

บทที่ 3

การประยุกต์ใช้งานการประสานสัมพันธ์ฉนวน

จากบทที่ 2 อธิบายถึงความหมายของกระบวนการประสานสัมพันธ์ฉนวนแต่ละขั้นตอน ดังนั้นส่วนที่กล่าวในบทนี้ จะเข้าสู่การประยุกต์ใช้งานการประสานสัมพันธ์ฉนวน โดยการประสานสัมพันธ์ฉนวนจะแบ่งประเภทตามระดับแรงดันออกเป็น 3 ส่วน คือ สำหรับระดับแรงดันในช่วงที่ 1 ระดับแรงดัน 3.6 kV ถึง 36 kV , ระดับแรงดันในช่วงที่ 1 ระดับแรงดัน 52 kV ถึง 245 kV และ สำหรับระดับแรงดันในช่วงที่ 2 ระดับแรงดัน 300 kV ถึง 800 kV ซึ่งสาเหตุที่มีการแบ่งดังนี้ เนื่องจากแต่ละส่วนมีความแตกต่างกันในรายละเอียดการคำนวณ แต่ทั้ง 3 ส่วน ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลัก คือ

1. ตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp})
2. ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw})
3. ความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw})
4. การเปลี่ยนรูปของ U_{rw}
5. การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w)

ผู้ศึกษาการประสานสัมพันธ์ฉนวน ควรศึกษาแต่ละขั้นตอนของการประสานสัมพันธ์ฉนวน ซึ่งจะทำการอธิบายในลำดับต่อไป ประกอบกับพิจารณาตัวอย่างการคำนวณการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 และแรงดันช่วงที่ 2 จากภาคผนวก ก จึงจะสามารถประยุกต์ใช้งานการประสานสัมพันธ์ฉนวนได้อย่างแท้จริง โดย ณ ที่นี้ ขอกล่าวรายละเอียดการคำนวณในแต่ละขั้นตอนดังนี้

3.1 ตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp})

3.1.1 แรงดันเกินความถี่กำลัง

แรงดันเกินต่อเนื่องความถี่กำลังมีค่าเท่ากับแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m)

$$U_{rp} = U_m \quad (3.1)$$

$$1 \text{ pu} = \sqrt{2} \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

3.1.2 แรงดันเกินชั่วคราว

แหล่งกำเนิดแรงดันเกินชั่วคราวที่เป็นไปได้ คือ ความผิดปกติของดิน (Earth Fault), การปลดโหลด (Load Reject), สภาวะเรโซแนนซ์ (Resonance) หรือ ผลรวมจากทุกแหล่งกำเนิด (Combine) โดยตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ คือ

U_{e2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับดินซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 %

U_{p2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟสซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 %

$U_{rp}(p-e)$ คือ ตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราวระหว่างเฟสกับดิน

$U_{rp}(p-p)$ คือ ตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราวระหว่างเฟสกับเฟส

การคำนวณตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราว กรณีการปลดโหลด (Load Reject),
เรโซแนนซ์ (Resonance) หรือ ผลรวมจากทุกแหล่งกำเนิด (Combine) พิจารณาจากสมการ

$$U_{rp}(p-e) = \frac{(1 pu \times U_{e2})}{\sqrt{2}} \quad (3.3)$$

$$U_{rp}(p-p) = \sqrt{3} \frac{(1 pu \times U_{p2})}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

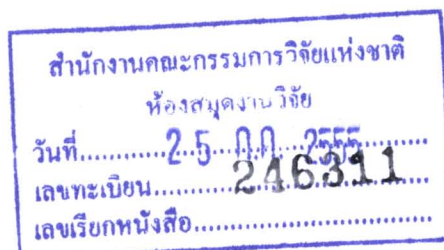
การคำนวณตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราว สำหรับกรณีความผิดปกติพร้อมลงดิน (Earth Fault)
พิจารณาจากสมการ

k คือ ตัวแปรความผิดปกติพร้อมลงดิน

$$U_{rp}(p-e) = \frac{(U_s \times k)}{\sqrt{3}} \quad (3.5)$$

เมื่อทราบค่า $U_{rp}(p-e)$ นำค่านี้ใช้ในการเลือกพิกัดแรงดันของกับดักลัทธิ (U_r) ภายใต้งีออนไซ $U_r \geq U_{rp}(p-e)$ โดยพิจารณาจากข้อมูลของผู้ผลิต อย่างไรก็ตามการเลือกค่า U_r ต้องพิจารณากระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (nominal discharge current) พิจารณาจากตารางที่ 3.1, ระดับการถ่ายเทประจุในสาย (line discharge class) พิจารณาจากตารางที่ 3.2, และระดับกระแสสวิตชิ่งอิมพัลส์ (switching impulse classifying current) พิจารณาจากตารางที่ 3.3 เมื่อเลือกค่า U_r ทำให้ทราบค่าระดับการป้องกันสวิตชิ่งอิมพัลส์ของกับดักลัทธิ (U_{ps}) นำมาใช้คำนวณสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า (slow-front overvoltage) และระดับการป้องกันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของกับดักลัทธิ (U_{pl}) นำมาใช้คำนวณสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว (fast-front overvoltage)

ตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราวที่ใช้แทนค่า เลือกจากค่าสูงสุดจากทุกแหล่งกำเนิดแรงดันเกินที่เป็นไปได้



ตารางที่ 3.1 กระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ [5]

ระดับของกักเก็บประจุ (Arrester Class)	แรงดันสูงสุดของระบบ (kV)	กระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (kA)
Station	$550\text{kV} \leq U_s < 800\text{kV}$	20
Station	$U_s < 550\text{kV}$	10
Distribution (Heavy Duty)	$U_s < 52\text{kV}$	10
Distribution (Light Duty)	$U_s < 52\text{kV}$	5

ตารางที่ 3.2 ระดับการถ่ายเทประจุในสาย [5]

ระดับการถ่ายเทประจุในสาย	แรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) kV (r.m.s)
2	≤ 300
3	$300 < U_m \leq 420$
4	$420 < U_m \leq 550$
5	$550 < U_m \leq 800$

ตารางที่ 3.3 ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ [6]

แรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) kV (r.m.s)	ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ kA (peak)
$U_m \leq 150$	0.5
$150 < U_m \leq 325$	1
$325 < U_m \leq 800$	2

3.1.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ

3.1.3.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ($3.6 \text{ kV} \leq U_m \leq 36 \text{ kV}$)

แหล่งกำเนิดแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำที่เป็นไปได้ คือ การจ่ายพลังงาน และการจ่ายพลังงานกลับอีกครั้ง (Energization and Re-Energization), การปลดโหลด (Load Reject), ความผิดปกติ และการทำให้ความผิดปกติหายไป (Fault and Fault Clearing) และ การสวิตชิงในระบบที่มีตัวเก็บประจุ (Switching Capacitive Current) คือ

U_{et} คือ ค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำระหว่างเฟสกับดิน

U_{pt} คือ ค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำระหว่างเฟสกับเฟส

$U_{rp}(p-e)$ คือ ตัวแทนแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำระหว่างเฟสกับดิน

$U_{rp}(p-p)$ คือ ตัวแทนแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำระหว่างเฟสกับเฟส

การคำนวณค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำจากการจ่ายพลังงาน และการจ่ายพลังงานกลับอีกครั้ง(Energization and Re-Energization), การปลดโหลด(Load Reject) และการสวิตชิงในระบบที่มีตัวเก็บประจุ(Switching Capacitive Current) พิจารณาได้ตามสมการ

$$U_{et} = (1.25U_{e2} - 0.25) \times (1pu) \quad (3.6)$$

$$U_{pt} = (1.25U_{e2} - 0.43) \times (1pu) \quad (3.7)$$

การคำนวณค่าสูงสุดของตัวแทนแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำจากความผิดพลาด และการทำให้ความผิดพลาดหายไป(Fault and Fault Clearing) พิจารณาได้ตามสมการ

k คือตัวแปรความผิดพลาดลงดิน

- การเริ่มเกิดความผิดพลาด

$$U_{et} = (2k - 1) \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (3.8)$$

- การทำให้ความผิดพลาดหายไป

$$U_{et} = 2U_s \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (3.9)$$

พิจารณาเลือกค่า U_{et} และ U_{pt} ค่ามากที่สุดจากทุกแหล่งกำเนิด สำหรับการประสานสัมพันธ์จำนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ($3.6 \text{ kV} \leq U_m < 52 \text{ kV}$) พิจารณาตัวแทนแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำจากสมการ

$$U_{rp}(p - e) = U_{et} \quad (3.10)$$

$$U_{rp}(p - p) = U_{pt} \quad (3.11)$$

3.1.3.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ($52 \text{ kV} \leq U_m \leq 245 \text{ kV}$)

การคำนวณแหล่งกำเนิดแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำที่เป็นไปได้ พิจารณาเช่นเดียวกับการประสานสัมพันธ์จำนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ตั้งแต่ 3.6 kV ถึง 36 kV ส่วนที่แตกต่าง คือ การพิจารณาแหล่งกำเนิดแรงดันเกิน แยกระหว่าง

- แหล่งกำเนิดแรงดันเกินที่เกิดจากสถานีไฟฟ้าระยะไกล (Remote Station) โดยพิจารณา ณ สถานีไฟฟ้าที่ทำการประสานสัมพันธ์จำนวน เพื่อการประสานสัมพันธ์จำนวนสำหรับอุปกรณ์สายส่งทางด้านเข้า (Line Entrance Equipment)

- แหล่งกำเนิดแรงดันเกิน ที่เกิด ณ สถานีไฟฟ้าที่ทำการประสานสัมพันธ์จำนวน เพื่อการประสานสัมพันธ์จำนวนสำหรับอุปกรณ์อื่นๆ (Other Equipment)

ส่วนที่แตกต่างจากการประสานสัมพันธ์จำนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ตั้งแต่ 3.6 kV ถึง 36 kV คือ หลังจากพิจารณาเลือกค่า U_{et} และ U_{pt} ค่ามากที่สุดจากทุกแหล่งกำเนิด การพิจารณาตัวแทนแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำจะพิจารณาจากสมการ

$$\begin{aligned} U_{rp}(p-e) &= U_{ps} & \text{When } U_{et} > U_{ps} \\ &= U_{et} & \text{When } U_{et} < U_{ps} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} U_{rp}(p-p) &= 2U_{ps} & \text{When } U_{et} > 2U_{ps} \\ &= U_{pt} & \text{When } U_{pt} < 2U_{ps} \end{aligned} \quad (3.13)$$

3.1.3.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 ($300 \text{ kV} \leq U_m \leq 800 \text{ kV}$)

3.1.3.2.1 การประสานสัมพันธ์จำนวนระหว่างเฟสกับดิน

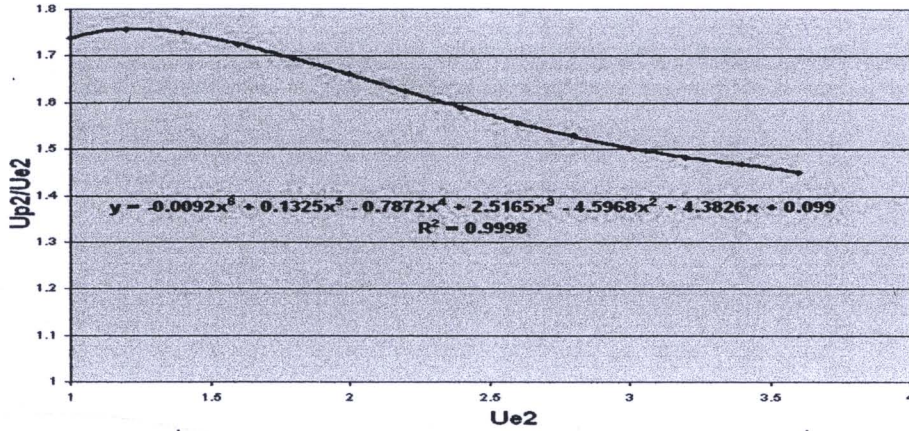
พิจารณาเช่นเดียวกับ การประสานสัมพันธ์จำนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ตั้งแต่ 52 kV ถึง 245 kV

3.1.3.2.2 การประสานสัมพันธ์จำนวนระหว่างเฟสกับเฟส

ตัวแทนแรงดันเกินของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ ระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับแรงดันช่วงที่ 2 (U_{p2-re}) การคำนวณค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำจาก การปลดโหลด (Load Reject) , การสวิตชิงในระบบที่มีตัวเก็บประจุ (Switching Capacitive Current) , ผลจากความผิดพลาด และการทำให้ความผิดพลาดหายไป พิจารณาเช่นเดียวกับการประสานสัมพันธ์จำนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ตั้งแต่ 3 kV ถึง 36 kV

การคำนวณค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำจากการจ่ายพลังงานกลับอีกครั้ง (Re-Energization) พิจารณาจากรูปที่ 3.1 เมื่อทราบค่า U_{e2} ทำให้ทราบค่า U_{p2} โดยพิจารณาจากสมการ ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{U_{p2}}{U_{e2}} &= 0.099 + (4.3826 \times U_{e2}) + (-4.5968 \times U_{e2}^2) + (2.5165 \times U_{e2}^3) \\ &\quad + (0.7872 \times U_{e2}^4) + (0.1325 \times U_{e2}^5) + (-0.0092 \times U_{e2}^6) \end{aligned} \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.1 อัตราส่วนค่า U_{e2} และ U_{p2} ของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ

จากผลของการจ่ายพลังงานกลับอีกครั้ง(Re-Energization)

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าตัวแทนแรงดันเกินของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ ระหว่างเฟสกับเฟส (U_{p2-re}) ประกอบด้วย ความสูงเหนือพื้นดิน (Ht) และระยะระหว่างเฟสกับเฟส (D)

เมื่อทราบค่าอัตราส่วน $\frac{D}{Ht}$ พิจารณารูปที่ 3.2 ทำให้ทราบค่า Incline angle (Φ) พิจารณาจากสมการ ดังนี้

$$\Phi = 33.303 + \left[87.792 \times \left(\frac{D}{Ht} \right) \right] + \left[-311.32 \times \left(\frac{D}{Ht} \right)^2 \right] + \left[294.16 \times \left(\frac{D}{Ht} \right)^3 \right] \left[-94.445 \times \left(\frac{D}{Ht} \right)^4 \right] \quad (3.15)$$

B คือ ตัวแปรอธิบายคุณลักษณะการคายประจุ(Discharge) ระหว่างเฟสกับเฟส

เมื่อทราบค่า Φ ทำให้ทราบค่า B พิจารณาจากสมการ

$$B = \tan(\Phi) \quad (3.16)$$

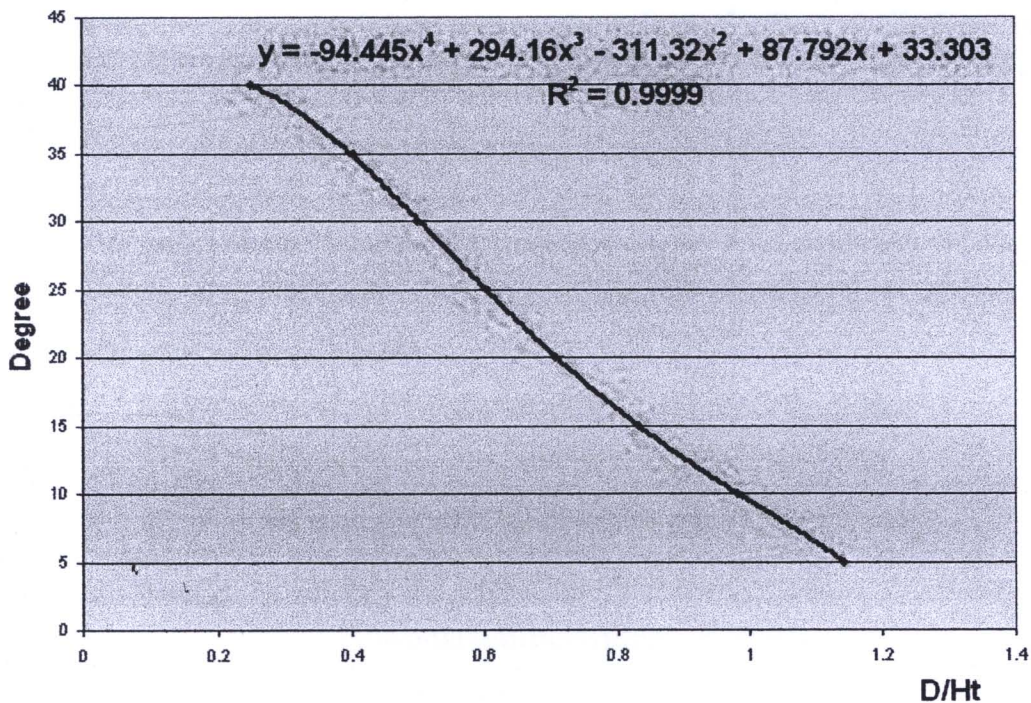
เมื่อทราบค่า B ทำให้ทราบค่า F_1 และ F_2 ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$F_1 = \frac{1}{(2 - \sqrt{2})} \left[1 - \frac{\sqrt{1 + B^2}}{1 + B} \right] \quad (3.17)$$

$$F_2 = \frac{1}{(2 - \sqrt{2})} \left[2 \times \frac{\sqrt{1 + B^2}}{1 + B} - \sqrt{2} \right] \quad (3.18)$$

เมื่อทราบค่า F_1 และ F_2 ทำให้ทราบค่า U_{p2-re} พิจารณาจากสมการ

$$U_{p2-re} = 2(F_1 U_{p2} + F_2 U_{e2}) \times (1 pu) \quad (3.19)$$



รูปที่ 3.2 Inclination angle (ϕ) สำหรับขนาดระหว่างเฟสกับเฟส ซึ่งจะขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง ระยะระหว่างเฟสกับเฟส (D) ต่อความสูงเหนือพื้นดิน (Ht)

3.1.4 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วคำนวณในขั้นตอนการหาค่าความคงทนแรงดันเกินในการประสานสัมผัสกัน (U_{cw})

3.2 ความคงทนแรงดันในการประสานสัมผัสกัน (U_{cw})

ความคงทนแรงดันในการประสานสัมผัสกันคำนวณหาโดยตัวแทนแรงดันเกิน (U_p) คูณด้วยตัวแปรในการประสานสัมผัสกัน (K_c)

3.2.1 แรงดันเกินชั่วคราว

ความคงทนแรงดันในการประสานสัมผัสกัน มีค่าเท่ากับตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราว กล่าวอีกอย่างหนึ่ง คือ ตัวแปรในการประสานกัน (K_c) เท่ากับ 1

$U_{cw}(p-e)$ คือ ความคงทนแรงดันในการประสานสัมผัสกันระหว่างเฟสกับดินสำหรับแรงดันเกินชั่วคราว

$U_{cw}(p-p)$ คือ ความคงทนแรงดันในการประสานสัมผัสกันระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับแรงดันเกินชั่วคราว

พิจารณาความคงทนแรงดันในการประสานสัมผัสพันธฉนวนสำหรับแรงดันเกินชั่วคราวจาก
สมการ

$$U_{cw}(p-e) = U_{rp}(p-e) \times K_c \quad (3.20)$$

$$U_{cw}(p-p) = U_{rp}(p-p) \times K_c \quad (3.21)$$

3.2.2 แรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ

3.2.2.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ($3.6 \text{ kV} \leq U_m \leq 36 \text{ kV}$)

ตัวแปร Deterministic co-ordination factor (K_{cd}) มีค่าคงที่ คือ 1

$U_{cw}(p-e)$ คือ ความคงทนแรงดันในการประสานสัมผัสพันธฉนวนระหว่าง
เฟสกับดินสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ

$U_{cw}(p-p)$ คือ ความคงทนแรงดันในการประสานสัมผัสพันธฉนวนระหว่าง
เฟสกับดินสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ

พิจารณาความคงทนแรงดันในการประสานสัมผัสพันธฉนวนสำหรับแรงดันเกินหน้า
คลื่นซ้ำจากสมการ

$$U_{cw}(p-e) = U_{rp}(p-e) \times K_{cd} = U_{rp}(p-e) \quad (3.22)$$

$$U_{cw}(p-p) = U_{rp}(p-p) \times K_{cd} = U_{rp}(p-p) \quad (3.23)$$

3.2.2.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ($52 \text{ kV} \leq U_m \leq 245 \text{ kV}$)

กำหนดค่า Deterministic co-ordination factor (K_{cd}) ขึ้นกับความสัมพันธ าระดับ
การป้องกันสวิตชิงอิมพัลส์ของกับดักเสริจ U_{ps} และ U_{e2} พิจารณาจากรูปที่ 3.3

พิจารณาความสัมพันธ์ U_{ps} และ U_{e2} สำหรับระหว่างเฟสกับดินจากสมการ

$$\begin{aligned} K_{cd} &= 1.1 & \text{When } \frac{U_{ps}}{U_{e2}} &\leq 0.7 \\ &= 1.1 - \frac{\left[\left(0.7 - \frac{U_{ps}}{U_{e2}} \right) \times (1.1 - 1) \right]}{(0.7 - 1.243)} & \text{When } 0.7 < \frac{U_{ps}}{U_{e2}} < 1.243 \\ &= 1 & \text{When } \frac{U_{ps}}{U_{e2}} &\geq 1.243 \end{aligned} \quad (3.24)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ U_{ps} และ U_{p2} สำหรับระหว่างเฟสกับเฟสจากสมการ

$$K_{cd} = 1.1$$

$$\text{When } \frac{2U_{ps}}{U_{p2}} \leq 0.5$$

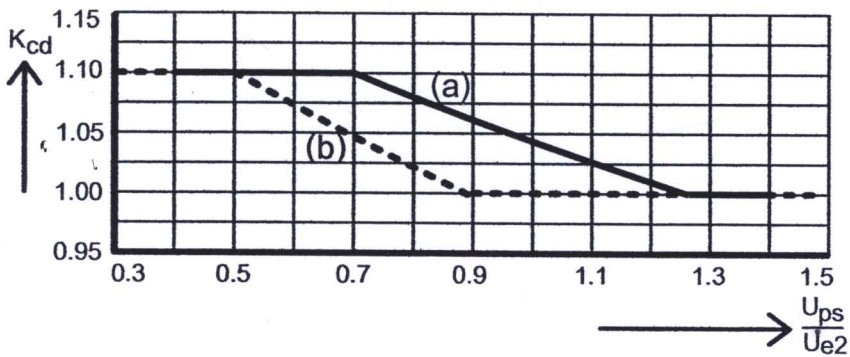
$$= 1.1 - \frac{\left[\left(0.5 - \frac{2U_{ps}}{U_{p2}} \right) \times (1.1 - 1) \right]}{(0.5 - 0.9)}$$

$$\text{When } 0.5 < \frac{2U_{ps}}{U_{p2}} < 0.9$$

$$= 1$$

$$\text{When } \frac{2U_{ps}}{U_{p2}} \geq 0.9$$

(3.25)



a) ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{cd} และ อัตราส่วนระหว่าง U_{ps} และ U_{e2}

ใช้สำหรับการประสานสัมพันธ์จนวนระหว่างเฟสกับดิน

b) ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{cd} และ อัตราส่วนระหว่าง U_{ps} และ U_{p2}

ใช้สำหรับการประสานสัมพันธ์จนวนระหว่างเฟสกับเฟส

รูปที่ 3.3 การหาค่า Deterministic co-ordination factor (K_{cd})



พิจารณาความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์จนวนสำหรับแรงดันเกินหน้า

คลื่นซ้ำจากสมการ

$$U_{cw}(p-e) = U_{rp}(p-e) \times K_{cd} \quad (3.26)$$

$$U_{cw}(p-p) = U_{rp}(p-p) \times K_{cd} \quad (3.27)$$

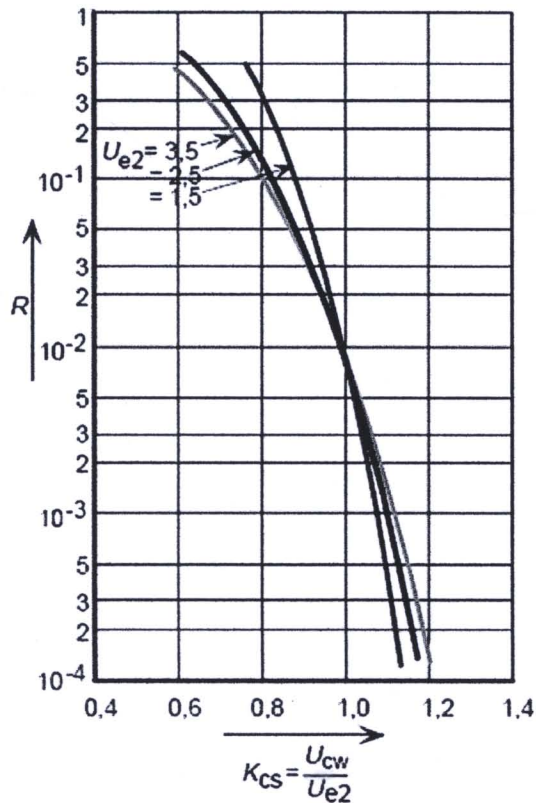
3.2.2.3 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 ($300 \text{ kV} \leq U_m \leq 800 \text{ kV}$)

3.2.2.3.1 การประสานสัมพันธ์จำนวนระหว่างเฟสกับดิน

U_{cw} สำหรับจำนวนภายใน พิจารณาเช่นเดียวกับ แรงดันช่วงที่ 1

($52 \text{ kV} \leq U_m \leq 245 \text{ kV}$)

U_{cw} สำหรับจำนวนภายนอก พิจารณาดังนี้



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของจำนวนภายนอกสำหรับแรงดันเกิน
หน้าคลื่นซ้ำ (R) เทียบกับตัวแปรในการประสานสัมพันธ์จำนวนทางสถิติ (K_{cs})

จากรูปที่ 3.4 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของตัวแปรในการประสาน
จำนวนทางสถิติ (K_{cs}) และความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของจำนวน (R) โดยค่าที่ยอมรับได้โดยทั่วไป
ของ R มาตรฐานแนะนำให้ใช้ค่า 0.0001 แต่ผู้ศึกษาสามารถเลือกค่า R ค่าอื่นๆ ได้ เพื่อพิจารณา
ถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น พิจารณาความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์จำนวนสำหรับแรงดันเกิน
หน้าคลื่นซ้ำระหว่างเฟสกับดินจากสมการ

$$U_{cw} = (U_{e2} \times 1 \text{ pu}) \times K_{cs} \quad (3.28)$$

ตารางที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของตัวแปรในการประสานฉนวนทางสถิติ K_{cs} และความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของฉนวน (R) จากรูปที่ 3.4

R	$U_{e2}(pu)$	K_{cs}
0.1	3.5	0.8
	2.5	0.82
	1.5	0.88
	$2.5 < U_{e2} < 3.5$	$0.82 - ((0.82 - 0.8) \times (1 - (3.5 - U_{e2})))$
	$1.5 < U_{e2} < 2.5$	$0.88 - ((0.88 - 0.82) \times (1 - (2.5 - U_{e2})))$
0.01	ทุกค่า	0.99
0.001	3.5	1.12
	2.5	1.1
	1.5	1.075
	$2.5 < U_{e2} < 3.5$	$1.12 - ((1.12 - 1.1) \times (1 - (3.5 - U_{e2})))$
	$1.5 < U_{e2} < 2.5$	$1.1 - ((1.1 - 1.075) \times (1 - (2.5 - U_{e2})))$
0.0001	3.5	1.21
	2.5	1.18
	1.5	1.14
	$2.5 < U_{e2} < 3.5$	$1.21 - ((1.21 - 1.18) \times (1 - (3.5 - U_{e2})))$
	$1.5 < U_{e2} < 2.5$	$1.18 - ((1.18 - 1.14) \times (1 - (2.5 - U_{e2})))$

3.2.2.3.2 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

เมื่อทราบค่า K_{cs} จากการประสานสัมพันธ์ฉนวน ระหว่างเฟสกับดิน สามารถคำนวณความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ ระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับแรงดันช่วงที่ $2(U_{p-cw})$ ได้จากสมการ

$$U_{p-cw} = K_{cs} U_{p2-re}$$

(3.29)

3.2.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

3.2.3.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ($3.6 \text{ kV} \leq U_m \leq 245 \text{ kV}$)

ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ คือ

L_a คือ ผลลัพธ์ของสายเหนือศีรษะต่ออัตราการขัดข้องที่ยอมรับได้ (m)

R_a คือ อัตราการล้มเหลวที่ยอมรับได้ของอุปกรณ์ เมื่อพิจารณาสำหรับสายส่ง

ตัวแปรเขียนในรูป (1/years)

R_{km} คือ อัตราการขัดข้องของสายส่งเหนือศีรษะต่อปี สำหรับการออกแบบต่อหนึ่ง

กิโลเมตรแรก ในส่วนหน้าของสถานีไฟฟ้า โดยตัวแปรเขียนในรูป (1/km/year)

L คือ ระยะห่างระหว่างกับดักลีสร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน (m)

n คือ จำนวนของสายส่งเหนือศีรษะต่อไปยังสถานีไฟฟ้า ในการหาค่าขนาดลีสร์จที่มาปะทะ

L_{sp} คือ ความยาวช่วง (m)

การคำนวณความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์จำนวนสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วพิจารณาจากสมการ

$$L_a = \frac{R_a}{R_{km}} \quad (3.30)$$

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} \frac{L}{L_{sp} + L_a} \quad (3.31)$$

ระยะห่างระหว่างกับดักลีสร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน (L) พิจารณาแยกกันระหว่างจำนวนภายใน และจำนวนภายนอก

ตัวแปร A ขึ้นกับคุณลักษณะของสายส่ง พิจารณาตามตารางที่ 3.5 เช่น สายในระบบจำหน่าย หรือสายในระบบส่ง

ตารางที่ 3.5 ตัวแปร A เปลี่ยนแปลงตามชนิดของสายส่ง [1]

ชนิดของสายส่ง	A (kV)
สายในระบบจำหน่าย (การวางไฟตามผิวระหว่างเฟสกับเฟส):	
- คอนสายระหว่างเฟสกับดิน (การวางไฟตามผิวไปยังดินที่ด้านแรงดันต่ำ)	900
- สายที่มีข้อต่อเป็นไม้ (การวางไฟตามผิวไปยังดินที่ด้านแรงดันสูง)	2700
สายส่ง (การวางไฟตามผิวระหว่างเฟสกับดินดิน)	
- ตัวนำเส้นเดียว	4500
- ตัวนำสองเส้นตีเกลียว	7000
- ตัวนำสี่เส้นตีเกลียว	11000
- ตัวนำสี่เส้น และหกเส้น ตีเกลียว	17000

3.2.3.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 ($300\text{ kV} \leq U_m \leq 800\text{ kV}$)

การพิจารณา U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วพิจารณาเฉพาะการประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดิน โดยพิจารณาดังนี้

U_{cw} สำหรับฉนวนภายในพิจารณาเช่นเดียวกับแรงดันช่วงที่ ($1\text{ kV} \leq U_m \leq 245\text{ kV}$)

U_{cw} สำหรับฉนวนภายนอก มาตรฐานแนะนำว่า การหาค่าความคงทนแรงดันในการประสานฉนวน สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว นั้นไม่จำเป็น

3.3 ความคงทนแรงดันเกินที่ต้องการ (U_m)

3.3.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ($1\text{ kV} \leq U_m \leq 245\text{ kV}$)

ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ คือ

K_s คือ ตัวแปรความปลอดภัย

K_a คือ ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ

m คือ ตัวแปรยกกำลังใช้เพื่อคำนวณ K_a สำหรับฉนวนภายนอก

H คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล

3.3.1.1 ตัวแปรความปลอดภัย (K_s)

สำหรับฉนวนภายในมีค่าคงที่ คือ $K_s = 1.15$

สำหรับฉนวนภายนอกมีค่าคงที่ คือ $K_s = 1.05$



3.3.3.2 ตัวแปรชุดเซสสภาพรรยากาศ(K_a)

ตัวแปรชุดเซสสภาพรรยากาศ (K_a) ใช้งานสำหรับคำนวณภายนอกเท่านั้นโดยพิจารณาจากสมการ

$$K_a = e^{\frac{mH}{8150}} \quad (3.32)$$

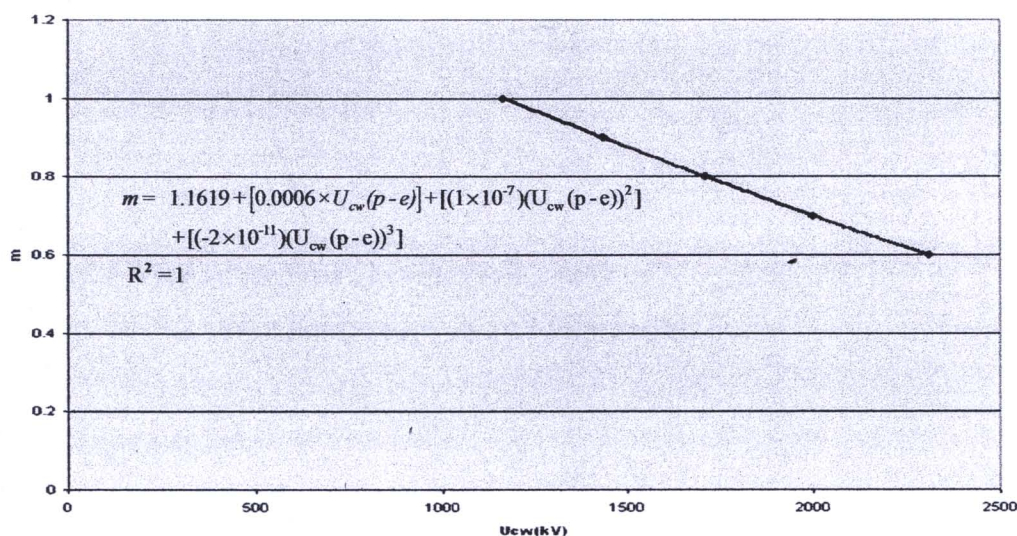
สำหรับแรงดันเกินชั่วคราว m พิจารณาจากระดับมลภาวะของฉนวน ถ้าฉนวนมีสภาพสะอาด ใช้ค่า $m = 1$ ถ้าฉนวนมีสภาพสกปรก ใช้ค่า $m = 0.5$

สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นชั่วคราวระหว่างเฟสกับดิน m พิจารณาจากรูปที่ 3.5 โดยตัวแปร m ขึ้นกับ $U_{cw}(p-e)$ พิจารณาจากสมการ

$$\begin{aligned} m &= 1 & \text{when } U_{cw}(p-e) \geq 309.091kV \\ &= 1.1619 + [0.0006 \times U_{cw}(p-e)] + [(1 \times 10^{-7})(U_{cw}(p-e))^2] \\ &\quad + [(-2 \times 10^{-11})(U_{cw}(p-e))^3] & \text{when } U_{cw}(p-e) \geq 309.091kV \end{aligned} \quad (3.33)$$

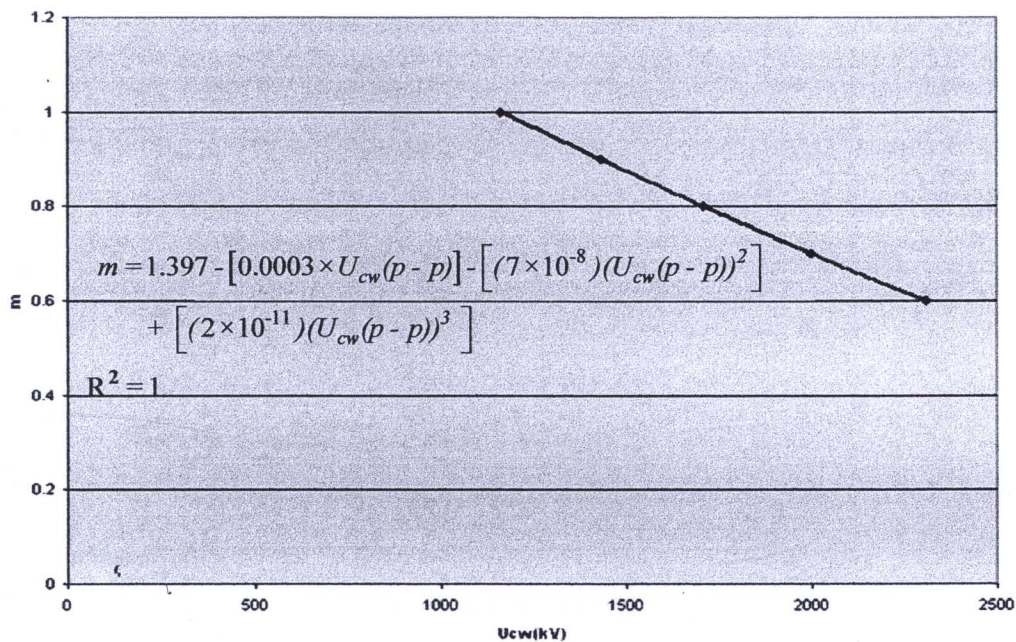
สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นชั่วคราวระหว่างเฟสกับเฟส m พิจารณาจากรูปที่ 3.6 โดยตัวแปร m ขึ้นกับ $U_{cw}(p-p)$ พิจารณาจากสมการ

$$\begin{aligned} m &= 1 & \text{when } U_{cw}(p-p) < 1163.636kV \\ &= 1.397 - [0.0003 \times U_{cw}(p-p)] - [(7 \times 10^{-8})(U_{cw}(p-p))^2] \\ &\quad + [(2 \times 10^{-11})(U_{cw}(p-p))^3] & \text{when } U_{cw}(p-p) \geq 1163.636kV \end{aligned} \quad (3.34)$$



รูปที่ 3.5 เลขยกกำลังของตัวแปรชุดเซสสภาพรรยากาศสำหรับฉนวนภายนอก

m ขึ้นกับค่า $U_{cw}(p-e)$



รูปที่ 3.6 เลขยกกำลังของตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ สำหรับจนวนภายนอก m ขึ้นกับค่า $U_{cw}(p-p)$

3.3.3.3 ความคงทนแรงดันเกินที่ต้องการ (U_{rw}) สำหรับจนวนภายใน
พิจารณาจากสมการ

$$U_{rw} = K_s \times U_{cw} = 1.15 \times U_{cw} \quad (3.35)$$

3.3.3.4 ความคงทนแรงดันเกินที่ต้องการ (U_{rw}) สำหรับจนวนภายนอก
พิจารณาจากสมการ

$$U_{rw} = K_s \times K_a \times U_{cw} = 1.05 \times K_a \times U_{cw} \quad (3.36)$$

3.3.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 ($300 \text{ kV} \leq U_m \leq 800 \text{ kV}$)

3.3.2.1 การประสานสัมพันธ์จนวนระหว่างเฟสกับดิน

พิจารณาเช่นเดียวกับการประสานสัมพันธ์จนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1

$$(3.6 \text{ kV} \leq U_m \leq 245 \text{ kV})$$

3.3.2.1 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

ความคงทนแรงดันที่ต้องการของแรงดันเกินหน้าคลื่นชั่วคราวระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับแรงดันช่วงที่ 2 (U_{p-rw}) พิจารณาตัวแปรความปลอดภัย (K_s) สำหรับฉนวนภายนอกมีค่าคงที่ คือ $K_s=1.05$ พิจารณาตัวแปรชดเชย สภาพบรรยากาศ (K_a) เช่นเดียวกับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ตั้งแต่ 52 kV ถึง 245 kV พิจารณาความคงทนแรงดันที่ต้องการของแรงดันเกินหน้าคลื่นชั่วคราวระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับแรงดันช่วงที่ 2 (U_{p-rw}) จากสมการ

$$U_{p-rw} = K_a K_s U_{p2-cw} \quad (3.37)$$

พิจารณาแรงดันที่ใช้ในการทดสอบจากสมการ

$$Test Value = \pm \frac{U_{p-rw}}{2} \quad (3.38)$$

3.4 การเปลี่ยนรูปของ U_{rw}

3.4.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ($3.6 \text{ kV} \leq U_m \leq 245 \text{ kV}$)

ความคงทนแรงดันที่ต้องการหน้าคลื่นชั่วคราว (U_{rw}) จะเปลี่ยนรูปไปยังความคงทนแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น SDW (Short-duration power frequency withstand voltage) และความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า LIW (Lightning impulse withstand voltage) โดยใช้ตัวแปรสำหรับเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) คูณกับความคงทนแรงดันที่ต้องการหน้าคลื่นชั่วคราว (U_{rw})

ตัวแปรสำหรับเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) พิจารณาจากตารางที่ 2.4 สำหรับแรงดันช่วงที่ 1 โดยพิจารณาแยกระหว่างฉนวนภายใน และฉนวนภายนอก

3.4.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 ($300 \text{ kV} \leq U_m \leq 800 \text{ kV}$)

ความคงทนแรงดันชั่วคราวที่ต้องการ (U_{rw}) จะถูกเปลี่ยนรูปไปยัง ความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (SIW) พิจารณาจากตารางที่ 2.5

3.5 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w)

3.5.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ($3.6 \text{ kV} \leq U_m \leq 36 \text{ kV}$)

ขั้นตอนการเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน จะกำหนดให้ $U_{rw(s)}$ คือ ความคงทนแรงดันที่ต้องการ และตัวแปร $U_{rw(c)}$ คือ ผลจากการเปลี่ยนรูป (ผลจากการเปลี่ยนรูปไปยัง SDW และ LIW ตามลำดับ พิจารณาแยกระหว่างฉนวนภายนอก และฉนวนภายใน)

การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน สำหรับฉนวนภายใน และฉนวนภายนอก โดยพิจารณาเลือกค่ามากที่สุดระหว่าง $U_{rw(s)}$ และ $U_{rw(c)}$ จากนั้นนำค่าที่มากที่สุดมาเปิดตารางที่ 2.2 ที่ระดับแรงดันที่พิจารณา เพื่อเลือกค่ามาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (SDW) และมาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (BIL)

พิจารณาระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟสของฉนวนภายนอก (minimum air clearance) จากตารางที่ 3.6 เมื่อทราบค่ามาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (BIL) ของฉนวนภายนอก

ตารางที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างอากาศ (minimum air clearance) [1]

Standard lightning impulse withstand voltage (kV)	Minimum clearance (mm)	
	Rod-structure	Conductor-structure
20	0.06	
40	0.06	
60	0.09	
75	0.12	
95	0.16	
125	0.22	
145	0.27	
170	0.32	
250	0.48	
325	0.63	
450	0.90	
550	1.10	
650	1.30	
750	1.50	
850	1.70	1.6
950	1.90	1.7
1050	2.10	1.9
1175	2.35	2.2
1300	2.60	2.4
1425	2.85	2.6
NOTE – The standard lightning impulse is applicable phase-to-phase and phase-to-earth. For phase-to-earth, the minimum clearance for conductor-structure and rodstructure is applicable. For phase-to-phase, the minimum clearance for rod-structure is applicable.		

ตารางที่ 3.6 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างอากาศ(minimum air clearance) [1]

Standard lightning impulse withstand voltage (kV)	Minimum clearance (mm)	
	Rod-structure	Conductor-structure
1550	3.10	2.9
1675	3.35	3.1
1800	3.60	3.3
1950	3.90	3.6
2100	4.20	3.9

NOTE – The standard lightning impulse is applicable phase-to-phase and phase-to-earth.

For phase-to-earth, the minimum clearance for conductor-structure and rodstructure is applicable.

For phase-to-phase, the minimum clearance for rod-structure is applicable.

3.5.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ($52\text{ kV} \leq U_m \leq 245\text{ kV}$)

พิจารณาเช่นเดียวกับ การประสานสัมพันธ์จนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ตั้งแต่ 3.6 kV ถึง 36 kV แตกต่างกันเฉพาะการพิจารณาระยะห่างสำหรับระหว่างเฟสกับเฟสของจนวนภายนอก (minimum air clearance) จะพิจารณาแยกระหว่างอุปกรณ์สายส่งทางด้านเข้า (Line Entrance Equipment) และอุปกรณ์อื่นๆ (Other Equipment) โดยความแตกต่างดังกล่าวจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อศึกษาตัวอย่างการคำนวณสำหรับการประสานสัมพันธ์จนวนในภาคผนวก ก

3.5.3 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 ($300\text{ kV} \leq U_m \leq 800\text{ kV}$)

การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน พิจารณาเลือกจากความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw}) โดยพิจารณาจากตารางที่ 2.3 โดยเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันมากกว่าหรือเท่ากับ ความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw}) โดยพิจารณาแยกระหว่างจนวนภายนอก และจนวนภายใน

3.5.1.1 ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับดิน (Phase-to-earth clearances)

เมื่อทราบค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ลวิตซิงฟ้าผ่า (kV) หลังจากนั้น พิจารณาค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างเฟสกับดิน จากตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างอากาศระหว่างเฟสกับดิน [1]

Standard switching impulse withstand voltage (kv)	Minimum phase-to-earth (m)	
	Conductor-structure	Rod-structure
750	1.6	1.9
850	1.8	2.4
950	2.2	2.9
1050	2.6	3.4
1175	3.1	4.1
1300	3.6	4.8
1425	4.2	5.6
1550	4.9	6.4

K คือ ตัวแปรแสดงคุณลักษณะของช่องว่าง (Gap Factor) โดยพิจารณาความคงทน (Strength) ของช่องว่าง (Gap)

K_{ff}^+ คือ ตัวแปรแสดงคุณลักษณะของช่องว่าง (Gap Factor) สำหรับอิมพัลส์หน้าคลื่นเร็วชั่วคราว

U_{50RP} คือ ค่า 50% ของ Discharge Voltage ของ Rod-plane gap

z คือ normalized value of conventional deviation Z refer to U_{50}

พิจารณา Conductor-structure มี K คือ 1.35 และมีระยะห่างน้อยที่สุด (d)

$$K_{ff}^+ = 0.74 + (0.26 \times K) \tag{3.39}$$

พิจารณา Rod-structure มี K น้อยกว่า 1.15 และมีระยะห่างน้อยที่สุด (d)

และพิจารณาค่า K_{ff}^+ จากสมการที่ 3.39

พิจารณาเลือกค่า K_{ff}^+ ที่มีค่าน้อยที่สุดจาก Conductor-Structure หรือ Rod-Structure และพิจารณาเลือกค่า d ที่มีค่าน้อยที่สุดจาก Conductor-Structure หรือ Rod-Structure เพื่อใช้ในการคำนวณ U_{50RP} จากสมการ

$$U_{50RP} = K_{ff}^+ 530d \tag{3.40}$$

Conventional deviation มีค่าประมาณ 3% ของ U_{50} สำหรับอิมพัลส์ชั่วคราว นั้น คือ z มีค่า 0.03 เพื่อดำเนินการคำนวณค่าความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของระบบ จากสมการ

$$LIW = U_{50RP}(1 - 1.3z) \quad (3.41)$$

โดยค่า LIW ที่ได้จากการคำนวณ มีจุดมุ่งหมายเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน) จากขั้นตอนการเลือกความคงทนแรงดัน U_w ถ้า LIW ที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงตามมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่ได้รับการป้องกัน) ถือเป็นกรณีที่ดี แต่ถ้ามีค่าต่ำกว่า เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบ

3.5.1.2 ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟส (Phase-to-phase clearances)

U^+ คือ แรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

U^- คือ แรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

U_0^+ คือ ค่าสมมูลของส่วนประกอบระหว่างเฟสกับดินที่ใช้แทนค่าวิกฤตที่สุด

ระหว่างแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟส (equivalent positive phase-to-earth component use to represent the most critical phase to phase overvoltage)

U_{50} คือ ค่า 50% ของแรงดันถ่ายเทประจุ (Discharge Voltage) ของฉนวนที่สามารถฟื้นคืนสภาพได้

จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ทราบค่า U_{p-rw} และทราบค่าแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบเป็นครั้งหนึ่งของ U_{p-rw} คือ $U^+ = U^- = U_{p-rw}/2$ และทราบค่า B จากขั้นตอนการประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส จากนั้นคำนวณค่า U_0^+ จากสมการ

$$U_0^+ = U^+(1 + B) \quad (3.42)$$

คำนวณค่า U_{50} จากสมการ

$$U_{50} = \frac{U_0^+}{0.922} \quad (3.43)$$

คำนวณค่าระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟส (Phase-to-Phase clearance) สำหรับตัวนำวางขนานกัน (Parallel conductor configuration) มีค่า K คือ 1.62 จากสมการ

$$d = \frac{U_{50}}{e^{K \times 1080} - 1} \quad (3.44)$$

คำนวณค่าระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟส (Phase-to-Phase clearance) สำหรับปลายแหลมกับตัวนำ (Rod-conductor configuration) มีค่า K คือ 1.45 จากสมการ 3.44

เมื่อทราบค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ระหว่างเฟสกับดิน (U_w) พิจารณาตารางที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง และค่าระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟส (Phase - to - Phase clearance) สำหรับตัวนำวางขนานกัน (Parallel conductor configuration) และ ปลายแหลมกับตัวนำ (Rod-conductor configuration)

ถ้าค่าระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟส(Phase-to-Phase clearance) ที่ได้จากการคำนวณ มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากตารางที่ 3.8 มาตรฐานแนะนำให้ทำการทดสอบแบบพิเศษ (Special Test)

ตารางที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างอากาศระหว่างเฟสกับเฟส [1]

Standard switching impulse withstand voltage (SIW)			Minimum phase-to-phase clearance (m)	
Phase-to-earth (kV)	Phase-to-phase value	Phase-to-phase (kV)	Conductor- conductor parallel	Rod-conductor
	Phase-to-earth value			
750	1.5	1125	2.3	2.6
850	1.5	1275	2.6	3.1
850	1.6	1360	2.9	3.4
950	1.5	1425	3.1	3.6
950	1.7	1615	3.7	4.3
1050	1.5	1575	3.6	4.2
1050	1.6	1680	3.9	4.6
1175	1.5	1760	4.2	5.0
1300	1.7	2210	6.1	7.4
1425	1.7	2423	7.2	9.0
1550	1.6	2480	7.6	9.4