในส่วนที่ 1 และ 2 จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนที่ 3 ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงความต้านทานของระบบต่อลงดิน มักหมายถึง ความต้านทานของดิน

3.2 ดินระยะไกล (Remote Earth)

IEEE std C62.23-1995 ได้ให้ความหมายของ Remote Earth คือ “ตำแหน่งที่อยู่ภายนอกอิทธิพลของหลักดิน โดยอนุมานให้มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์” ส่วน IEEE std 367-1996 ได้ให้ความหมายของ Remote Earth ว่าคือ “จุดซึ่งไกลออกไปบนผิวดินซึ่งเมื่อเพิ่มระยะห่างจากหลักดินแล้วค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ระหว่างหลักดินกับจุดซึ่งไกลออกไปนั้น ไม่มีค่าเพิ่มขึ้น”

3.3 การคำนวณความต้านทานของระบบต่อลงดิน

เมื่อได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินจากการวัดแล้ว สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินได้โดยพิจารณาชนิดและขนาดของหลักดินที่ใช้

3.3.1 ความต้านทานดินของหลักดินที่ฝังตามแนวลึกในเนื้อดินที่มีความสม่ำเสมอ จะคำนวณได้จากสูตร

$$R = \frac{\rho_E}{2\pi L}\left(\ln\left(\frac{4L}{r}\right)-1\right) \qquad (4)$$

3.3.2 ความต้านทานดินของหลักดินที่ฝังตามแนวนอนในผิวดินที่มีความสม่ำเสมอ จะคำนวณได้จากสูตร

$$R = \frac{\rho_E}{\pi L}\left(\ln\left(\frac{2L}{r}\right) - 1\right) \tag{5}$$

โดยที่

R	คือ	ความต้านทานดิน มีหน่วยเป็นโอห์ม
L	คือ	ความยาวของหลักดิน มีหน่วยเป็นเมตร
r	คือ	รัศมีสมมูลของหลักดิน มีหน่วยเป็นเมตร
ρ_E	คือ	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินมีหน่วยเป็นโอห์ม– เมตร
ln	คือ	natural logarithm

3.4 การวัดความต้านทานของระบบต่อลงดิน

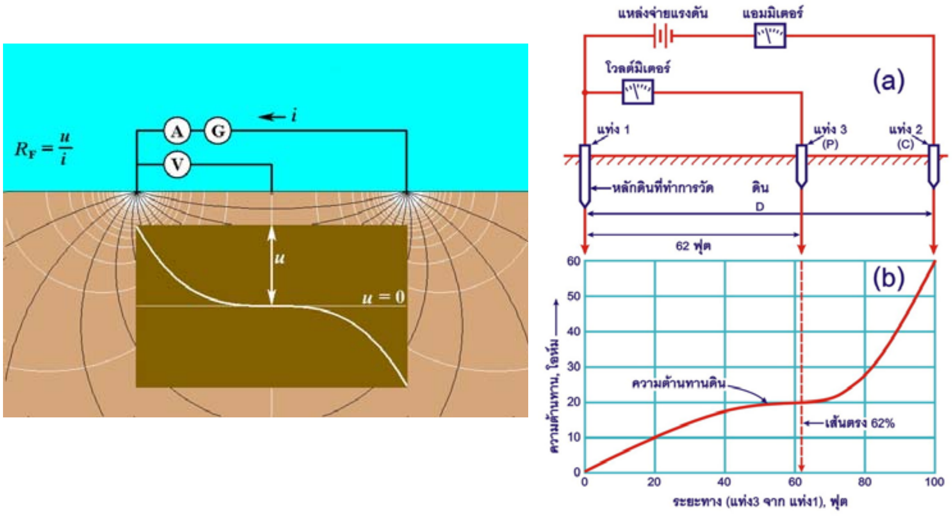
การวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินควรทำการวัดหลังจากติดตั้งระบบต่อลงดินเรียบร้อยแล้ว เพื่อให้แน่ใจว่า ค่าที่ได้หลังจากติดตั้งแล้วที่เกิดขึ้นจริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยพิจารณาระบบต่อลงดินที่ติดตั้งแล้วเสร็จเป็นเสมือนแท่งอิเล็กโทรดที่ต้องการวัดค่าความต้านทาน

3.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการวัดความต้านทานของระบบต่อลงดิน

พื้นฐานของการวัดความต้านทานของระบบต่อลงดินนั้นใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างหลักดินที่ทำการวัด และหลักดินทดสอบ P จากนั้นวัดกระแสที่ไหลระหว่างหลักดินที่ทำการวัด และหลักดินทดสอบ C ด้วยแอมมิเตอร์ ดังรูปที่ 6 ตามกฎของโอห์มสามารถหาค่าความต้านทานได้เมื่อทราบค่าแรงดัน และกระแสดังกล่าว สำหรับเครื่องวัดความต้านทานดินเราจะได้ค่าความต้านทานเป็นโอห์มโดยตรง เพราะภายในเครื่องวัดนั้นมีทั้งตัวจ่ายกระแส และวัดแรงดันบรรจุอยู่ภายในเรียบร้อยแล้ว

3.4.2 วิธี Fall of Potential

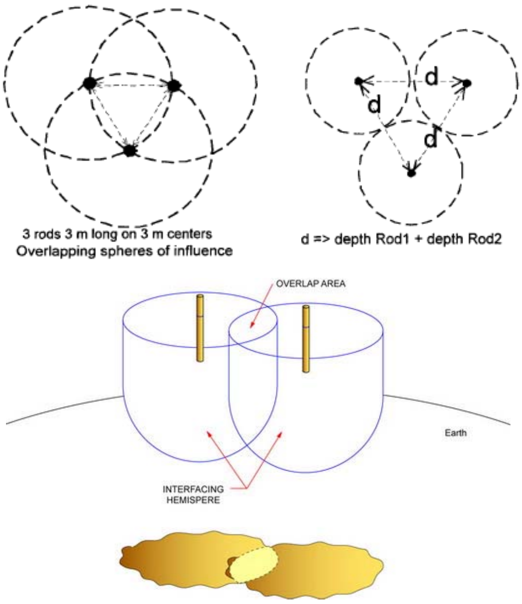
การวัดค่าความต้านทานของดินโดยวิธี Fall of Potential หรือการใช้แผงขั้วไฟฟ้า 3 จุด (three –point method) เป็นที่นิยมมากในการวัดค่าความต้านทานแผ่กระจายของระบบต่อลงดินด้วยแท่งหลักดิน สายดินแบบวงแหวน และการต่อดินของเสาส่งไฟฟ้า และระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย การวัดความต้านทานของระบบต่อลงดินให้แม่นยำต้องตอกหลักจ่ายกระแส C ให้ไกลพอสมควรจากหลักดินที่ต้องการทราบค่าเพื่อให้หลักวัดแรงดัน P อยู่นอกพื้นที่ที่ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของหลักดินที่ทำการวัด และหลักจ่ายกระแส C



รูปที่ 5 แสดงการวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน [14]

พื้นที่ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของหลักดินจะอยู่ในแนวรัศมี และขึ้นอยู่กับความยาวของหลักดิน โดย IEEE std. 142-2007 ได้แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละของความต้านทานทั้งหมดเนื่องจากปริมาตรที่ส่งผลของหลักดินที่ระยะต่าง ๆ ห่างจากหลักดิน เมื่อใช้หลักดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว (16 มม.) ยาว 10 ฟุต (3.0 เมตร) ไว้ดังตารางที่ 4 พบว่าพื้นที่ส่งผลของหลักดินดังกล่าวอยู่ในรัศมี 25 ฟุต (7.6 เมตร) หรือประมาณ 2.5 เท่าของความยาวหลักดิน เมื่อพิจารณาที่ระยะ 10 ฟุต (3.0 เมตร) จากหลักดิน ร้อยละของความต้านทานมีค่าเท่ากับ 94 ของความต้านทานทั้งหมดเนื่องจากปริมาตรที่ส่งผลของหลักดิน แสดงให้เห็นว่าเมื่อปักหลักดิน 3 ชุด เป็นลักษณะสามเหลี่ยมด้านเท่า หรือเส้นตรงโดยมีระยะห่างระหว่างหลักดินเท่ากับ 3.0 เมตร (ซึ่งเป็นที่นิยมในปัจจุบัน) หลักดินแต่ละแท่งจะมีปริมาตรที่ส่งผลซ้อนทับกัน ประสิทธิภาพของหลักดินแต่ละแท่งจะมีเพียงร้อยละ 94

ดังนั้นในการวัดค่าความต้านทานของการต่อลงดิน การกำหนดตำแหน่งปักหลักดินทดสอบ C ซึ่งเป็นเส้นทางไหลกลับของกระแสทดสอบควรพิจารณาถึงพื้นที่ที่ส่งผลของหลักดินที่ทำการวัดด้วย โดยระยะห่างระหว่างหลักดินที่ทำการวัดกับหลักดินทดสอบ C ควรมากกว่า 2.5 เท่าของความยาวของหลักดินที่ทำการวัด ($D1 \geq 2.5 L$) หรือเมื่อหลักดินที่ทำการวัดมีลักษณะเป็นกริด หรือแผ่นฝัง หลักดินทดสอบ C ควรอยู่ห่างจากมากกว่าหลักดินที่ทำการวัดมากกว่า 5 เท่าของความยาวของเส้นทแยงมุมของกริด หรือแผ่นฝัง และหลักดินทดสอบ P ซึ่งทำหน้าที่วัดแรงดันอยู่ห่างจากหลักดินที่ทำการวัดเท่ากับร้อยละ 62 ของระยะห่างระหว่างหลักดินที่ทำการวัดกับหลักดินทดสอบ C ($D2 = 0.62 D1$)

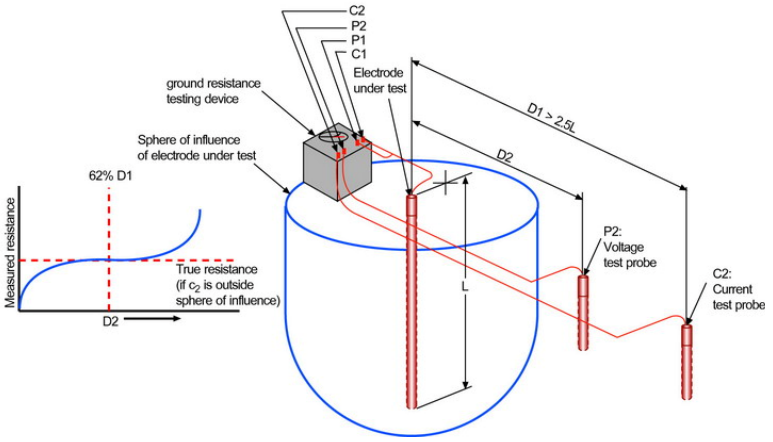


รูปที่ 6 แสดงการซ้อนทับกันของพื้นที่ส่งผลของแท่งหลักดิน [14]

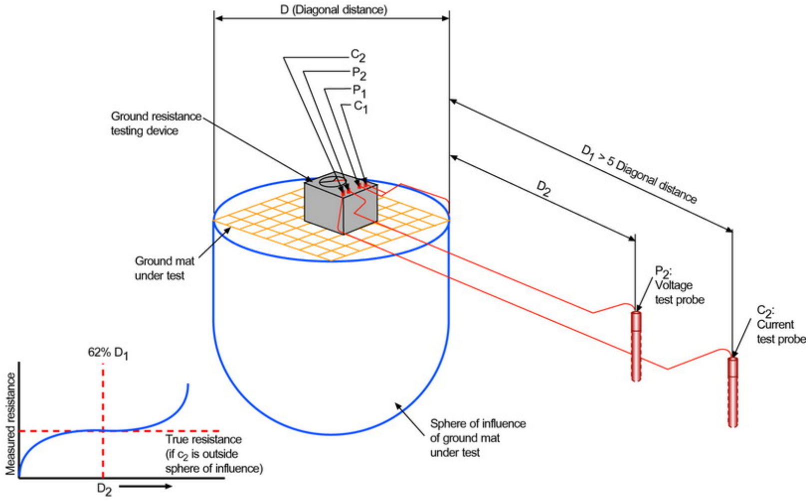
ตารางที่ 4 ร้อยละของปริมาตรที่ส่งผลต่อความต้านทานของหลักดินที่ระยะต่าง ๆ จากหลักดิน

ระยะห่างจากผิวหลักดิน		**ร้อยละของความต้านทานทั้งหมด เนื่องจากปริมาตรที่ส่งผลของหลักดิน (โดยประมาณ)**
ฟุต	**เมตร**	
0.1	0.03	25
0.2	0.06	38
0.3	0.09	46
0.5	0.15	52
1.0	0.3	68
5.0	1.5	86
10.0	3.0	94
15.0	4.6	97
20.0	6.1	98
25.0	7.6	100
(100)	30.5	(104)
(1000)	305.0	(117)

ที่มา IEEE Std 142-2007



รูปที่ 7 แสดงการวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ใช้แท่งหลักดิน [14]



รูปที่ 8 แสดงการวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ใช้หลักดินแบบกริด [14]

อย่างไรก็ดีการวัดความต้านทานของระบบต่อลงดินด้วยวิธีการข้างต้น กระแสที่จ่ายลงไปผ่านหลักดินจะเป็นพัลส์ (pulse) ความถี่ประมาณ 80 -150 เฮิรตซ์ เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากความถี่กำลัง ค่าความต้านทานที่วัดได้จึงเป็นความต้านทานที่ความถี่ต่ำ (หรืออาจเรียกว่าความต้านทานกระแสตรงก็ได้) ในกรณีที่เกิดฟ้าผ่า กระแสที่ไหลลงมายังหลักดินจะเป็นกระแสไฟฟ้าความถี่สูง เนื่องจากกระแสฟ้าผ่าเป็นรูปคลื่นอิมพัลส์ แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในดินจึงเป็นผลคูณของกระแสฟ้าผ่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดิน (Z) หรือเสิร์จอิมพีแดนซ์ (surge impedance)

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (6)$$

โดยที่

R คือ ความต้านทานของระบบต่อลงดิน มีหน่วยเป็นโอห์ม

X คือ รีแอกแตนท์ของระบบต่อลงดิน มีหน่วยเป็นโอห์ม

โดยความต้านทานของระบบต่อลงดินไม่ขึ้นกับความถี่ แต่รีแอกแตนท์ของระบบต่อลงดินแปรตามความถี่ เมื่อพิจารณาที่ความถี่สูงค่ารีแอกแตนท์ของระบบต่อลงดินจึงมีค่าสูงกว่าค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมาก อิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดินจึงประมาณได้เท่ากับ รีแอกแตนท์ของระบบต่อลงดิน ดังนั้นการต่อลงดินที่มีค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินต่ำมาก ๆ แต่มีความยาวของตัวนำลงดิน หรือความยาวของหลักดินมาก ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดินจะสูง เมื่อถูกฟ้าผ่าก็อาจเกิดอันตรายจากแรงดันเกินได้

4. การต่อลงดินของระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าที่มีการใช้งานกันในปัจจุบันมีทั้งระบบที่ไม่ต่อลงดิน (ungrounded system) และระบบที่มีการต่อลงดิน (grounded system) การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับโครงแบบ คุณลักษณะ และวัตถุประสงค์การใช้งาน

4.1 ระบบที่ไม่ต่อลงดิน

ระบบที่ไม่ต่อลงดินหมายถึง ระบบไฟฟ้ากำลังใด ๆ ที่ทำงานโดยไม่มีการต่อตัวนำของระบบลงดินอย่างจงใจ แต่อย่างไรก็ดี ในความจริงระบบดังกล่าวมักมีการคัปปลิงแบบความจุ (capacitive coupling) ระหว่างตัวนำของระบบกับดิน ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก

การเลือกใช้ระบบไฟฟ้าที่ไม่ต่อลงดินนั้น ควรมีการพิจารณาติดตั้งระบบ หรืออุปกรณ์ตรวจจับการลงดินของระบบเพื่อแจ้งเตือนเมื่อเกิดความผิดพร่องลงดิน แม้ว่าระบบไฟฟ้าที่ไม่ต่อลงดินจะสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องในขณะที่เกิดความผิดพร่องลงดินครั้งแรก มีเวลาค้นหา และแก้ไขก่อนที่จะเกิดความผิดพร่องลงดินครั้งที่สอง แต่จากประสบการณ์มักพบว่าความผิดพร่องลงดินครั้งที่สองจะเกิดขึ้นก่อนที่ความผิดพร่องครั้งแรกจะได้รับการค้นหา และแก้ไข

4.2 ระบบที่มีการต่อลงดิน

ระบบไฟฟ้าที่มีการต่อลงดินส่วนใหญ่ ทำการต่อลงดินโดยวิธีใช้ตัวนำนิวทรัลของระบบต่อลงดินที่หนึ่งจุด หรือมากกว่า วิธีการต่อลงดินเหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การต่อลงดินโดยตรง และการต่อลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ การต่อลงดินผ่านอิมพีแดนซ์อาจแบ่งออกเป็นหลายประเภทย่อย คือ การต่อลงดินผ่านรีแอกแตนซ์ การต่อลงดินผ่านความต้านทาน และการต่อลงดินผ่านกราวนด์ฟอลต์นิวทรัลไลเซอร์ (ground fault neutralizer)

4.2.1 การต่อลงดินโดยตรง (Solid Grounding)

การต่อลงดินโดยตรง หมายถึง การต่อนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงกำลัง หรือหม้อแปลงต่อลงดิน (grounding transformer) เข้ากับดินของสถานีไฟฟ้า พื้นดิน หรือสิ่งที่ทำหน้าที่แทนดินโดยตรง

ในระบบไฟฟ้าที่มีการต่อนิวทรัลลงดิน ต้องการการติดตั้งกับดักเสิร์จ (surge arresters) เพื่อทำให้เกิดการต่อลงดินอย่างเป็นผล

4.2.2 การต่อลงดินผ่านความต้านทาน (Resistance Grounding)

ในการต่อลงดินผ่านความต้านทาน นิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกต่อลงดินผ่านตัวต้านทานหนึ่งชุดหรือมากกว่า การต่อลงดินวิธีนี้จะมีแรงดันระหว่างไลน์กับดิน ขณะที่เกิดความผิดพร่องแบบไลน์กับดินใกล้เคียงกับระบบที่ไม่ต่อลงดิน (ยกเว้นแรงดันเกินชั่วครู่)

ระบบที่ใช้การต่อลงดินผ่านความต้านทานควรติดตั้งกับดักเสิร์จแบบที่ใช้ในระบบที่ไม่ต่อนิวทรัลลงดิน

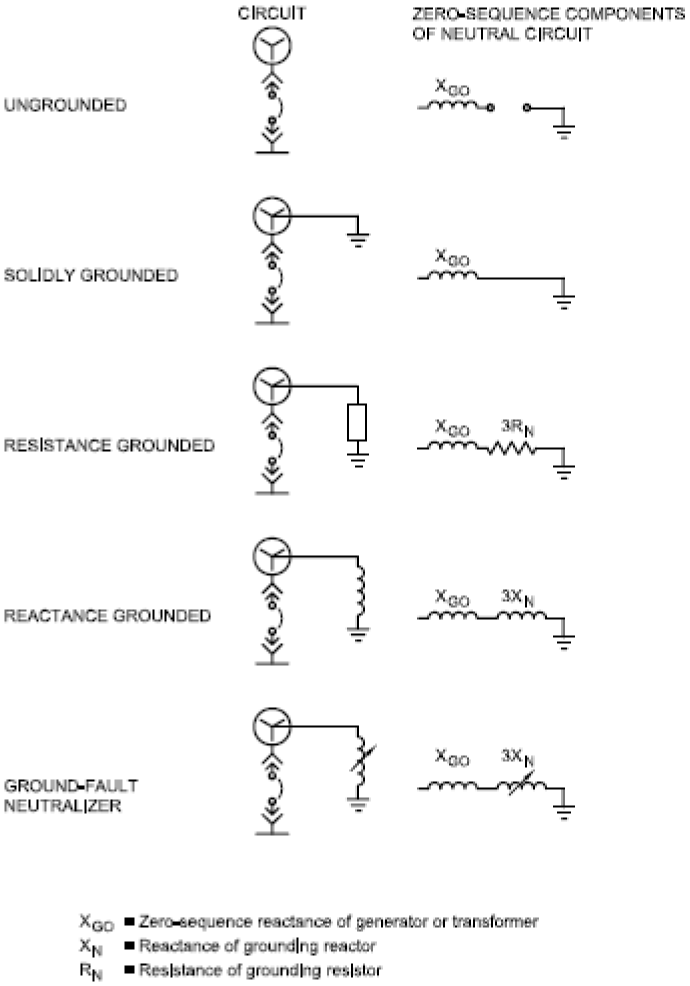
4.2.3 การต่อลงดินผ่านรีแอกแตนซ์ (Reactance Grounding)

การต่อลงดินผ่านรีแอกแตนซ์ หมายถึง การต่อลงดินที่มีรีแอกเตอร์ต่ออยู่ระหว่างตัวนำนิวทรัลของระบบกับดิน เนื่องจากกระแสผิดพร่องลงดินซึ่งอาจไหลในระบบต่อลงดินผ่านรีแอกแตนซ์ เป็นฟังก์ชันของนิวทรัลรีแอกแตนซ์ ขนาดของกระแสผิดพร่องลงดินจึงมักถูกใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับระบุระดับของการต่อลงดิน ค่ากระแสผิดพร่องลงดินที่เกิดขึ้นในระบบที่มีการต่อลงดินผ่านรีแอกแตนซ์ ควรมีค่าอย่างน้อยร้อยละ 25 ของกระแสผิดพร่องแบบสามเฟส เพื่อป้องกันแรงดันเกินชั่วครู่ที่ร้ายแรง ค่ากระแสดังกล่าวสูงกว่าค่ากระแสที่ต้องการในระบบที่มีการต่อลงดินผ่านความต้านทาน ดังนั้น การต่อลงดินผ่านรีแอกแตนซ์จึงไม่พิจารณาเป็นทางเลือกของการต่อลงดินผ่านความต้านทาน

4.2.4 กราวนด์ฟอลต์นิวทรัลไลเซอร์ (Ground-Fault Neutralizer)

กราวนด์ฟอลต์นิวทรัลไลเซอร์ คือ รีแอกเตอร์ที่ต่ออยู่ระหว่างตัวนำนิวทรัลของระบบกับดิน โดยรีแอกเตอร์ดังกล่าวมีค่ารีแอกแตนซ์ที่เลือกเฉพาะ โดยทั่วไปมีค่าค่อนข้างสูง ค่ารีแอกแตนซ์นี้จะถูกปรับเข้ากับกระแสชาร์จของระบบเพื่อให้กระแสผิดพร่องลงดินมีผลลัพธ์เป็นกระแสเชิงความต้านทาน และมีค่าต่ำ กระแสผิดพร่องนี้จะมีเฟสตรงกับแรงดันไลน์กับนิวทรัล (line-to-neutral) ซึ่งทำให้กระแส และแรงดันผ่านจุดตัดศูนย์พร้อมกัน เมื่อเกิดความผิดพร่องลงดินในสายส่ง หรือสายจำหน่ายแบบสายขึงเหนือศีรษะ เช่น เกิดวาบไฟข้ามลูกถ้วยฉนวน อาร์กที่เกิดขึ้นอาจดับลงได้เอง และไม่เกิดขึ้นซ้ำ (restriking) โดยไม่ต้องปลดสายที่มีความผิดพร่องออก ทำให้จำนวนครั้งการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ลดลง และสามารถจ่ายไฟได้ต่อเนื่อง

การต่อลงดินแบบนี้มีใช้ไม่มากในระบบไฟฟ้าเชิงอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ การปรับค่ารีแอกแตนซ์ให้เข้ากับกระแสชาร์จของระบบนั้นทำได้ยากเนื่องจากต้องทราบค่าความจุไฟฟ้าของโครงข่ายระบบไฟฟ้า



รูปที่ 9 วงจรนิวทรัลของระบบ และวงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่ไม่ต่อลงดิน
และระบบไฟฟ้าที่มีการต่อลงดินแบบต่าง ๆ [3]

คุณลักษณะของการต่อลงดินแบบต่าง ๆ สามารถสรุปได้ด้วยตารางในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณลักษณะของการต่อลงดินแบบต่าง ๆ

	ไม่ต้องต่อลงดิน	**การต่อลงดินโดยตรง**	**การต่อลงดินผ่านรีแอกแตนซ์**		**กราวนด์ฟอลทรัลต์นิวทรัลไลเซอร์**	**การต่อลงดินผ่านความต้านทาน**	
			รีแอกเตอร์ค่าต่ำ	**รีแอกเตอร์ค่าสูง**		**ความต้านทานค่าต่ำ**	**ความต้านทานค่าสูง**
กระแสผิดพร่องแบบเฟสลงดินเมื่อคิดเป็นร้อยละของกระแสผิดพร่องแบบสามเฟส	น้อยกว่าร้อยละ 1	อาจมีค่าสูงกว่าร้อยละ 100	โดยปรกติจะออกแบบให้มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 25 ถึง 100	ร้อยละ 5 - 25	มีค่าเข้าใกล้ศูนย์	ร้อยละ 20 และลดลงอยู่ระหว่าง 100 ถึง 1,000 แอมแปร์	น้อยกว่าร้อยละ 1 แต่ไม่ต่ำกว่าค่ากระแสชาร์จระบบ, $3 I_{co}$
แรงดันเกินชั่วครู่	สูงมาก	ไม่สูงเกิน	ไม่สูงเกิน	ไม่สูงเกิน	ไม่สูงเกิน	ไม่สูงเกิน	ไม่สูงเกิน
กับดักเสิร์จ	แบบนิวทรัลไม่ต่อลงดิน	แบบนิวทรัลต่อลงดิน	แบบนิวทรัลต่อลงดินหากกระแสผิดพร่องมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 60 ขึ้นไป	แบบนิวทรัลไม่ต่อลงดิน	แบบนิวทรัลไม่ต่อลงดิน	แบบนิวทรัลไม่ต่อลงดิน	แบบนิวทรัลไม่ต่อลงดิน
หมายเหตุ	ไม่แนะนำเนื่องจากผลของแรงดันเกิน และการไม่แบ่งแยกความผิดพร่อง	โดยทั่วไปใช้กับระบบไฟฟ้า (1) 600 โวลต์ และต่ำกว่า และ (2) สูงกว่า 15 กิโลโวลต์		ไม่ใช้เนื่องจากแรงดันเกินมีค่าสูง	เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานในระบบไฟฟ้าเชิงอุตสาหกรรม และเชิงพาณิชย์ ระดับแรงดันปานกลางซึ่งแยกโดดจากระบบจ่ายไฟฟ้าโดยหม้อแปลงไฟฟ้า[ก]	โดยทั่วไปใช้กับระบบไฟฟ้า 2.4 ถึง 15 กิโลโวลต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อมีเครื่องจักรกลหมุนขนาดใหญ่ต่ออยู่	ใช้กับระบบไฟฟ้า 600 โวลต์ และต่ำกว่า ซึ่งต้องการการจ่ายไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง

(ก.) คำเตือน ควรใช้รูปแบบการต่อลงดินนี้กับอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า (ดู IEEE Std 367 ประกอบ) เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันปานกลาง บางครั้งอาจพบในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เชิงอุตสาหกรรม หรือเชิงพาณิชย์

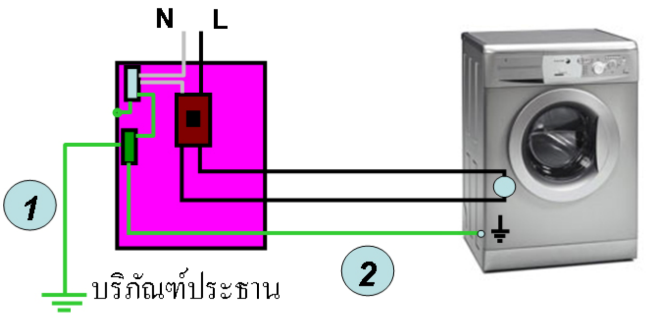
ที่มา : IEEE Std. 142-2007

5. การต่อลงดินของบริภัณฑ์

5.1 การต่อลงดินของบริภัณฑ์ประธาน

การต่อลงดินของบริภัณฑ์ประธาน หรือ แผงสวิตช์เมน คือ การต่อสิ่งห่อหุ้มโลหะต่างๆ และสายนิวทรัลที่บริภัณฑ์ประธานลงดิน ดังแสดงในรูปที่ 10 (ส่วนที่ 1) ซึ่งจะต้องต่อลงดินทางด้านไฟเข้าเท่านั้น โดยสายนิวทรัลของวงจรประธานจะเชื่อมต่อกับสายดินที่แผงเมนสวิตช์เพียงที่เดียวเท่านั้น และห้ามเชื่อมต่อสายนิวทรัลกับสายดินที่อื่นๆอีก ทั้งนี้สายที่เชื่อมสายนิวทรัลกับสายดินที่แผงเมนสวิตช์เรียกว่า “สายต่อฝากหลัก (Main Bonding Jumper)” ขนาดของสายต่อฝากหลักจะพิจารณาตามตารางที่ 6 (มาตรฐานติดตั้งฯ ตารางที่

4-1) หากพื้นที่หน้าตัดของสายวงจรประธานต่อหนึ่งเฟสรวมเกิน 500 mm^2 ให้คิดขนาดของสายต่อฝากหลักเท่ากับ 12.5 % ของสายวงจรประธานต่อหนึ่งเฟส



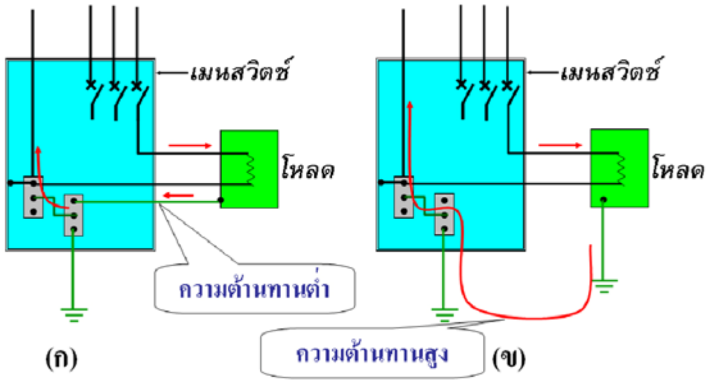
รูปที่ 10 การต่อลงดินบริภัณฑ์ไฟฟ้า

5.2 การต่อลงดินของบริภัณฑ์ไฟฟ้า

การต่อลงดินของบริภัณฑ์ไฟฟ้า คือ การต่อส่วนที่เป็นโลหะที่ไม่มีกระแสไหลผ่านของบริภัณฑ์ไฟฟ้าให้ถึงกันตลอดแล้วต่อลงดิน ดังแสดงในรูปที่ 10 (ส่วนที่ 2) โดยรายละเอียดของสายดินบริภัณฑ์ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.3 วิธีการติดตั้งสายดินบริภัณฑ์นั้นทำโดยการเดินสายตัวนำ (สายดิน) จากแผงสวิตซ์ไปพร้อมกันกับสายวงจรแล้วต่อเข้ากับโครงโลหะขอบริภัณฑ์ หรือจุดที่เตรียมไว้สำหรับต่อสายดิน

ลักษณะการต่อลงดินที่ถูกต้องแสดงไว้ในรูปที่ 11 (ก) ซึ่งเป็นการต่อลงดินแบบ TN-C-S โดยการต่อลงดินแบบนี้เมื่อมีกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน กระแสรั่วดังกล่าวจะหาทางไหลกลับมายังขั้วนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้า (เพื่อให้ครบวงจร) เส้นทางที่ไหลกลับคือผ่านสายดินบริภัณฑ์ ไปยัง บัสดิน (Ground bus) ที่แผงสวิตซ์เมนและผ่านสายต่อฝากหลัก ไปยังนิวทรัลบัส และกลับสู่ขั้วนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเส้นทางนี้มีความต้านทานต่ำทำให้กระแสที่ไหลผ่านจะมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้บริภัณฑ์ป้องกันทำงาน (I = V/R) อีกทั้งโครงโลหะของบริภัณฑ์ไฟฟ้ายังมีแรงดันเทียบดินเท่ากับศูนย์จึงไม่เป็นอันตรายต่อผู้ที่ไปสัมผัส

ส่วนการต่อลงดินดังรูปที่ 11 (ข) เป็นการต่อลงดินแบบ TT ซึ่งไม่ถูกต้องตามมาตรฐานติดตั้งฯ และเมื่อเกิดไฟฟ้ารั่วยังทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่ไปสัมผัสอีกด้วย การต่อลงดินแบบนี้ผู้อ่านจะพบได้เสมอเมื่อไปซื้อเครื่องใช้ไฟฟ้า (เช่น ตู้เย็น เครื่องซักผ้า และที่อันตรายที่สุดคือเครื่องทำน้ำร้อน) และให้ช่างไฟฟ้าที่ไม่มีความรู้เพียงพอมาติดตั้งให้ ช่างไฟฟ้าจะทำการต่อลงดินเครื่องใช้ไฟฟ้าดังกล่าวด้วยวิธีนี้ ซ้ำร้ายก็คือหลักดินที่ช่างไฟฟ้าใช้อาจเป็นเพียงตะปูคอนกรีต ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าหลักดินตามมาตรฐานมาก ทำให้ให้ค่าความต้านทานของการต่อลงดินแบบนี้สูงมาก



รูปที่ 11 เปรียบเทียบการต่อลงดินที่ถูกต้องตามมาตรฐาน (ก) และการต่อลงดินที่ผิด (ข)

การต่อลงดินแบบ TT นี้เมื่อมีกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน กระแสรั่วดังกล่าวจะหาทางไหลกลับมายังขั้วนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้า (เพื่อให้ครบวงจร) เส้นทางที่ไหลกลับคือผ่านสายดิน (ที่ช่างไฟฟ้าต่อให้) ลงไปยังเนื้อดิน กลับเข้ามายังหลักดิน และบัสดิน (Ground bus) ที่แผงสวิตช์เมน และผ่านสายต่อฝากหลัก ไปยังนิวทรัลบัส กลับสู่ขั้วนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเส้นทางนี้มีความต้านทานสูงมากทำให้กระแสที่ไหลผ่านจะมีค่าน้อยไม่เพียงพอที่จะทำให้บริภัณฑ์ป้องกันทำงาน (ความต้านทานของดินสูงกว่าสายตัวนำทองแดงมาก) อีกทั้งโครงโลหะของบริภัณฑ์ไฟฟ้ายังมีแรงดันเทียบดินไม่เท่ากับศูนย์ โดยแรงดันที่โครงโลหะของบริภัณฑ์เท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้าที่รั่ว กับความต้านทานระหว่างหลักดินทั้งสองหลัก (แต่น้อยกว่าแรงดันของระบบ) จึงทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่ไปสัมผัส

6. ส่วนประกอบของการต่อลงดิน

การต่อลงดิน ประกอบไปด้วยส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1) หลักดิน รากสายดิน (Earthing electrode หรือ Grounding electrode)
2) สายต่อหลักดิน (Grounding electrode conductor)
3) สายดิน (Grounding conductor)

6.1 หลักดิน หรือ รากสายดิน

“หลักดิน” เป็นคำที่ใช้ในมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2556 ส่วน “รากสายดิน” เป็นคำที่ใช้ในมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2553 ซึ่งทั้งหลักดิน และรากสายดิน หมายถึง ส่วนของระบบต่อลงดินที่สัมผัสทางไฟฟ้าโดยตรงกับพื้นดิน ทำหน้าที่ระบายกระแสผิดพร่อง หรือกระแสฟ้าผ่าลงดิน

มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2556 ได้กำหนดรายละเอียดของหลักดิน และสิ่งที่ใช้แทนหลักดินไว้ดังนี้

1) แท่งเหล็กหุ้มด้วยทองแดง หรือแท่งทองแดง หรือแท่งเหล็กอาบสังกะสี ต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 5/8” หรือ 16 มิลลิเมตร (ขนาดทางการค้า) ยาวไม่น้อยกว่า 2.40 เมตร และปลายข้างหนึ่งปักลงดินไม่น้อยกว่า 2.40 เมตร ใช้ได้ดีกับดินที่มีชั้นหินอยู่ลึกเกิน 3 เมตร การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลักดินจะช่วยลดความต้านทานดินได้เพียงเล็กน้อย แต่จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและทนต่อการสึกกร่อน สำหรับแท่งเหล็กหุ้มด้วยทองแดง ทองแดงที่ใช้หุ้มต้องมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 และหุ้มอย่างแนบสนิทกับแกนเหล็ก มีความหนาของทองแดงไม่น้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตร
2) แผ่นโลหะที่มีพื้นที่สัมผัสดินไม่น้อยกว่า 1,800 ตารางเซนติเมตร ถ้าเป็นแผ่นเหล็กอาบโลหะชนิดกันการผุกร่อนต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร หากเป็นโลหะกันการผุกร่อนชนิดอื่นที่ไม่ใช่เหล็กต้องหนาไม่น้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตร ฝังลึกจากผิวดินไม่น้อยกว่า 1.6 เมตร
3) โครงสร้างอาคารที่เป็นโลหะ โครงสร้างอาคารดังกล่าว จะต้องวัดมีความต้านทานระหว่างหลักดินกับดินไม่เกิน 5 Ω
4) หลักดินชนิดอื่นๆ ต้องได้รับความเห็นชอบจากการไฟฟ้าฯ

ทั้งนี้ไม่อนุญาตให้ใช้อะลูมิเนียมเป็นหลักดิน

6.2 สายต่อหลักดิน

สายต่อหลักดิน เป็นสายที่เชื่อมต่อหลักดินเข้ากับบัสดินที่แผงสวิตช์เมน โดยต้องเป็นตัวนำทองแดง ตัวนำเดี่ยว หรือตีเกลียวหุ้มฉนวนและเป็นสายเส้นเดียวยาวต่อเนื่องตลอดไม่มีการตัดต่อ แต่ถ้าเป็นบัสบาร์อนุญาตให้มีการต่อได้ การต่อสายต่อหลักดินเข้ากับหลักดินนั้น จะต้องเป็นการต่อที่เข้าถึงได้และเป็นการต่อลงดินที่ใช้ได้ผลดี หากระบบหลักดินเป็นแบบฝังใต้ดิน การต่อก็ไม่จำเป็นต้องเป็นแบบที่เข้าถึง ได้เช่นระบบหลักดินที่ตอกลึกเข้าไปในดิน และระบบหลักดินที่ฝังตัวอยู่ในคอนกรีต เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้สามารถวัดความต้านทานดิน และบำรุงรักษาได้ ควรต่อหลักดินเข้ากับ Grounding Pit หรือ Test Box การต่อสายต่อหลักดินเข้ากับหลักดินอาจทำได้โดย การเชื่อมติดด้วยความร้อน (Exothermic Welding) หูสาย หัวต่อแบบบีบอัด ประกับต่อสาย แต่ห้ามต่อโดยใช้การบัดกรีเป็นหลัก ขนาดของสายต่อหลักดินนั้นพิจารณาจากขนาดของตัวนำประธานแรงต่ำ โดยเลือกจากตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ขนาดต่ำสุดของสายต่อหลักดินของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

ขนาดตัวนำประธาน (ตัวนำทองแดง) (mm^2)	**ขนาดต่ำสุดของสายต่อหลักดิน (ตัวนำทองแดง) (mm^2)**
ไม่เกิน 35	10 (หมายเหตุ)
เกิน 35 แต่ไม่เกิน 50	16
” 50 ” 95	25
” 95 ” 185	35
” 185 ” 300	50
” 300 ” 500	70
เกิน 500	95

หมายเหตุ แนะนำให้ติดตั้งในท่อโลหะหนา ท่อโลหะหนาปานกลาง ท่อโลหะบาง หรือ ท่ออโลหะ

ที่มา วสท. 2556

6.3 สายดิน หรือ สายดินบริภัณฑ์

สายดินบริภัณฑ์ เป็นสายตัวนำที่เดินสายร่วมไปกับสายของวงจรเป็นตัวนำทองแดง หุ้มฉนวนหรือเปลือยก็ได้ ถ้าหุ้มฉนวน ฉนวนต้องมีสีเขียว หรือเขียวแถบเหลือง สำหรับสายที่ใหญ่กว่า 16 ตารางมิลลิเมตร ใช้ทำเครื่องหมายแทนได้ (เนื่องจากสายขนาดดังกล่าวจะผลิตเฉพาะฉนวนสีดำ) เปลือกโลหะของสายเคเบิลชนิด AC, MI, และ MC หรือเปลือกของบัสเวย์ ขนาดของสายดินบริภัณฑ์พิจารณาจากขนาดของเครื่องป้องกันกระแสเกิน (ในกรณีของมอเตอร์ไฟฟ้าพิจารณาจากขนาดเครื่องป้องกันโหลดเกิน) โดยเลือกจากตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ขนาดต่ำสุดของสายดินของบริภัณฑ์ไฟฟ้า

พิกัดหรือขนาดปรับตั้ง ของเครื่องป้องกันกระแสเกินไม่เกิน (A)	ขนาดต่ำสุดของสายดิน ของบริภัณฑ์ไฟฟ้า (ตัวนำทองแดง) (mm^2)
20	2.5 *
40	4 *
70	6 *
100	10
200	16
400	25
500	35
800	50
1,000	70
1,250	95
2,000	120
2,500	185
4,000	240
6,000	400

ที่มา วสท. 2556

บรรณานุกรม

[1] IEC , IEC 60364-4-41 (2005) Low-voltage electrical installation – Part 4-41 : Protection for safety – Protection against electric shock. 2005.

[2] IEEE , IEEE std 80-2000 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. 2000.

[3] IEEE , IEEE std 142-1991 "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power System" , 1991.

[4] IEEE , IEEE std C62.23-1995 "IEEE application guide for surge protection of electric generating plants"

[5] IEEE , IEEE std 367-1996 "IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltage From a Power Fault"

[6] IET , BS 7671:2008 "Requirements for Electrical Installations"

[7] NFPA , NFPA 70 2011 Edition "National Electrical Code"

[8] NFPA , NFPA 780 2004 Edition "Standard for the Installation of Lightning Protection Systems"

[9] A.A Sallam, O.P. Malik, Electric Distribution Systems. : John Wiley & Son , 2011.

[10] ชายชาญ โพธิสาร, "การต่อลงดินและการวัดค่าความต้านทานดิน", ไฟฟ้าสาร, ปีที่ 14, ฉบับที่ 5 , กันยายน - ตุลาคม 2550, หน้า 43 - 57.

[11] ชำนาญ ห่อเกียรติ, เทพกัญญา ขัติแสง, การต่อลงดิน. กรุงเทพ : โรงพิมพ์จรัลสนิทวงศ์, 2549.

[12] วิวัฒน์ กุลวงศ์วิทย์, การต่อลงดินระบบไฟฟ้า เล่มที่ 1 การต่อลงดินระบบ. กรุงเทพ : สมาคมวิศวกรรมออกแบบและปรึกษาเครื่องกล และไฟฟ้าไทย, 2547.

[13] วิวัฒน์ กุลวงศ์วิทย์. "การต่อลงดินระบบไฟฟ้า เล่มที่ 2 การป้องกันไฟฟ้าเพื่อความปลอดภัย" สมาคมวิศวกรออกแบบและปรึกษาเครื่องกลและไฟฟ้าไทย 2546.

[14] วิวัฒน์ กุลวงศ์วิทย์. "หลักดิน รากสายดิน และการวัด" สมาคมวิศวกรออกแบบและปรึกษาเครื่องกลและไฟฟ้าไทย 2548.

[15] วิวัฒน์ กุลวงศ์วิทย์, การต่อลงดินระบบไฟฟ้า เล่มที่ 5 อิมพัลส์อิมพีแดนซ์ กรุงเทพ : สมาคมวิศวกรออกแบบและปรึกษาเครื่องกลไฟฟ้าไทย, 2552.

[16] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย, กรุงเทพ , พ.ศ. 2556.