บทที่ 4

ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า
เนื่องจากระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน

เมื่อทำการติดตั้งระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานแล้วจะทำให้ค่ากระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปทำให้มีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งตลอดจนอุปกรณ์ป้องกันซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้

4.1 ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าเนื่องมาจากผลของแรงดันไฟฟ้า

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงแรงดันมีดังนี้

- ฉนวนไฟฟ้า
- กับดักเสิร์จ

4.1.1 ฉนวนไฟฟ้า (Insulation)

ค่าแรงดันไฟฟ้าผิดพร่องที่มีค่าเพิ่มขึ้นในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานนั้นอาจมีผลกระทบโดยตรงต่อฉนวนในส่วนต่างๆของระบบไฟฟ้า ได้แก่ ฉนวนลูกถ้วย ฉนวนในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า ฯลฯ ดังนั้นเราจะสามารถพิจารณาค่าแรงดันเมื่อเกิดความผิดพร่องเพื่อหาระดับการฉนวนที่เหมาะสมสำหรับระบบต่อลงดินโดยตรง เมื่อพิจารณาแรงดันเมื่อเกิดความผิดพร่องลงดินในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 พบว่า ค่าแรงดันเฟสลงดินสูงสุดของของระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานมีค่าอยู่ในช่วง 1-$\sqrt{3}$ เท่าของค่าแรงดันพิกัดเฟสลงดิน

พิจารณาตามมาตรฐาน IEC71-1 เป็นดังตารางที่ 4.1 พบว่าค่า U_{AC} ตามตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นค่าที่ฉนวนทนแรงดันนั้นๆได้ในระยะสั้นของแต่ละระดับแรงดันมีค่าประมาณ 2 เท่าของแต่ละระดับแรงดัน ค่าแรงดันเฟสลงดินสูงสุดของระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน (73% ของV_{LN}) เมื่อเทียบกับระบบต่อลงดินโดยตรงนั้น (40% ของ V_{LN}) มีค่ามากขึ้น 33 % แต่ก็ยังอยู่ในระดับฉนวนเดียวกัน ดังนั้นระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานต่ำนั้นสามารถใช้ระดับการฉนวนเดียวดับระบบต่อดินโดยตรงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระดับการฉนวนตามมาตรฐาน IEC 71-1

U_m kV (rms)	U_L kV (peak)		U_{AC} kV (rms)
	List1	List2	
3.6	20	40	10
7.2	40	60	20
12.0	60	75	29
17.5	75	95	38
24.0	95	125	50
36.0	145	170	70

ตารางใช้สำหรับระดับแรงดันช่วง 1 kV ถึง 52 kV

U_m คือค่าแรงดันสูงสุด (Highest Voltage for Equipment)

U_L คือค่าแรงดัน BIL ของฉนวนนั้น (Rated Lightning Impulse Withstand Voltage)

โดย List1 ใช้สำหรับระบบที่ไม่ต่อกับ Overhead Line

List2 ใช้สำหรับระบบที่ต่อกับ Overhead Line

U_{AC} คือค่าแรงดันที่สามารถทนได้ในระยะสั้น(Rated Power Frequency Short Duration Withstand Voltage)

4.1.2 กับดักเสิร์จ (Surge Arrester)

การเลือกค่าพิกัดของกับดักเสิร์จนั้นสามารถเลือกได้ 2 แบบคือเลือกตามค่า U_C ตามมาตรฐาน IEC และเลือกตามค่า MCOV (Maximum Continuous Operating Voltage) แต่ขนาดของกับดักเสิร์จนั้นจะเลือกตามค่า U_C

U_C คือค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเลือกกับดักเสิร์จ เมื่อสามารถนำมาหาค่าระดับแรงดันสำหรับการป้องกันแรงดันเกิน U_P (Protective Level Voltage) ค่าแรงดันทั้งสองสามารถแยกแยะได้ดังนี้ ค่าแรงดัน U_C เป็นค่าพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จ

ค่าแรงดัน U_P เป็นค่าแรงดันที่กับดักเสิร์จนั้นทำงานเพื่อป้องกันแรงดันเกินให้กับอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้า

ในระบบที่มีการต่อลงดินที่ต่างๆกันทำให้ต้องเลือกค่าแรงดันพิกัดของกับดักเสิร์จแตกต่างกันออกไปดังนี้ [17]

ระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน

ระบบนี้เป็นระบบที่มีค่าแรงดันเมื่อเกิดความผิดพร่องเป็น 1.73 เท่าของแรงดันเฟสลงดิน ดังนั้นในการหาค่าพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จนี้จึงเลือกให้มีค่ามากกว่าค่าแรงดันสูงสุดของระบบดังนี้

$$U_C \geq U_m \tag{4.1}$$

โดยที่ U_C คือค่าแรงดันพิกัดของกับดักเสิร์จ

U_m คือค่าแรงดัน Line to Line สูงสุดในระบบไฟฟ้า

เช่นในระบบ 10 kV ที่มีค่าแรงดันสูงสุด 11.5 kV นั้นควรเลือกใช้ค่าพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จค่า 11.5 kV หรือมากกว่านั้น

ระบบต่อลงดินโดยตรง

ระบบต่อลงดินโดยตรงนี้เป็นระบบที่สามารถเลือกใช้ค่าพิกัดแรงดันเสิร์จได้ในค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่าแรงดันสูงสุดเมื่อเกิดความผิดพร่องจะอยู่ในระดับแรงดันเฟสลงดินเท่านั้น ค่าพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จสามารถเลือกได้ดังนี้

$$U_C \geq \frac{1.1 \times U_m}{\sqrt{3}} \tag{4.2}$$

โดยที่ U_C คือค่าแรงดันพิกัดของกับดักเสิร์จ

U_m คือค่าแรงดันระหว่างสายสูงสุดในระบบไฟฟ้า

เช่นระบบ 10 kV ข้างต้นที่มีค่า U_m = 11.5 kV ซึ่งมีการต่อลงดินโดยตรงสามารถใช้กับดักเสิร์จที่มีค่าพิกัดแรงดัน U_C = 7.3 kV หรือมากกว่าได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการต่อลงดินจะมีค่าเพียง 2 ใน 3 ของค่าพิกัดแรงดันในระบบที่ไม่มีการต่อลงดินเท่านั้น

ระบบต่อลงดินอื่นๆ

ระบบต่อลงดินอื่นนั้นมีค่าแรงดันเมื่อเกิดความผิดพร่องแตกต่างกันโดยเราสามารถหาค่าพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จได้โดยการพิจารณาจากค่า C_e (Earth Fault Factor) ซึ่งจะมีค่าเป็น 1.4 สำหรับระบบที่มีการต่อลงดินโดยตรง และมีค่าเป็น 1.73 สำหรับระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน ดังนี้

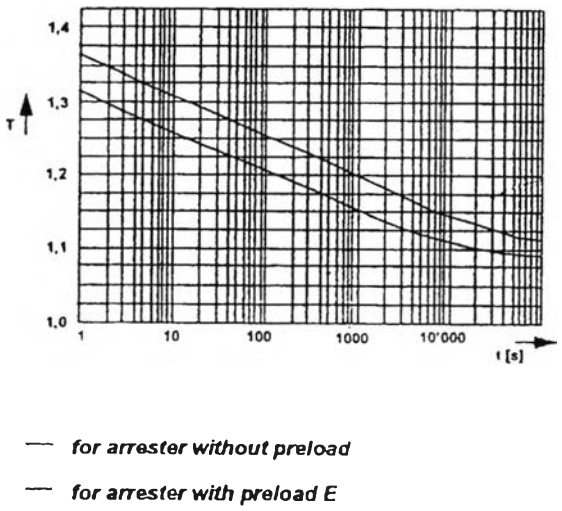
$$U_C \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}} \times \frac{C_e}{T} \tag{4.3}$$

โดยที่ U_C คือค่าแรงดันพิกัดของกับดักเสิร์จ

U_m คือค่าแรงดันระหว่างสายสูงสุดในระบบไฟฟ้า

C_e คือค่าตัวประกอบความผิดพร่องลงดิน (Earth Fault Factor) ของระบบไฟฟ้า (ค่า V_{LN} มากที่สุดที่เกิดขึ้นต่อ V_{LG} พิกัด) [7]

T คือค่า Temporary Over-voltage Factor ซึ่งสามารถหาได้จากรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 Temporary Over-voltage withstand Strength T

ค่า T ดังรูปที่ 4.1 นั้นจะแบ่งเป็นเส้นกราฟ 2 เส้น โดยที่เส้นกราฟ A เป็นเส้นกราฟที่ไม่ได้มีการใช้งานมากก่อน (Without Pre-load) และเส้นกราฟ B เป็นเส้นกราฟที่มีการใช้งานมาก่อนแล้ว (Pre-load) ในทางปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยมากกว่าจึงควรใช้เส้นกราฟ B ซึ่งอยู่ต่ำกว่า

จากสมการที่ (4.3) เมื่อระบบไม่มีการต่อลงดิน จะมีค่า TOV เป็นเวลานานดังนั้นจึงมีค่า T=1 และเนื่องจากระบบที่ไม่มีการต่อลงดินมีค่า C_e เป็น 1.73 เมื่อคิดตามสมการที่ (4.3) จะได้ค่า U_C จึงมีค่ามากว่า U_m เหมือนสมการ (4.1)

สำหรับระบบที่มีการต่อลงดินโดยตรงนั้นจะมีค่า C_e เป็น 1.4 เมื่อคิดที่ค่า TOV เท่ากับ 3 วินาที จากรูปที่ 4.1 ได้ค่า T เป็น 1.28 ดังนั้นค่า U_C จากสมการที่ (4.3) จึงสามารถหาได้ในรูปเดียวกับสมการที่ (4.2) เช่นกัน

4.2 ผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของกระแส

4.2.1 ความเสียหายของอุปกรณ์ต่างๆ

ในระบบต่อลงดินโดยตรงนั้นค่ากระแสผิดพร่องจะมีค่ามากทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ทางไฟฟ้ากำลัง ดังแสดงในบทที่ 3 สำหรับระบบต่อลงดินผ่านความด้านทานค่าต่ำนั้นจะสามารถจำกัดค่ากระแสให้อยู่ในช่วง 200-2000 A ได้ ดังนั้นความเสียหายเนื่องจากกระแสผิดพร่องในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานนั้นจึงน้อยในระบบต่อลงดินโดยตรง

4.2.2 ฟิวส์ (Fuse)

ค่ากระแสผิดพร่องที่ลดลงเหลือ 200-2000 A ยังอยู่ในช่วงการทำงานของฟิวส์แรงดันสูง แต่ค่าพิกัดกระแสของฟิวส์แรงดันสูงในระบบต่อลงดินแบบผ่านความต้านทานนั้นต้องใช้ค่าต่ำกว่าฟิวส์ที่ใช้ในระบบต่อลงดินโดยตรง เนื่องจากค่ากระแสผิดพร่องที่ลดลงของระบบต่อลงดินผ่านความต้านค่าต่ำนี้จะทำให้การประสานสัมพันธ์ของฟิวส์กับเซอร์กิตเบรคเกอร์ทำไม่ได้เมื่อใช้ค่าพิกัดกระแสของฟิวส์เท่ากับระบบต่อลงดินโดยตรง

4.2.3 ระบบป้องกัน

การประสานสัมพันธ์ของรีเลย์ในระบบป้องกันสำหรับการป้องกันความผิดพร่องแบบเฟสของระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานนั้นยังคงทำได้เหมือนระบบต่อลงดินโดยตรง แต่การประสานสัมพันธ์ในส่วนของรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินของระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานนั้นจะมีค่าการปรับตั้งแตกต่างไปเมื่อเปรียบเทียบกับระบบต่อลงดินโดยตรง และการประสานสัมพันธ์ของรี

เลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าต่ำนี้ยังทำได้ยากกว่าระบบต่อลงดินโดยตรงด้วยเนื่องจากค่ากระแสผิดพร่องที่น้อยกว่า อย่างไรก็ดีหลักการในการประสานสัมพันธ์ของระบบทั้งสองก็ยังคงเหมือนกับการประสานสัมพันธ์ของรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องแบบเฟส

4.3 การเลือกความต้านทานต่อลงดิน [18]

ความต้านทาน (Resistor) คืออุปกรณ์ที่นำกระแสในวงจรไฟฟ้า โดยมีหน้าที่หลักคือทำการจำกัดกระแสให้อยู่ในค่าที่คาดไว้ล่วงหน้า

ค่าความต้านทานที่เลือกใช้ในการต่อลงดินนั้นต้องเป็นความต้านทานที่มีค่าความต้านทานสม่ำเสมอกัน มีความแข็งแรงเชิงกลในขณะทำงานภายใต้อุณหภูมิต่างๆกัน โดยไม่มีผลต่อฉนวนไฟฟ้าของความต้านทานนั้น การเลือกความต้านทานเพื่อใช้ในการต่อลงดินต้องพิจารณาดังนี้

4.3.1 พิกัดแรงดัน (Rate Voltage)

พิกัดแรงดัน หมายถึง ค่าแรงดัน rms ที่ความถี่พิกัด (50 Hz) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างปลาย 2 ด้านของความต้านทานนั้นในขณะทำงานปกติอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำความต้านทานนี้มีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิซึ่งขึ้นกับสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature Coefficient) ซึ่งค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงนี้ทำให้ค่ากระแสและแรงดันเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นเมื่อผลคูณของกระแสผิดพร่องที่เกิดขึ้นกับค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C ทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานเกิน 80% ของแรงดันเฟสลงดิน ค่าความต้านทานนั้นควรเลือกให้มีพิกัดแรงดันมีค่าเท่ากับแรงดันเฟสลงดิน

4.3.2 พิกัดกระแส (Rate Current) และพิกัดกระแสต่อเนื่อง (Rate Continuous Current)

พิกัดกระแส หมายถึงค่าพิกัดกระแสของค่าอุปกรณ์ต่อลงดินนั้นมีค่าพิกัดกระแสความร้อน (Rate of Thermal Current) ของอุปกรณ์ต่อลงดินนั้นเช่นกัน

พิกัดกระแสต่อเนื่อง หมายถึงค่ากระแส rms ที่ผ่านอุปกรณ์นั้นภายใต้สภาวะการทำงานปกติที่ไม่ทำให้ค่าอุณหภูมิของอุปกรณ์นั้นเพิ่มขึ้นเกินค่าที่กำหนดไว้

โดยปกติค่าพิกัดกระแสของความต้านทานนั้นจะเลือกให้มีค่าเท่ากับกระแสผิดพร่องสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลาหนึ่ง สำหรับพิกัดกระแสต่อเนื่องนั้นจะเลือกให้มีค่าเป็นศูนย์

4.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature Coefficient)

ค่าการนำไฟฟ้าของความต้านทานนั้น จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยสามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานดังนี้

$$a = \frac{R_2 - R_1}{R_1(\theta_2 - \theta_1)} \tag{4.4}$$

$$R_2 = R_1[1 + a(\theta_2 - \theta_1)] \tag{4.5}$$

โดยที่ R_1 และ R_2 คือค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ θ_1 และ θ_2 ตามลำดับ

4.3.4 การเชื่อมต่อตัวนำต่างๆ (Conductor Connection)

จุดปลายเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่อลงดินทั้งหมดต้องต่อโดยตรงโดยทำการเชื่อม (Welding) ไม่ควรใช้การเชื่อมแบบ Low-Melting Alloy เนื่องจากจะทำให้เกิดความต้านทานขึ้นเมื่อนำไปใช้งาน นอกจากนี้จุดเชื่อมต่อทั้งหมดต้องมีความแข็งแรงเชิงกลเพื่อให้ความความต่อเนื่องในการจ่ายไฟฟ้า

4.3.5 การทดสอบความต้านทาน (Resistance Test)

ความต้านทานทุกตัวต้องทำการวัดเพื่อให้ค่าความต้านทานมีค่าตามที่ออกแบบไว้ถ้าไม่สามารถหาความต้านทานตรงตามที่ออกแบบไว้ได้ก็ควรเลือกค่าความต้านทานที่ใกล้เคียง โดยค่าความต้านทานต้องมีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วงไม่เกิน $\pm$ 10%

4.3.6 ระดับการฉนวน (Insulation Level)

ระดับการฉนวนของอุปกรณ์ต่อลงดินนั้นได้มีการกล่าวไว้โดยอ้างอิงตามตารางที่ 4.2 โดยที่ระดับการฉนวนของอุปกรณ์ต่อลงดินนั้นสามารถกำหนดให้เป็นระดับเดียวกับระดับการฉนวนของระบบ แต่ค่า BIL นั้นสามารถลดลงค่าลงมาจากระดับปกติได้เล็กน้อยแล้วแต่ความเหมาะสม

ตารางที่ 4.2 ระดับการฉนวนของอุปกรณ์ต่อลงดิน

(Insulation Classes for Neutral Grounding Device)

Insulation Class			
System Insulation Class, kV		Fault Voltage Criteria	
Column 1	Column 2	Column 3	Column 4
Class	BIL	kV	kV
1.2	45	1.2	1.2
2.5	60	2.5	2.5
5.0	75	5.0	5.0
8.7	95	8.7	8.7
15.0	110	8.7	8.7
23.0	150	15.0	8.7
34.5	200	25.0	8.7
46.0	250	34.5	15.0
69.0	350	46.0	15.0
92.0	450	69.0	15.0
115.0	550	69.0	15.0
138.0	650	92.0	15.0
161.0	750	92.0	15.0
180.0	825	115.0	15.0
196.0	900	115.0	15.0
230.0	1050	138.0	15.0

เมื่อค่าแรงดัน rms สูงสุดที่ตกคร่อมระหว่างนิวทรอลและกราวน์เมื่อเกิดความผิดพร่องนี้แล้ว

- ค่าแรงดันผิดพร่องอยู่ในช่วงระหว่างคอลัมน์ที่ 3 และ 4 ตามระดับการฉนวนในคอลัมน์ 1 แล้ว ค่าระดับการฉนวนของอุปกรณ์นั้นสามารถหาได้จากคอลัมน์ที่ 3 ซึ่งปกติจะมีค่าเท่ากับแรงดันผิดพร่องหรือมากกว่าแรงดันผิดพร่องอยู่หนึ่งขั้น

- ค่าแรงดันผิดพร่องมีค่าน้อยกว่าคอลัมน์ที่ 4 แล้ว ค่าระดับการฉนวนของอุปกรณ์นั้นสามารถหาได้จากค่าในคอลัมน์ที่ 4
- แต่ถ้าค่าแรงดันผิดพร่องมีค่ามากกว่าคอลัมน์ที่ 3 แล้ว ค่าระดับฉนวนของอุปกรณ์นั้นสามารถหาได้จากค่าในคอลัมน์ที่ 1

4.3.7 ค่าระดับแรงดันทดสอบไดอิเล็คตริก (Dielectric Test Voltage)

ค่าระดับแรงดันทดสอบไดอิเล็คตริกนั้นเป็นไปตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าระดับแรงดันทดสอบไดอิเล็คตริก

Insulation Class	Applied Potential Test for Resistor
	kV (rms)
1.2	5
2.5	7.5
5.0	13.5
8.7	22
15.0	36
18.0	-
25.0	60
34.5	80

สำหรับการทดสอบไดอิเล็คตริกนั้นสามารถแบ่งได้เป็น

1. Impulse Tests
2. Applied-Potential Tests

โดย Impulse Tests นั้นไม่จำเป็นสำหรับอุปกรณ์ความต้านทานต่อลงดิน ส่วน Applied-Potential Tests นั้นเป็นการทดสอบการใช้ค่าแรงดันตกคร่อมระหว่าง จุดปลายของตัวต้านทานและจุดกราวน์ตามตารางที่ 4.3