รายการอ้างอิง

ภาษาอังกฤษ

[1] IEC 60071-2: Insulation co-ordination, Part 2: Application guide, 3th ed., 1996.

[2] IEC 60071-1: Insulation co-ordination, Part 1: Definition, principles and rules , 8th ed., 2006.

[3] IEC 60091-1: Surge arresters, Part 1: Nonlinear resistor gapped surge arresters for a.c. system, 3.1rd ed., 1999.

[4] IEC 60091-4: Surge arresters, Part 4: Metal-oxide arresters without gaps for a.c. system, 2nd ed., 2004.

[5] IEC 60091-5: Surge arresters, Part 5: Selection and application recommendations, 2nd ed., 2000.

[6] Hileman, A. R. Insulation Coordination for Power Systems. New York: Marcel Dekker, Inc., p.512, 1999.

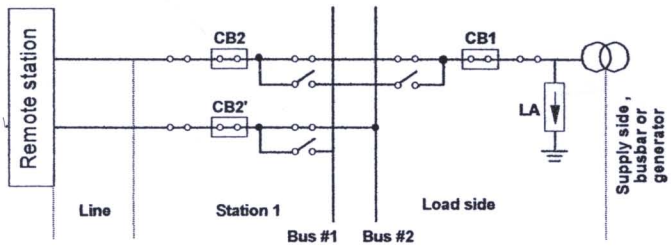
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณการประสานสัมพันธ์ฉนวน

ก.1 การประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1 ($3.6\ \text{kV} \le U_s \le 245\ \text{kV}$)

ก.1.1 ข้อมูลเบื้องต้น

พิจารณาสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่ายมีแรงดันระบุของระบบ คือ 22 kV จากตารางที่ 2.2 เลือกแรงดันสูงสุดของระบบ (U_s) มากว่าหรือเท่ากับแรงดันระบุของระบบ ตัวอย่างนี้ คือ 24 kV



รูปที่ ก.1 วงจรที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวน ในระดับแรงดันช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2

จากรูปที่ ก.1 แสดงวงจรที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวน ในระดับแรงดันช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย CBX คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์, Bx คือ บัสบาร์ และ LA คือ กับดักเสิร์จ

ก.1.2 ตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp})

ก.1.2.1 แรงดันเกินความถี่กำลัง

แรงดันสูงสุดของระบบ (U_s) คือ 24 kV

คำนวณค่า pu จากสมการที่ 3.2

$$1\ pu = \sqrt{2}\frac{U_m}{\sqrt{3}} = \sqrt{2}\frac{24\text{kV}}{\sqrt{3}} = 19.6\text{kV}$$

ก.1.2.2 แรงดันเกินชั่วคราว

พิจารณาผลจากการปลดโหลด (Load Reject) มีค่า 1.15 pu

คำนวณ $U_{rp}(p\text{-}e)$ จากสมการที่ 3.3

$$U_{rp}(p\text{-}e) = \frac{(1\ pu \times U_{e2})}{\sqrt{2}} = \frac{(19.6\text{kV} \times 1.15)}{\sqrt{2}} = 15.94\text{kV}$$

คำนวณ $U_{rp}(p-p)$ จากสมการที่ 3.4

$$U_{rp}(p-p)=\sqrt{3}\frac{(1\,pu\times U_{p2})}{\sqrt{2}}=\sqrt{3}\frac{(19.6\text{kV}\times 1.15)}{\sqrt{2}}=27.61\text{kV}$$

พิจารณาผลจากความผิดพร่องลงดิน (Earth Fault) โดยแรงดันเกินชั่วคราวจากความผิดพร่องลงดิน จะมีขนาดพิจารณาจากด้วยตัวแปรความผิดพร่องลงดิน (k) ตัวอย่างนี้กำหนดค่า k มีค่า 1.732 คำนวณ $U_{rp}(p-e)$ จากความผิดพร่องลงดินจากสมการที่ 3.5

$$U_{rp}(p-e)=\frac{(U_s\times k)}{\sqrt{3}}=\frac{(24\text{kV}\times 1.732)}{\sqrt{3}}=24\text{kV}$$

ตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราว พิจารณาจากค่าสูงสุดของทุกแหล่งกำเนิดแรงดันเกินที่เป็นไปได้ ในกรุณีนี้ คือ

- $U_{rp}(p-e)=24\text{kV}$
- $U_{rp}(p-p)=27.61\text{kV}$

ก.1.2.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

พิจารณาผลจากการจ่ายพลังงาน หรือการจ่ายพลังงานกลับอีกครั้ง (Energization and Re-Energization)

- ระหว่างเฟสกับดิน สมมุติเกิด $U_{e2}=2.6pu$ คำนวณ U_{et} จากสมการที่ 3.6

$$U_{rp}(p-e)=U_{et}=(1.25U_{e2}-0.25)\times(1\text{pu})$$

$$U_{rp}(p-e)=U_{et}=(1.25\times 2.6-0.25)\times(19.6\text{kV})=58.8\text{kV}$$

- ระหว่างเฟสกับเฟส สมมุติเกิด $U_{p2}=3.86pu$ คำนวณ U_{pt} จากสมการที่ 3.7

$$U_{rp}(p-p)=U_{pt}=(1.25U_{e2}-0.43)\times(1\text{pu})$$

$$U_{rp}(p-p)=U_{pt}=(1.25\times 3.86-0.43)\times(19.6\text{kV})=86.14\text{kV}$$

การเลือกใช้กับดักเสิร์จ ตัวอย่างนี้เลือกใช้ผลิตภัณฑ์ ABB ชนิด Silicon Housed Arrester รุ่น PEXLIM-R

พิจารณาเลือกกระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (I_n) โดยพิจารณาจากตารางที่ 3.1 ตัวอย่างนี้เลือก Distribution ($U_s<52\text{kV}$) (Light duty) ได้ค่ากระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (I_n) มีค่า 5 kA

พิจารณาระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ (Switching Impulse Classify Current) ซึ่งจะขึ้นกับแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) ที่พิจารณา โดยพิจารณาจากตารางที่ 3.3 จากตัวอย่างนี้ ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์(Switching Impulse Classify Current) มีค่า 0.5 kA

พิจารณาระดับการถ่ายเทประจุในสาย (Line Discharge Class) โดยเลือกค่าจากตารางที่ 3.2 ซึ่งจะขึ้นกับแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) จากตัวอย่างนี้ระดับการถ่ายเทประจุในสาย มีค่า 2

เลือกแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) สำหรับกับดักเสิร์จ คือ $U_m = 245\text{kV}$

พิจารณาเลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จ $U_r \geq TOV(p-e)$ จากตัวอย่างนี้เลือกค่า $U_r = 27\text{kV}$

ระดับการป้องกันอิมพัลส์ฟ้าผ่า $U_{pl} = 66\text{kV}$

ก.1.2.4 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

พิจารณาหาค่าในขั้นตอนของ ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw})

ก.1.3 แรงดันเกินที่ใช้ในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw})

ก.1.3.1 แรงดันเกินชั่วคราว

ตัวแปรสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวน (K_c) มีค่าคงที่ คือ 1

คำนวณค่า $U_{cw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.20

$$U_{cw}(p-e) = U_{rp}(p-e) \times K_c = 24\text{kV} \times 1 = 24\text{kV}$$

คำนวณค่า $U_{cw}(p-p)$ จากสมการที่ 3.21

$$U_{cw}(p-p) = U_{rp}(p-p) \times K_c = 27.61kV \times 1 = 27.61kV$$

ก.1.3.2 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

Deterministic co-ordination factor (K_{cd}) มีค่าคงที่ คือ 1 สำหรับระบบจำหน่าย ตั้งแต่ 3.6 kV ถึง 36 kV

คำนวณค่า $U_{cw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.22

$$U_{cw}(p-e) = U_{rp}(p-e) \times K_{cd} = 58.8\text{kV} \times 1 = 58.8\text{kV}$$

คำนวณค่า $U_{cw}(p-p)$ จากสมการที่ 3.23

$$U_{cw}(p-p) = U_{rp}(p-p) \times K_{cd} = 86.14\text{kV} \times 1 = 86.14\text{kV}$$

ก.1.3.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

สมมุติในการคำนวณ คือ

- ระยะห่างระหว่างกับดักเสิร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน สำหรับฉนวนภายใน L=3 m

-ระยะห่างระหว่างกับดักเสิร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน สำหรับฉนวนภายนอก L=5 m

- สายส่งที่มีขั้วต่อเป็นไม้ (wood-pole lines) จำนวนสายส่งที่พิจารณา n=4

- ตัวแปร A พิจารณาจากตารางที่ 2.6 ตัวแปร A = 2700

- อัตราการขัดข้องของสายส่งเหนือศีรษะ R_{km} = 6/100 km/year

- ความยาวช่วง L_{sp} = 100 m

- อัตราการล้มเหลวที่ยอมรับได้ของอุปกรณ์ R_a = 1/400 years

คำนวณ L_a จากสมการที่ 3.30

$$L_a = \frac{R_a}{R_{km}} = \frac{(1/400\text{year})}{(6/100\text{km.year})} = 0.04167\text{km} \approx 42\text{m}$$

คำนวณค่า U_{cw} สำหรับฉนวนภายใน จากสมการที่ 3.31

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n}\frac{L}{L_{sp}+L_a} = 66 + \frac{2700}{4} \times \frac{3}{100 + (0.042 \times 1000)} = 80.26\text{kV}$$

คำนวณค่า U_{cw} สำหรับฉนวนภายนอก จากสมการที่ 3.31

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n}\frac{L}{L_{sp}+L_a} = 66 + \frac{2700}{4} \times \frac{5}{100 + (0.042 \times 1000)} = 89.77\text{kV}$$

ก.1.4 ความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw})

ก.1.4.1 ตัวแปรความปลอดภัย (K_s)

สำหรับฉนวนภายในมีค่าคงที่ คือ $K_s = 1.15$

สำหรับฉนวนภายนอกมีค่าคงที่ คือ $K_s = 1.05$

ก.1.4.2 ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ (K_a)

ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ (K_a) ใช้งานสำหรับฉนวนภายนอกเท่านั้น

- สำหรับแรงดันเกินชั่วคราว m พิจารณาจากระดับมลภาวะของฉนวน ถ้าฉนวนมีสภาพสะอาด ใช้ค่า m = 1 ถ้าฉนวนมีสภาพสกปรก ใช้ค่า m = 0.5 ตัวอย่างนี้สมมุติ ฉนวนมีสภาพสะอาด ใช้ค่า m = 1 คำนวณค่า K_a จากสมการที่ 3.32

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} = e^{1\times\left(\frac{1000}{8150}\right)} = 1.131$$

- แรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับดิน จากรูปที่ 3.5 ตัวแปร m ขึ้นกับค่า U_{cw} (p-e) คำนวณค่าตัวแปร m จากสมการที่ 3.33

$$m = 1 \qquad \text{when } U_{cw}(p-e) \geq 309.091kV$$

$$= 1.1619 + [0.0006 \times U_{cw}(p-e)] + [(1\times10^{-7})(U_{cw}(\text{p-e}))^2]$$

$$+[(-2\times10^{-11})(U_{cw}(\text{p-e}))^3] \qquad \text{when } U_{cw}(p-e) \geq 309.091kV$$

จากตัวอย่างนี้ $U_{cw}(p-e)$ =58.8 kV ดังนั้น m = 1 จากนั้นคำนวณค่า K_a จาก สมการที่ 3.32

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} = e^{1\times\left(\frac{1000}{8150}\right)} = 1.131$$

- แรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับเฟส จากรูปที่ 3.6 ตัวแปร m ขึ้นกับ $U_{cw}(p-p)$ คำนวณค่าตัวแปร m จากสมการที่ 3.34

$$m = 1 \qquad when\ U_{cw}(p-p) < 1163.636kV$$

$$= 1.397 - \left[0.0003 \times U_{cw}(p-p)\right] - \left[(7\times10^{-8})(U_{cw}(p-p))^2\right]$$

$$+ \left[(2\times10^{-11})(U_{cw}(p-p))^3\right] \qquad when\ U_{cw}(p-e) \geq 1163.636kV$$

จากตัวอย่างนี้ $U_{cw}(p-p)$ =86.14 kV ดังนั้น m =1 จากนั้นคำนวณค่า K_a จาก สมการที่ 3.32

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} = e^{1\times\left(\frac{1000}{8150}\right)} = 1.131$$

- สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว m มีค่าคงที่ คือ m =1 จากนั้นคำนวณค่า K_a จากสมการที่ 3.32

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} = e^{1\times\left(\frac{1000}{8150}\right)} = 1.131$$

ก.1.4.3 แรงดันเกินชั่วคราว

คำนวณค่า U_{rw} สำหรับฉนวนภายใน จากสมการ ที่ 3.35

$$U_{rw}(p-e) = K_s \times U_{cw} = 1.15 \times 24\text{kV} = 27.6\text{kV}$$
$$U_{rw}(p-p) = K_s \times U_{cw} = 1.15 \times 27.61\text{kV} = 31.75\text{kV}$$

คำนวณค่า U_{rw} สำหรับฉนวนภายนอก จากสมการ ที่ 3.36

$$U_{rw} = K_s \times K_a \times U_{cw} = 24\text{kV} \times 1.131 \times 1.05 = 28.50\text{kV}$$
$$U_{rw} = K_s \times K_a \times U_{cw} = 27.61\text{kV} \times 1.131 \times 1.05 = 33.79\text{kV}$$

ก.1.4.4 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

คำนวณค่า U_{rw} สำหรับฉนวนภายใน จากสมการ ที่ 3.35

$$U_{rw}(p-e) = K_s \times U_{cw} = 1.15 \times 58.8\text{kV} = 67.62\text{kV}$$
$$U_{rw}(p-p) = K_s \times U_{cw} = 1.15 \times 86.14\text{kV} = 99.06\text{kV}$$

คำนวณค่า U_{rw} สำหรับฉนวนภายนอก จากสมการ ที่ 3.36

$$U_{rw} = K_s \times K_a \times U_{cw} = 58.8\text{kV} \times 1.131 \times 1.05 = 69.83\text{kV}$$
$$U_{rw} = K_s \times K_a \times U_{cw} = 86.14\text{kV} \times 1.131 \times 1.05 = 102.3\text{kV}$$

ก.1.4.5 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

คำนวณค่า U_{rw} สำหรับฉนวนภายใน จากสมการ ที่ 3.36

$$U_{rw}(p-e) = U_{rw}(p-p) = K_s \times U_{cw} = 1.15 \times 80.26\text{kV} = 92.3\text{kV}$$

คำนวณค่า U_{rw} สำหรับฉนวนภายนอก จากสมการ ที่ 3.36

$$U_{rw}(p-e) = U_{rw}(p-p) = K_s \times K_a \times U_{cw} = 1.05 \times 1.131 \times 89.77\text{kV} = 106.61\text{kV}$$

ก.1.5 การเปลี่ยนรูปของ U_{rw}

ความคงทนแรงดันที่ต้องการหน้าคลื่นช้า (U_{rw}) จะเปลี่ยนรูปไปยังความคงทนแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (SDW) และ ความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW) โดยใช้ตัวแปรสำหรับเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion factor) คูณกับความคงทนแรงดันที่ต้องการหน้าคลื่นช้า(U_{rw})

ก.1.5.1 *SDW*

ตัวแปรสำหรับเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion factor) สำหรับระดับแรงดันในช่วงที่ 1 พิจารณาจากตารางที่ 2.4

สำหรับฉนวนภายนอก ตัวอย่างนี้เลือก ฉนวนที่ทำความสะอาดแล้ว หรือเปียก (Clean insulator, wet) คำนวณค่า SDW โดย

$$SDW(p-e) = U_{rw}(p-e) \times Conversion\ Factor = 69.83 \times 0.6 = 41.9\text{kV}$$
$$SDW(p-p) = U_{rw}(p-e) \times Conversion\ Factor = 102.3 \times 0.6 = 61.38\text{kV}$$

สำหรับฉนวนภายใน ตัวอย่างนี้เลือก เลือก ฉนวนจุ่มของเหลว (Liquid Immersed Insulation) คำนวณค่า SDW โดย

$$SDW(p-e) = U_{rw}(p-e) \times Conversion\ Factor = 67.62 \times 0.5 = 33.81\text{kV}$$
$$SDW(p-p) = U_{rw}(p-e) \times Conversion\ Factor = 99.06 \times 0.5 = 49.53\text{kV}$$

ก.1.5.2 *LIW*

ตัวแปรสำหรับเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion factor) สำหรับระดับแรงดันในช่วงที่ 1 พิจารณาจากตารางที่ 2.4

สำหรับฉนวนภายนอก ตัวอย่างนี้เลือก ฉนวนภายนอก เลือกช่องว่างอากาศ และฉนวนสะอาด ในสภาวะแห้ง (air clearance and clean insulator, dry) คำนวณค่า LIW โดย

$$Conversion\ Factor(p-e) = 1.05 + \frac{U_{rw}(p-e)}{6000} = 1.05 + \frac{69.83}{6000} = 1.06$$
$$LIW(p-e) = U_{rw}(p-e) \times Conversion\ Factor = 69.83 \times 1.06 = 74.13\text{kV}$$
$$Conversion\ Factor(p-p) = 1.05 + \frac{U_{rw}(p-p)}{9000} = 1.05 + \frac{102.3}{9000} = 1.06$$
$$LIW(p-p) = U_{rw}(p-p) \times Conversion\ Factor = 102.3 \times 1.06 = 108.58\text{kV}$$

สำหรับฉนวนใน ตัวอย่างนี้เลือก ฉนวนจุ่มของเหลว (Liquid Immersed Insulation)

$$LIW(p-e) = U_{rw}(p-e) \times Conversion\ Factor = 67.62 \times 1.1 = 74.38\text{kV}$$

$$LIW(p-p) = U_{rw}(p-p) \times Conversion\ Factor = 99.06 \times 1.1 = 108.97\text{kV}$$

ก.1.6 การเลือกค่าความคงทนแรงดัน U_w

ตารางที่ ก.1 ผลสรุปความคงทนแรงดันที่ต้องการค่าน้อยที่สุด สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวน สำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1

ค่าของ U_{rw} -หน่วย kV rms สำหรับความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น - หน่วย kV ค่ายอด สำหรับอิมพัลสวิตชิง หรืออิมพัลส์ฟ้าผ่า		**ฉนวนภายนอก**		**ฉนวนภายใน**	
		$U_{rw(s)}$	$U_{rw(c)}$	$U_{rw(s)}$	$U_{rw(c)}$
ความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น	*(p - e)*	28.5	41.9	27.6	33.81
	(p - p)	32.79	61.38	31.75	49.53
สวิตชิงอิมพัลส์	*(p - e)*	69.83	-	67.62	-
	(p - p)	102.3	-	99.06	-
อิมพัลส์ฟ้าผ่า	*(p - e)*	106.61	74.13	92.3	74.38
	(p - p)	106.61	108.58	92.3	108.97

ตารางที่ ก.2 การเลือกมาตรฐานระดับการฉนวน สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1

ค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน	***SDW*** **(kV)**	***BIL*** **(kV)**
ฉนวนภายนอก	50	125
ฉนวนภายใน	50	125

ตารางที่ ก.3 ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟสของฉนวนภายนอก สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1

ฉนวนภายนอก	
ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟส (m)	0.22

ตารางที่ ก.4 ผลการเลือกค่าน้อยที่สุดของค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ของฉนวนภายใน สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1

ฉนวนภายใน	มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (kV)
ระห่างเฟสกับดิน	95
ระหว่างเฟสกับเฟส	125

จากตารางที่ ก.1 ผลสรุปความคงทนแรงดันที่ต้องการค่าน้อยที่สุด สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1 เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับฉนวนภายใน และฉนวนภายนอก ส่วนที่ 2 แสดงระยะห่างระหว่างเฟสกับเฟส (Phase to phase clearance) สำหรับฉนวนภายนอก และส่วนที่ 3 แสดงค่าน้อยที่สุดของมาตรฐานระดับอิมพัลส์ฟ้าผ่า (BIL) สำหรับระหว่างเฟสกับดิน และระหว่างเฟสกับเฟส

ส่วนที่ 1 : มาตรฐานความคงทนแรงดันระหว่างเฟสกับเฟส

จากตารางที่ ก.1 พิจารณาฉนวนภายนอก ระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับ SDW $U_{rw(s)}$ = 32.79 kV โดยพิจารณาอิมพัลส์ฟ้าผ่าระหว่างเฟสกับเฟส $U_{rw(s)}$ = 106.61 kV และ $U_{rw(c)}$ = 108.58 kV เลือกค่าสูงสุด คือ $U_{rw(c)}$ พิจารณาจากตารางที่ 2.2 ที่ U_m =24 kV เลือก SDW = 50 kV และ BIL = 125 kV แสดงผลการเลือกค่าตามตารางที่ ก.2

จากตารางที่ ก.1 พิจารณาฉนวนภายใน ระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับ SDW $U_{rw(s)}$ = 31.75 kV โดยพิจารณาอิมพัลส์ฟ้าผ่าระหว่างเฟสกับเฟส $U_{rw(s)}$ = 92.3 kV และ $U_{rw(c)}$ = 108.97 kV เลือกค่าสูงสุด คือ $U_{rw(c)}$ พิจารณาจากตารางที่ 2.2 ที่ U_m =24 kV เลือก SDW = 50 kV และ BIL =125 kV แสดงผลการเลือกค่าตามตารางที่ ก.2

ส่วนที่ 2 : ระยะห่างสำหรับระหว่างเฟสกับเฟสของฉนวนภายนอก

เมื่อเลือกค่า BIL =125 kV พิจารณาจากตารางที่ 3.6 เพื่อเลือกค่าน้อยที่สุดของระยะห่างสำหรับระหว่างเฟสกับเฟส มีค่า 0.22 เมตร แสดงผลการเลือกค่าตามตารางที่ ก.3

ส่วนที่ 3: *BIL* ระหว่างเฟสกับดินสำหรับฉนวนภายใน

จากตารางที่ ก.1 พิจารณาแรงดันเกินสูงสุดระหว่างเฟสกับดินอิมพัลส์ฟ้าผ่าอยู่ระหว่าง $U_{rw(c)}$ = 74.38 kV และ $U_{rw(s)}$ = 92.3 kV เลือกค่าที่สูงสุด คือ $U_{rw(s)}$ พิจารณาจากตารางที่ 2.2 ที่ U_m =24 kV เลือก *BIL* ค่าน้อยสุด คือ 95 kV แสดงผลการเลือกค่าตามตารางที่ ก.4

จากตารางที่ 12 พิจารณาแรงดันเกินสูงสุดระหว่างเฟสกับเฟสอิมพัลส์ฟ้าผ่าอยู่ระหว่าง $U_{rw(c)}$ = 108.97kV และ $U_{rw(s)}$ = 92.3 kV เลือกค่าที่สูงสุด คือ $U_{rw(s)}$ พิจารณาจากตารางที่ 2.2 ที่ U_m =24 kV เลือก *BIL* ค่าน้อยสุด คือ 125 kV แสดงผลการเลือกค่าตามตารางที่ ก.4

สิ่งที่ต้องสังเกต คือ ค่า *BIL* ของอุปกรณ์จากโปรแกรมกำหนดเป็น 95 kV แทนที่ควรจะเป็น 125 kV ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ตามปกติ ค่า 95 kV เป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณซึ่งจะขึ้นกับความถูกต้องของข้อมูลอินพุต สิ่งที่เราต้องตรวจสอบ คือ ข้อมูลอินพุตที่ได้มาถูกต้องหรือไม่

ก.2 การประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสำหรับสถานีไฟฟ้าในระบบ 230 kV ใน ระดับแรงดันช่วงที่ 1 (52 kV$\leq U_m \leq$245 kV)

ก.2.1 ข้อมูลพื้นฐาน

พิจารณาแรงดันระบุของระบบ คือ 230 kV มีค่า จากตารางที่ 2.2 พิจารณาเลือกแรงดันสูงสุดของระบบ (U_s) มากว่าหรือเท่ากับแรงดันระบุของระบบ ตัวอย่างนี้ คือ 245 kV

ก.2.2 ตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp})

ก.2.2.1 แรงดันเกินความถี่กำลัง

แรงดันสูงสุดของระบบ (U_s) คือ 245 kV

คำนวณค่า *pu* จากสมการที่ 3.2

$$1\ pu = \sqrt{2}\frac{U_m}{\sqrt{3}} = \sqrt{2}\frac{245\text{kV}}{\sqrt{3}} = 200.04\text{kV}$$

ก.2.2.2 แรงดันเกินชั่วคราว

พิจารณาผลจากความผิดพร่องลงดิน (Earth Fault) ในตัวอย่างนี้สมมุติค่าตัวแปรความผิดพร่องลงดิน (k) มีค่า 1.5 (ค่า k =1.5 ในความเป็นจริงใช้ในกรณีภาวะผิดปกติ สำหรับระดับแรงดัน 230 kV ค่าที่ใช้ตามปกติแล้วไม่ควรเกิน 1.3) คำนวณค่า ตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราวจากผลความผิดพร่องลงดิน จากสมการที่ 3.5

$$U_{rp}(p\text{-}e) = \frac{(U_s \times k)}{\sqrt{3}} = \frac{(245 \times 1.5)}{\sqrt{3}} = 212.18\text{kV}$$

พิจารณาผลจากการปลดโหลด (Load Reject) มีค่าแรงดันกิน 1.4 *pu*

กำหนด 1 *pu* คือ 200.04 kV (ค่ายอด)

คำนวณค่าตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราวระหว่างเฟสกับดินจากสมการที่ 3.3

$$U_{rp}(p\text{-}e)=\frac{(1\,pu\times U_{e2})}{\sqrt{2}}=\frac{(200.04\times 1.4)}{\sqrt{2}}=198.03\text{kV}$$

คำนวณค่าตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราวระหว่างเฟสกับเฟสจากสมการที่ 3.4

$$U_{rp}(p\text{-}p)=\sqrt{3}\frac{(1\,pu\times U_{e2})}{\sqrt{2}}=\sqrt{3}\frac{(200.04\times 1.4)}{\sqrt{2}}=343\text{kV}$$

ตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราว พิจารณาจากค่าสูงสุดของทุกแหล่งกำเนิดแรงดันเกินที่เป็นไปได้ ในกรณีนี้ คือ

$$U_{rp}(p\text{-}e)=212.18\text{kV}$$
$$U_{rp}(p\text{-}p)=343\text{kV}$$

ก.2.2.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า กรณีไม่มีอิทธิพลของการสวิตชิงจากคาปาซิเตอร์ที่สถานีไฟฟ้าระยะไกล (Remote Station)

พิจารณาแรงดันเกินจากสถานีไฟฟ้าระยะไกล :

พิจารณาแรงดันเกินจากการจ่ายพลังงาน และปลดพลังงานออก (Energization and Re-Energization) จากสถานีไฟฟ้าระยะไกล ตัวอย่างนี้สมมุติ

-ระหว่างเฟสกับดิน $U_{e2}=3pu$ คำนวณค่า U_{et} จากสมการที่ 3.6

$$U_{et}=(1.25U_{e2}-0.25)\times(1pu)=((1.25\times 3)-0.25)\times(200.04)=700.14\text{kV}$$

-ระหว่างเฟสกับเฟส $U_{p2}=4.5pu$ คำนวณค่า U_{pt} จากสมการที่ 3.7

$$U_{pt}=(1.25U_{e2}-0.43)\times(1pu)=((1.25\times 4.5)-0.43)\times(200.04)=1039.21\text{kV}$$

พิจารณาแรงดันเกินที่สถานีไฟฟ้าที่ 1 :

พิจารณาแรงดันเกินจากการจ่ายพลังงาน และปลดพลังงานออก (Energization and Re-Energization) ที่สถานีไฟฟ้าที่ 1

- ระหว่างเฟสกับดิน $U_{e2}=1.9pu$ คำนวณค่า U_{et} จากสมการที่ 3.6

$$U_{et}=(1.25U_{e2}-0.25)\times(1pu)=((1.25\times 1.9)-0.25)\times(200.04)=425.09\text{kV}$$

- ระหว่างเฟสกับเฟส $U_{p2}=2.9pu$ คำนวณค่า U_{pt} จากสมการที่ 3.7

$$U_{pt}=(1.25U_{e2}-0.43)\times(1pu)=((1.25\times 2.9)-0.43)\times(200.04)=639.13\text{kV}$$

การเลือกใช้กับดักเสิร์จ :

ตัวอย่างนี้เลือกใช้บริษัท ABB ชนิด Porcelain Housed Arrester รุ่น EXLIM-R

พิจารณาเลือกกระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (I_n) โดยพิจารณาจากตารางที่ 3.1 ตัวอย่างนี้เลือก Station($52\text{kV} \le U_s < 550\text{kV}$) ได้ค่ากระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (I_n) คือ 10 kA

พิจารณาระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ (Switching Impulse Classify Current) ซึ่งจะขึ้นกับแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) ของระบบที่พิจารณา โดยพิจารณาจากตารางที่ 3.3 จากตัวอย่างนี้ ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ kA (peak) มีค่า 1 kA

พิจารณาระดับการถ่ายเทประจุในสาย(Line Discharge Class) โดยเลือกจากตารางที่ 3.2 ซึ่งจะขึ้นกับระดับแรงดันของระบบที่พิจารณา จากตัวอย่างนี้ระดับการถ่ายเทประจุในสาย (Line Discharge Class) มีค่า 2

เลือกแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m)สำหรับกับดักเสิร์จ คือ U_m =245 kV

พิจารณาเลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จ $U_r \ge TOV(p\text{-}e)$ เลือก U_r =216kV

ระดับการป้องกันอิมพัลส์ฟ้าผ่า U_{pl} = 508 kV

ระดับการป้องกันสวิตชิงอิมพัลส์ U_{ps} = 428 kV

พิจารณาอุปกรณ์ที่สายส่งทางด้านเข้า จากผลกระทบของแรงดันเกินจากสถานีไฟฟ้าระยะไกล :

พิจารณาค่าตัวแทนแรงดันเกินระหว่างเฟสกับดินตามสมการที่ 3.12

$$U_{rp}(p\text{-}e) = U_{ps} \qquad When\ U_{et} > U_{ps}$$
$$= U_{et} \qquad When\ U_{et} < U_{ps}$$

กรณีนี้ $U_{ps} = 428\text{kV}$, $U_{et} = 700.14\text{kV}$

ดังนั้น $U_{rp}(p\text{-}e) = U_{ps} = 428\text{kV}$

พิจารณาค่าตัวแทนแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟสตามสมการที่ 3.13

$$U_{rp}(p\text{-}p) = 2U_{ps} \qquad When\ U_{et} > 2U_{ps}$$
$$= U_{pt} \qquad When\ U_{pt} < 2U_{ps}$$

กรณีนี้ $2U_{ps} = 428\text{kV}$, $U_{pt} = 1039.21\text{kV}$

ดังนั้น $U_{rp}(p\text{-}p) = 2U_{ps} = 856\text{kV}$

สำหรับอุปกรณ์อื่นๆ พิจารณาผลกระทบจากแรงดันเกินที่สถานีไฟฟ้าที่ 1 :

พิจารณาค่าตัวแทนแรงดันเกินระหว่างเฟสกับดินตามสมการที่ 3.12

$$U_{rp}(p-e) = U_{ps} \qquad When\ U_{et} > U_{ps}$$
$$= U_{et} \qquad When\ U_{et} < U_{ps}$$

กรณีนี้ $U_{ps} = 428\text{kV}$, $U_{et} = 425.09\text{kV}$

ดังนั้น $U_{rp}(p-e) = U_{et} = 425.09\text{kV}$

พิจารณาค่าตัวแทนแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟสตามสมการที่ 3.13

$$U_{rp}(p-p) = 2U_{ps} \qquad When\ U_{et} > 2U_{ps}$$
$$= U_{pt} \qquad When\ U_{pt} < 2U_{ps}$$

กรณีนี้ $2U_{ps} = 856\text{kV}$, $U_{et} = 639.13\text{kV}$

ดังนั้น $U_{rp}(p-p) = U_{pt} = 639.13\text{kV}$

ก.2.2.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

พิจารณาหาค่าในขั้นตอนของความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw})

ก.2.3 ค่าความคงทนแรงดันในการประสานฉนวน ค่าของ U_{cw}

ก.2.3.1 แรงดันเกินชั่วคราว

ความคงทนแรงดันในการประสานฉนวน จะเท่ากับตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราว กล่าวอีกอย่างหนึ่ง คือ ตัวแปรในการประสานฉนวน (K_c) เท่ากับ 1

คำนวณ $U_{cw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.20

$$U_{cw}(p-e) = U_{rp}(p-e) \times K_c = 212.18 \times 1 = 212.18\text{kV}$$

คำนวณ $U_{cw}(p-p)$ จากสมการที่ 3.21

$$U_{cw}(p-p) = U_{rp}(p-p) \times K_c = 343 \times 1 = 343\text{kV}$$

ก.2.3.2 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

สำหรับอุปกรณ์สายส่งทางด้านเข้า (Line Entrance Equipnent) :

- ระหว่างเฟสเทียบดิน คำนวณค่า Deterministic co-ordination factor (K_{cd}) จากสมการที่ 3.24

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} = \frac{428}{3 \times 200.04} = 0.71 \text{ เมื่อ } (0.7 < \frac{U_{ps}}{U_{e2}} < 1.243)$$

$$K_{cd} = 1.1 - \frac{\left[(0.7 - \frac{U_{ps}}{U_{e2}}) \times (1.1-1)\right]}{(0.7 - 1.243)} = 1.1 - \frac{\left[(0.7 - 0.71) \times (1.1-1)\right]}{(0.7 - 1.243)} = 1.1$$

คำนวณค่า $U_{cw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.26

$$U_{cw}(p-e) = U_{rp}(p-e) \times K_{cd} = 428 \times 1.1 = 470.8\text{kV}$$

- ระหว่างเฟสเทียบเฟส คำนวณค่า Deterministic co-ordination factor (K_{cd}) จากสมการที่ 3.25

$$\frac{2U_{ps}}{U_{e2}} = \frac{2 \times 428}{4.5 \times 200.04} = 0.95 \text{ เมื่อ } (\frac{2U_{ps}}{U_{e2}} \geq 0.9)$$

$$K_{cd} = 1$$

คำนวณค่า $U_{cw}(p-p)$ จากสมการที่ 3.27

$$U_{cw}(p-p) = U_{rp}(p-p) \times K_{cd} = 856 \times 1 = 856\text{kV}$$

สำหรับอุปกรณ์อื่นๆ ทั้งหมด (Other Equipnent) :

- ระหว่างเฟสเทียบดิน คำนวณค่า Deterministic co-ordination factor (K_{cd}) จากสมการที่ 3.24

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} = \frac{428}{1.9 \times 200.04} = 1.13 \text{ เมื่อ } (0.7 < \frac{U_{ps}}{U_{e2}} < 1.243)$$

$$K_{cd} = 1.1 - \frac{\left[(0.7 - \frac{U_{ps}}{U_{e2}}) \times (1.1-1)\right]}{(0.7-1.243)} = 1.1 - \frac{\left[(0.7-1.13) \times (1.1-1)\right]}{(0.7-1.243)} = 1.02$$

คำนวณค่า $U_{cw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.26

$$U_{cw}(p-e) = U_{rp}(p-e) \times K_{cd} = 425.09 \times 1.02 = 433.59\text{kV}$$

- ระหว่างเฟสเทียบเฟส คำนวณค่า Deterministic co-ordination factor (K_{cd}) จากสมการที่ 3.25

$$\frac{2U_{ps}}{U_{e2}} = \frac{2 \times 428}{2.9 \times 200.04} = 1.48 \text{ เมื่อ } (\frac{2U_{ps}}{U_{e2}} \geq 0.9)$$

ได้ $K_{cd} = 1$

คำนวณค่า $U_{cw}(p-p)$ จากสมการที่ 3.27

$$U_{cw}(p-p) = U_{rp}(p-p) \times K_{cd} = 639.13 \times 1 = 639.13\text{kV}$$

ก.2.3.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

ค่าสมมุติในการคำนวณ คือ

- ระยะห่างระหว่างกับดักเสิร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน สำหรับฉนวนภายใน L=30 m
- ระยะห่างระหว่างกับดักเสิร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน สำหรับฉนวนภายนอก L=60 m

- สายส่ง Single Conductor ตัวแปร A ค่า 4500 จำนวนของสายส่งที่พิจารณา n=2

- อัตราการขัดข้องของสายส่งเหนือศีรษะ R_{km} (1/100) km/year

- ความยาวช่วง L_{sp} = 300 m

- อัตราการล้มเหลวที่ยอมรับได้ของอุปกรณ์ R_a = 1/400 year

คำนวณค่า L_a จากสมการที่ 3.30

$$L_a = \frac{R_a}{R_{km}} = \frac{(1/400\text{year})}{(1/100\text{km.year})} = 0.25\text{km}$$

คำนวณค่า U_{cw} สำหรับฉนวนภายใน จากสมการที่ 3.31

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n}\frac{L}{L_{sp}+L_a} = 508 + \frac{4500}{2} \times \frac{30}{300+(0.25\times 1000)} = 630.73\text{kV}$$

คำนวณ U_{cw} สำหรับฉนวนภายนอก จากสมการที่ 3.31

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n}\frac{L}{L_{sp}+L_a} = 508 + \frac{4500}{2} \times \frac{60}{300+(0.25\times 1000)} = 753.45\text{kV}$$

ก.2.4 ความคงทนที่ต้องการ (U_{rw})

ก.2.4.1 ตัวแปรความปลอดภัย K_s (Safety Factor)

สำหรับฉนวนภายในมีค่าคงที่ คือ $K_s = 1.15$

สำหรับฉนวนภายนอกมีค่าคงที่ คือ $K_s = 1.05$

ก.2.4.2 ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ (K_a)

ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ (K_a) ใช้งานสำหรับฉนวนภายนอกเท่านั้น

- สำหรับแรงดันเกินชั่วคราว ตัวแปร m ตัวอย่างนี้สมมุติ ฉนวนมีสภาพสกปรก m = 0.5 คำนวณค่า K_a จากสมการที่ 3.32

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} = e^{0.5\times\frac{1000}{8150}} = 1.063$$

- แรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับดิน คำนวณตัวแปร m จากสมการที่ 19 เมื่อทราบค่า $U_{cw}(p-e)$ สำหรับอุปกรณ์ที่สายส่งทางด้านเข้า ค่า 470.8 kV ดังนั้น

$$m = 1.1619 + [0.0006\times 470.8] + [(1\times 10^{-7})(470.8)^2] + [(-2\times 10^{-11})(470.8)^3]$$

$$m = 0.902$$

คำนวณ K_a จากสมการที่ 3.32

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} = e^{0.902\times\frac{1000}{8150}} = 1.117$$

- แรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับเฟส คำนวณตัวแปร m จากสมการที่ 3.34 เมื่อทราบค่า $U_{cw}(p-p)$ สำหรับอุปกรณ์ที่สายส่งทางด้านเข้า ค่า 470.8 kV ดังนั้น $m=1$

คำนวณ K_a จากสมการที่ 3.32

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} = e^{1\times\frac{1000}{8150}} = 1.131$$

- สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว m มีค่าคงที่ คือ $m=1$ คำนวณ K_a จากสมการที่ 3.32

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} = e^{1\times\frac{1000}{8150}} = 1.131$$

ก.2.4.3 แรงดันเกินชั่วคราว

- ฉนวนภายใน

คำนวณค่า $U_{rw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.35

$$U_{rw}(p-e) = K_s U_{rw}(p-e) = 1.15\times 212.18 = 244.01\text{kV}$$

คำนวณค่า $U_{rw}(p-p)$ จากสมการที่ 3.35

$$U_{rw}(p-p) = K_s U_{rw}(p-p) = 1.15\times 343 = 394.45\text{kV}$$

- ฉนวนภายนอก

คำนวณค่า $U_{rw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.36

$$U_{rw}(p-e) = K_s K_a U_{rw}(p-e) = 1.05\times 1.063\times 212.18 = 236.82\text{kV}$$

คำนวณค่า $U_{rw}(p-p)$ จากสมการที่ 3.36

$$U_{rw}(p-e) = K_s K_a U_{rw}(p-p) = 1.05\times 1.063\times 343 = 382.84\text{kV}$$

ก.2.4.4 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

สำหรับอุปกรณ์ทางด้านเข้า (พิจารณาเฉพาะฉนวนภายนอกเท่านั้น) :

- ฉนวนภายนอก

คำนวณค่า $U_{rw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.36

$$U_{rw}(p-e) = K_s K_a U_{rw}(p-e) = 1.05\times 1.117\times 470.8 = 552.18\text{kV}$$

คำนวณค่า $U_{rw}(p-p)$ จากสมการที่ 3.36

$$U_{rw}(p-p) = K_s K_a U_{rw}(p-p) = 1.05\times 1.131\times 856 = 1016.54\text{kV}$$

สำหรับอุปกรณ์อื่น ๆ (พิจารณาโดยปราศจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์ที่สถานีไฟฟ้าที่ระยะไกล) :

- ฉนวนภายใน

คำนวณค่า $U_{rw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.35

$$U_{rw}(p-e) = K_s U_{rw}(p-e) = 1.15 \times 433.59 = 498.63\text{kV}$$

คำนวณค่า $U_{rw}(p-p)$ จากสมการที่ 3.35

$$U_{rw}(p-p) = K_s U_{rw}(p-p) = 1.15 \times 639.13 = 735\text{kV}$$

- ฉนวนภายนอก

คำนวณค่า $U_{rw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.36

$$U_{rw}(p-e) = K_s K_a U_{rw}(p-e) = 1.05 \times 1.117 \times 433.59 = 508.54\text{kV}$$

คำนวณค่า $U_{rw}(p-p)$ จากสมการที่ 3.36

$$U_{rw}(p-p) = K_s K_a U_{rw}(p-p) = 1.05 \times 1.131 \times 639.13 = 759\text{kV}$$

ก.2.4.5 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วส่งผลกระทบต่อฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส และฉนวนระหว่างเฟสกับดินในทิศทางเดียวกัน จึงใช้ U_{cw} ในการคำนวณระหว่างเฟสกับดิน และระหว่างเฟสกับเฟสเดียวกัน

- ฉนวนภายใน

คำนวณค่า $U_{rw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.35

$$U_{rw}(p-e) = K_s U_{rw}(p-e) = 1.15 \times 630.73 = 725.34\text{kV}$$

คำนวณค่า $U_{rw}(p-p)$ จากสมการที่ 3.35

$$U_{rw}(p-p) = K_s U_{rw}(p-p) = 1.15 \times 630.73 = 725.34\text{kV}$$

- ฉนวนภายนอก

คำนวณค่า $U_{rw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.36

$$U_{rw}(p-e) = K_s K_a U_{rw}(p-e) = 1.05 \times 1.131 \times 753.45 = 894.76\text{kV}$$

คำนวณค่า $U_{rw}(p-p)$ จากสมการที่ 3.36

$$U_{rw}(p-p) = K_s K_a U_{rw}(p-p) = 1.05 \times 1.131 \times 753.45 = 894.76\text{kV}$$

ก.2.5 การเปลี่ยนรูปของ U_{rw}

ความคงทนแรงดันที่ต้องการหน้าคลื่นช้า(U_{rw}) เปลี่ยนรูปไปยังความคงทนแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (SDW) และ ความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW) โดยใช้ตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion factor) คูณกับ ความคงทนแรงดันที่ต้องการหน้าคลื่นช้า (U_{rw})

ก.2.5.1 ***SDW***

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ สำหรับแรงดันช่วงที่ 1

สำหรับอุปกรณ์ทางด้านเข้า :

- สำหรับฉนวนภายนอก เลือก ช่องว่างอากาศ และฉนวนสะอาด ในสภาวะแห้ง

$$SDW(p-e) = U_{rw}(p-e) \times \left[0.6 + \frac{U_{rw}(p-e)}{8500}\right]$$

$$SDW(p-e) = 552.18 \times \left[0.6 + \frac{552.18}{8500}\right] = 367.18\text{kV}$$

$$SDW(p-p) = U_{rw}(p-p) \times \left[0.6 + \frac{U_{rw}(p-p)}{12700}\right]$$

$$SDW(p-p) = 1016.54 \times \left[0.6 + \frac{1016.54}{12700}\right] = 691.29\text{kV}$$

สำหรับอุปกรณ์อื่น ๆ :

- ฉนวนภายนอก เลือก ช่องว่างอากาศ และฉนวนสะอาด ในสภาวะแห้ง

$$SDW(p-e) = U_{rw}(p-e) \times \left[0.6 + \frac{U_{rw}(p-e)}{8500}\right]$$

$$SDW(p-e) = 508.54 \times \left[0.6 + \frac{508.54}{8500}\right] = 335.55\text{kV}$$

$$SDW(p-p) = U_{rw}(p-p) \times \left[0.6 + \frac{U_{rw}(p-p)}{12700}\right]$$

$$SDW(p-p) = 759 \times \left[0.6 + \frac{759}{12700}\right] = 500.76\text{kV}$$

- ฉนวนภายใน เลือก ฉนวนแช่อยู่ในของเหลว

$$SDW(p-e) = U_{rw}(p-e) \times 0.5 = 498.63 \times 0.5 = 249.32\text{kV}$$

$$SDW(p-p) = U_{rw}(p-p) \times 0.5 = 735 \times 0.5 = 367.5\text{kV}$$

ก.2.5.2 ***LIW***

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ สำหรับแรงดันช่วงที่ 1

สำหรับอุปกรณ์ทางด้านเข้า :

- ฉนวนภายนอก

ระหว่างเฟสกับดิน เลือก ฉนวนสะอาด ในสภาวะเปียก

$$LIW(p-e) = U_{rw}(p-e) \times 1.3 = 552.18 \times 1.3 = 717.83\text{kV}$$

ระหว่างเฟสกับเฟส เลือก ช่องว่างอากาศ และฉนวนสะอาด ในสภาวะแห้ง

$$LIW(p-p) = U_{rw}(p-p) \times \left[1.05 + \frac{U_{rw}(p-p)}{9000}\right]$$

$$LIW(p-p) = 1016.54 \times \left[1.05 + \frac{1016.54}{9000}\right] = 1182.18\text{kV}$$

สำหรับอุปกรณ์อื่นๆ :

- ฉนวนภายนอก

ระหว่างเฟสกับดิน เลือกฉนวนสะอาด หรือเปียก

$$LIW(p-e) = U_{rw}(p-e) \times 1.3 = 508.54 \times 1.3 = 661.1\text{kV}$$

ระหว่างเฟสกับเฟส เลือก ช่องว่างอากาศ และฉนวนสะอาด ในสภาวะแห้ง

$$LIW(p-p) = U_{rw}(p-p) \times \left[1.05 + \frac{U_{rw}(p-p)}{9000}\right]$$

$$LIW(p-p) = 759 \times \left[1.05 + \frac{759}{9000}\right] = 860.96\text{kV}$$

- ฉนวนภายใน เลือก ฉนวนสะอาด ในสภาวะเปียก

$$LIW(p-e) = U_{rw}(p-e) \times 1.1 = 498.63 \times 1.1 = 548.49\text{kV}$$

$$LIW(p-p) = U_{rw}(p-p) \times 1.1 = 735 \times 1.1 = 808.5\text{kV}$$

ก.2.6 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน

ตารางที่ ก.5 ผลสรุปความคงทนแรงดันที่ต้องการค่าน้อยที่สุด สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวน สำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 230 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1

ค่าของ U_{rw} -หน่วย kV rms สำหรับความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น - หน่วย kV ค่ายอดสำหรับอิมพัลสวิตชิง หรืออิมพัลส์ฟ้าผ่า		ฉนวนภายนอก				ฉนวนภายใน	
		อุปกรณ์ทางด้านเข้าของสายส่ง		อุปกรณ์อื่นๆ			
		$U_{rw(s)}$	$U_{rw(c)}$	$U_{rw(s)}$	$U_{rw(c)}$	$U_{rw(s)}$	$U_{rw(c)}$
ความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น	$p-e$	236.82	367.18	236.82	335.55	244.01	249.32
	$p-p$	382.84	691.29	382.84	500.76	394.45	367.5
สวิตชิงอิมพัลส์	$p-e$	552.18	-	508.54	-	398.63	-
	$p-p$	1016.5	-	759	-	735	-
อิมพัลส์ฟ้าผ่า	$p-e$	894.76	717.83	894.76	661.1	725.34	548.49
	$p-p$	894.76	1182.18	894.76	860.96	725.34	808.5

ตารางที่ ก.6 การเลือกมาตรฐานระดับการฉนวน สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 230 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1

ค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน	*SDW* (kV)	*BIL* (kV)
ฉนวนภายนอก	395	950
ฉนวนภายใน	395	950

ตารางที่ ก.7 ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟสของฉนวนภายนอก สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 230 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1

ฉนวนภายนอก		
ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟส (m)	อุปกรณ์ทางด้านเข้า	2.6
	อุปกรณ์อื่น ๆ	1.9

ตารางที่ ก.8 ผลการเลือกค่าน้อยที่สุดของค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ของฉนวนภายใน สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 230 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1

ฉนวนภายใน	มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (kV)
ระห่างเฟสกับดิน	750
ระหว่างเฟสกับเฟส	850

หลักในการเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน สำหรับความถี่กำลัง (Power Frequency) พิจารณาเลือกค่า $U_{rw(s)}$ ที่มีค่ามากที่สุด ระหว่างเฟสกับเฟส และสำหรับ อิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) เราจะพิจารณาเลือกค่า $U_{rw(s)}$ ที่มีค่ามากที่สุด

ฉนวนภายนอก :

จากตารางที่ ก.5 หัวข้อ ความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (Short-duration power frequency) ระหว่างเฟสกับเฟส พิจารณาเลือก $U_{rw(s)}$ จาก อุปกรณ์สายส่งทางด้านเข้า (Line entrance equipment) หรือ อุปกรณ์อื่นๆ (Other equipment) โดยพิจารณาเลือกค่าที่มากที่สุด จากตัวอย่างนี้มีค่าเท่ากัน คือ 282.82 kV

จากตารางที่ ก.5 หัวข้อ อิมพัลผ้าผ่า (Lightning Impulse) ระหว่างเฟสกับเฟส พิจารณาเลือกค่า $U_{rw(s)}$ ที่มีค่ามากที่สุด โดยพิจารณาจากอุปกรณ์สายส่งทางด้านเขา (Line entrance equipment) หรือ อุปกรณ์อื่นๆ (Other equipment) จากตัวอย่างนี้มีค่าเท่ากันคือ 894.76 kV

เมื่อนำค่าความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (Short-duration power frequency) $U_{rw(s)}$ ค่ามากที่สุด คือ 282.82 kV และค่าอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) ค่ามากที่สุด คือ 894.76 kV เปิดตารางที่ 2.2 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับช่วงที่ 1 ที่แรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) คือ 245 kV พิจารณาเลือกค่ามาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น kV(r.m.s) ค่า 395 kV และมาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า kV(Peak) ค่า 950 kV เนื่องจากเป็นค่าที่ทั้ง ความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (Short-duration power frequency) และค่าอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) ผ่านเกณฑ์ทั้งคู่ที่ระดับเดียวกัน นั้นคือค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าที่นำมาพิจารณา แสดงผลการเลือกค่าตามตารางที่ ก.6

ฉนวนภายใน:

จากตารางที่ ก.5 หัวข้อความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (Short-duration power frequency) ระหว่างเฟสกับเฟส มีค่า $U_{rw(s)}$ คือ 394.45 kV

จากตารางที่ ก.5 หัวข้ออิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) ระหว่างเฟสกับเฟส พิจารณาค่ามากที่สุด ระหว่าง $U_{rw(s)}$ และ $U_{rw(c)}$ ในที่นี้ค่ามากที่สุด คือ $U_{rw(c)}$ = 808.5 kV

เมื่อนำค่าความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (Short-duration power frequency) $U_{rw(s)}$ คือ 394.45 kV และค่าอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) ค่ามากที่สุด คือ 808.5 kV เปิดตารางที่ 2.2 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับช่วงที่ 1 ที่ความคงทนแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ คือ 245 kV และพิจารณาเลือกค่ามาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น kV(r.m.s) ค่า 395 kV และมาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า kV(Peak) ค่า 950 kV เนื่องจากเป็นค่าที่ทั้งค่าความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (Short-duration power frequency) และค่าอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) ผ่านเกณฑ์ทั้งคู่ที่ระดับเดียวกัน นั้นคือค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าที่นำมาพิจารณา แสดงผลการเลือกค่าตามตารางที่ ก.6

จากตารางที่ ก.7 หัวข้อฉนวนภายนอก (External Insulation) พิจารณาระยะห่างระหว่างเฟสกับเฟส (Phase-to-Phase Clearance) โดยพิจารณาแยกระหว่าง อุปกรณ์สายส่งทางด้านเข้า(Line entrance equipment) และ อุปกรณ์อื่นๆ (Other equipment)

อุปกรณ์สายส่งทางด้านเข้า :

จากตารางที่ ก.5 พิจารณาอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) ระหว่างเฟสกับเฟส โดยพิจารณาเลือกค่าที่มากที่สุดระหว่าง $U_{rw(s)}$ และ $U_{rw(c)}$ ในที่นี้ค่ามากที่สุด คือ $U_{rw(c)}$ =1182.18 kV เมื่อนำค่านี้เปิดตารางที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างอากาศ (minimum air clearance) ที่มาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Standard lightning impulse withstand voltage) 1300 kV จะได้ค่าระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟส (minimum p-p Clearance) ค่า 2.6 m

อุปกรณ์อื่นๆ :

จากตารางที่ ก.5 พิจารณาอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) ระหว่างเฟสกับเฟส โดยพิจารณาเลือกค่าที่มากที่สุดระหว่าง $U_{rw(s)}$ และ $U_{rw(c)}$ ในที่นี้ค่ามากที่สุด คือ $U_{rw(c)}$ =894.76 kV เมื่อนำค่านี้เปิดตารางที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างอากาศ (minimum air clearance) ที่มาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าค่า 950 kV จะได้ค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างเฟสกับเฟส (minimum p-p Clearance) ค่า 1.9 m

จากตารางที่ ก.8 หัวข้อฉนวนภายใน (Internal Insulation) พิจารณาเลือกค่าน้อยที่สุดของมาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Minimum Standard Lightning Impulse Withstand Voltage) ระหว่างเฟสกับเฟส และระหว่างเฟสกับดิน

ระหว่างเฟสกับเฟส:

โดยพิจารณาเลือกค่าที่มากที่สุดระหว่าง $U_{rw(s)}$ และ $U_{rw(c)}$ ในที่นี้ค่ามากที่สุด คือ $U_{rw(s)}$ = 725.34 kV นำค่านี้เปิดตารางที่ ก.5 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับช่วงที่ 1 ที่ความคงทนแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ คือ 245 kV เลือกค่ามาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Standard lightning impulse withstand voltage) คือ 750 kV

ระหว่างเฟสกับดิน:

โดยพิจารณาเลือกค่าที่มากที่สุดระหว่าง $U_{rw(s)}$ และ $U_{rw(c)}$ ในที่นี้ค่ามากที่สุด คือ $U_{rw(c)}$ = 808.5 kV นำค่านี้เปิดตารางที่ 2.2 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับช่วงที่ 1 ที่ความคงทนแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ คือ 245 kV เลือกค่ามาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Standard lightning impulse withstand voltage คือ 850 kV)

ก.3 ตัวอย่างการคำนวณการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าในระบบ 735 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 2 ($300\text{kV} \le U_m < 800\text{kV}$)

ก.3.1 ข้อมูลเบื้องต้น

พิจารณาสถานีไฟฟ้าแรงดันระบุของระบบ คือ 735 kV จากตารางที่ 2.3 พิจารณาเลือกแรงดันสูงสุดของระบบ (U_s) มากว่าหรือเท่ากับแรงดันระบุของระบบ ตัวอย่างนี้ คือ 800 kV

ก.3.2 ตัวแทนแรงดันเกินที่ใช้แทนค่า (U_{rp})

ก.3.2.1 แรงดันเกินความถี่กำลัง

แรงดันสูงสุดของระบบ (U_s) คือ 800 kV

คำนวณค่า pu จากสมการที่ 3.2

$$1\,pu = \sqrt{2}\frac{U_m}{\sqrt{3}} = \sqrt{2}\frac{800\text{kV}}{\sqrt{3}} 653.2\text{kV}$$

ก.3.2.2 แรงดันเกินชั่วคราว

พิจารณาผลจากการปลดโหลด (Load Reject) มี $U_{e2} = 1.3pu$

คำนวณค่าตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราวระหว่างเฟสกับดิน จากสมการที่ 3.3

$$U_{rp}(p\text{-}e) = \frac{(1\,pu \times U_{e2})}{\sqrt{2}} = \frac{(653.2 \times 1.3)}{\sqrt{2}} = 600.45\text{kV}$$

ก.3.2.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

พิจารณาผลจากการจ่ายพลังงาน หรือการจ่ายพลังงานกลับอีกครั้ง (Energization and Re-Energization) เกิน $U_{e2} = 1.92pu$ คำนวณค่า U_{et} จากสมการที่ 3.6

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

$$U_{et} = ((1.25 \times 1.92) - 0.25) \times (653.2) = 1404.38\text{kV}$$

การเลือกใช้กับดักเสิร์จ ตัวอย่างนี้เลือกใช้บริษัท ABB ชนิด Porcelain - Housed Arrester รุ่น EXLIM-T

พิจารณาเลือกกระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (I_n) โดยพิจารณาจากตารางที่ 3.1 ตัวอย่างนี้เลือก Station($550kV < U_s \le 800\text{kV}$)ได้ค่า กระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (I_n) คือ 20 kA

พิจารณาระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ (Switching Impulse Classify Current) ซึ่งจะขึ้นกับแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) โดยพิจารณาจากตารางที่ 3.3 จากตัวอย่างนี้ ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ kA (peak) มีค่า 2 kA

พิจารณาระดับการถ่ายเทประจุในสาย (Line Discharge Class) โดยเลือกจากตารางที่ 3.2 ซึ่งจะขึ้นกับระดับแรงดันของระบบที่พิจารณา จากตัวอย่างนี้ระดับการถ่ายเทประจุในสาย (Line Discharge Class) มีค่า 5

เลือกแรงดันสูงสุดสำหรับอุปรณ์ (U_m) สำหรับกับดักเสิร์จ คือ U_m =800 kV

พิจารณาเลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จ $U_r \geq TOV(p-e)$ เลือก U_r =624kV

ระดับการป้องกันอิมพัลส์ฟ้าผ่า U_{pl} = 1488 kV

ระดับการป้องกันสวิตชิงอิมพัลส์ U_{ps} = 1238 kV

คำนวณ $U_{rp}(p-e)$ จากสมการที่ 3.12

$$U_{rp}(p-e) = U_{ps} \qquad When\ U_{et} > U_{ps}$$
$$= U_{et} \qquad When\ U_{et} < U_{ps}$$

กรณีนี้ $U_{ps} = 1238\text{kV}$, $U_{et} = 1404.38\text{kV}$

ดังนั้น $U_{rp}(p-e) = U_{ps} = 1238\text{kV}$

ก.3.2.4 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

พิจารณาหาค่าในขั้นตอนของความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw})

ก.3.3 U_{cw} สำหรับฉนวนภายใน

U_{cw} สำหรับแรงดันเกินชั่วคราว :

ความคงทนแรงดันในการประสานฉนวน จะเท่ากับแรงดันเกินชั่วคราวที่ใช้แทนค่า กล่าวอีกอย่างหนึ่ง คือ ตัวแปรในการประสานฉนวน (K_c) เท่ากับ 1 คำนวณ $U_{cw}(p-e)$ จากสมการที่ 3.20

$$U_{cw}(p-e) = U_{rp}(p-e) \times K_c = 600.45 \times 1 = 600.45\text{kV}$$

U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า :

คำนวณค่า Deterministic co-ordination factor (K_{cd}) ระหว่างเฟสกับดิน จากสมการที่ 3.24 เมื่อทราบค่า U_{ps} และ U_{e2} จากขั้นตอนก่อนหน้านี้

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} = \frac{1238}{1.92 \times 653.2} = 0.99 \text{ เมื่อ } (0.7 < \frac{U_{ps}}{U_{e2}} < 1.243)$$

$$K_{cd} = 1.1 - \frac{\left[(0.7 - \frac{U_{ps}}{U_{e2}}) \times (1.1-1)\right]}{(0.7-1.243)} = 1.1 - \frac{\left[(0.7-0.99) \times (1.1-1)\right]}{(0.7-1.243)} = 1.05$$

$$U_{cw}(p-e) = K_{cd} U_{rp}(p-e) = 1.05 \times 1238 = 1299.9\text{kV}$$

U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว :

สมมุติในการคำนวณ คือ

- ระยะห่างระหว่างกับดักเสิร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน สำหรับฉนวนภายใน L=40 m

- สายส่ง Four Conductor Bundle ตัวแปร A ค่า 11000 พิจารณาจากตารางที่ 2.6

- จำนวนของสายส่งที่พิจารณา n=2

- อัตราการขัดข้องของสายส่งเหนือศีรษะ R_{km} = 0.15/100 km/year

- ความยาวช่วง L_{sp} = 400 m

- อัตราการล้มเหลวที่ยอมรับได้ของอุปกรณ์ R_a = 1/500 years

คำนวณค่า L_a จากสมการที่ 3.30

$$L_a = \frac{R_a}{R_{km}} = \frac{(1/500\text{year})}{(0.15/100\text{km.year})} = 1.3\text{km}$$

พิจารณา U_{cw} สำหรับฉนวนภายใน จากสมการที่ 3.31

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n}\frac{L}{L_{sp}+L_a} = 1488 + \frac{11000}{2} \times \frac{40}{400 + (1.3 \times 1000)} = 1614.92\text{kV}$$

ก.3.4 U_{cw} สำหรับฉนวนภายนอก

U_{cw} สำหรับแรงดันเกินชั่วคราว :

มีค่าเท่ากับ U_{cw} สำหรับฉนวนภายนอก

U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า :

จากตารางที่ 3.4 สมมุติเลือก ความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของฉนวน (R) ค่า 0.0001 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งมาตรฐานแนะนำให้ใช้ค่านี้

เมื่อทราบค่า $U_{e2} = 1.92pu$ จากตารางที่ 3.4 อยู่ในช่วง $(1.5 < U_{e2} < 2.5)$ คำนวณค่า K_{cs} จากสมการ

$$K_{cs} = 1.18 - [(1.18 - 1.14) \times (1 - (2.5 - U_{e2}))]$$

$$K_{cs} = 1.18 - [(1.18 - 1.14) \times (1 - (2.5 - 1.92))] = 1.1632$$

คำนวณความคงทนแรงดันในการประสานฉนวน จากสมการที่ 3.29

$$U_{cw} = (U_{e2} \times 1pu) \times K_{cs} = (1.92 \times 653.2) = 1458.82\text{kV}$$

U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว :

การหาค่าความคงทนแรงดันในการประสานฉนวน สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วไม่จำเป็น

ก.3.5 ความคงทนที่ต้องการ (U_{rw})

ก.3.5.1 U_{rw} สำหรับฉนวนภายใน

ตัวแปรความปลอดภัย (K_s) สำหรับฉนวนภายในมีค่าคงที่ คือ K_s=1.15

คำนวณ U_{rw} สำหรับฉนวนภายในจากสมการที่ 3.35

U_{rw} สำหรับแรงดันเกินชั่วคราว :

$$U_{rw}(p-e) = K_c U_{cw} = (1.15 \times 600.45) = 690.52\text{kV}$$

U_{rw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า :

$$U_{rw}(p-e) = K_c U_{cw} = (1.15 \times 1299.9) = 1494.89\text{kV}$$

U_{rw} สำหรับแรงดันเกินหน้าเร็ว :

$$U_{rw}(p-e) = K_c U_{cw} = (1.15 \times 1614.92) = 1857.16\text{kV}$$

ก.3.5.2 U_{rw} สำหรับฉนวนภายนอก

ตัวแปรความปลอดภัย (K_s) สำหรับฉนวนภายในมีค่าคงที่ คือ K_s=1.05

U_{rw} สำหรับแรงดันเกินชั่วคราว :

ตัวอย่างนี้สมมุติ ฉนวนมีสภาพสกปรก ใช้ค่า m = 0.5 คำนวณค่า K_a จากสมการที่ 18

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} = e^{0.5\frac{1000}{8150}} = 1.063$$

คำนวณค่า U_{rw} จากสมการที่ 3.36

$$U_{rw} = K_s K_a U_{cw} = 1.05 \times 1.063 \times 600.45 = 670.19\text{kV}$$

U_{rw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า :

คำนวณตัวแปร m จากสมการที่ 3.33

จากตัวอย่างนี้ $U_{cw}(p-e)$ =1458.82kV ดังนั้น

$$m = 1.1619 + [0.0006 \times U_{cw}(p-e)] + [(1 \times 10^{-7})(U_{cw}(p-e))^2] + [(-2 \times 10^{-11})(U_{cw}(p-e))^3$$

$$m = 1.1619 + [0.0006 \times 1458.82] + [(1 \times 10^{-7})(1458.82)^2] + [(-2 \times 10^{-11})(1458.82))^3]$$

$$m = 0.583$$

คำนวณค่า K_a จากสมการที่ 3.32

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} = e^{0.583\frac{1000}{8150}} = 1.074$$

คำนวณค่า U_{rw} จากสมการที่ 3.36

$$U_{rw}(\text{p}-\text{e}) = K_s K_a U_{cw} = 1.05 \times 1.074 \times 1458.82 = 1645.11\text{kV}$$

ก.3.6 การเปลี่ยนรูปไปยังความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (*SIW*)

ความคงทนแรงดันความชั่วคราวที่ต้องการ (U_{rw}) จะถูกเปลี่ยนรูปไปยัง ความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (*SIW*) โดยพิจารณาตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบจากตารางที่ 2.5 โดย ความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (*SIW*) มีค่าเท่ากับ ความคงทนแรงดันความชั่วคราวที่ต้องการ (U_{rw}) คูณด้วย ตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ

- สำหรับฉนวนภายใน เลือก ฉนวนจุ่มของเหลว

$$SIW(p\text{-}e) = Conversion\ Factor \times U_{rw}(\text{p}-\text{e}) = 2.3 \times 690.52 = 1588.2\text{kV}$$

- สำหรับฉนวนภายนอก เลือก ระยะห่างระหว่างอากาศ(Air Clearance) และฉนวนที่สะอาด หรือ แห้ง

$$SIW(p\text{-}e) = Conversion\ Factor \times U_{rw}(\text{p}-\text{e}) = 1.7 \times 690.19 = 1139.32\text{kV}$$

ก.3.7 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w)

การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน พิจารณาเลือกจากความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw}) โดยพิจารณาจากตารางที่ 2.3 โดยเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w) มากกว่าหรือเท่ากับ ความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw}) โดยพิจารณาแยกระหว่างฉนวนภายนอก และฉนวนภายใน

ตารางที่ ก.9 ผลการเลือกมาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w) สำหรับฉนวนภายใน สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าในระบบ 735 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 2

ฉนวนภายใน	kV
U_{rw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า	1494.89
มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง	1550
U_{rw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว	1857.16
มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	1950

ตารางที่ ก.10 ผลการเลือกมาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w) สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าในระบบ 735 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 2

ฉนวนภายนอก	kV
U_{rw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ	1645.11
มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง	1550
มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน)	1950
มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่ได้รับการป้องกัน)	2100

ก.3.7.1 U_w สำหรับฉนวนภายใน

จากตารางที่ ก.9 เมื่อทราบค่า U_{rw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ คือ $U_{rw}(p-e)$ ค่า 1,494.89 kV จากนั้นเปิดตารางที่ 2.3 มาตรฐานระดับการฉนวนที่ระดับแรงดันสูงสุดของระบบ (U_s) คือ 800 kV เพื่อเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงโดยเลือกค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $U_{rw}(p-e)$ ในตัวอย่างนี้เลือกค่า U_w ค่า 1550 kV

เมื่อทราบค่า U_{rw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว คือ $U_{rw}(p-e)$ ค่า 1857.16 kV จากนั้นเปิดตารางที่ 2.3 มาตรฐานระดับการฉนวน เพื่อเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยเลือกค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $U_{rw}(p-e)$ ในตัวอย่างนี้เลือกค่า U_w ค่า 1950 kV

ก.3.7.2 U_W สำหรับฉนวนภายนอก

จากตารางที่ ก.10 เมื่อทราบค่า U_{rw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ คือ $U_{rw}(p-e)$ ค่า 1645.11 kV จากนั้นเปิดตารางที่ 2.3 มาตรฐานระดับการฉนวนเพื่อเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง โดยเลือกค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $U_{rw}(p-e)$ ในตัวอย่างนี้เลือกค่า U_w ค่า 1550 kV

พิจารณามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน) โดยเลือกค่า U_w เท่ากับ U_w ของฉนวนภายใน คือ 1950 kV

พิจารณามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่ได้รับการป้องกัน) โดยเลือกค่า U_w จากตารางที่ 2.3 มาตรฐานระดับการฉนวน โดยเลือกค่าเพิ่มขึ้นจากมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน) หนึ่งระดับ สำหรับตัวอย่างนี้ มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่ได้รับการป้องกัน) คือ 2100 kV

ก.3.8 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

ก.3.8.1 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

ตัวแทนแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟส($U_{p2\text{-}re}$) :

พิจารณาแรงดันเกินจากการจ่ายพลังงานกลับอีกครั้ง (Re-Energization) จากสถานีไฟฟ้าระยะไกล โดยพิจารณาที่สถานีไฟฟ้าที่ 1 จากตัวอย่างนี้ทราบค่า $U_{e2}=1.92pu$ คำนวณค่า U_{p2} จากสมการที่ 3.14

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

$$\frac{U_{p2}}{U_{e2}} = 0.099+(4.3826\times 1.92)+(-4.5968\times 1.92^2)+(2.5165\times 1.92^3)$$
$$+(0.7872\times 1.92^4)+(0.1325\times 1.92^5)+(-0.0092\times 1.92^6)$$

$$\frac{U_{p2}}{U_{e2}} = 1.7$$

$$U_{p2} = 1.7\times U_{e2} = 1.7\times 1.92 = 3.264pu$$

$$U_{p2} = 3.264\text{pu}\times 653.2 = 2132.04\text{kV}$$

สมมุติค่าที่ใช้ในการคำนวณค่า ตัวแทนแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟส ($U_{p2\text{-}re}$)

- ความสูงเหนือพื้นดิน (Ht) =16 m
- ระยะระหว่างเฟสกับเฟส (D)=8 m

เมื่อทราบค่าอัตราส่วน $\frac{D}{Ht}=\frac{8}{16}=0.5$ คำนวณค่า Incline angle (Φ) จากสมการที่ 3.15

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

$$\Phi = 33.303+\left[87.792\times(0.5)\right]+\left[-311.32\times(0.5)^2\right]$$
$$+\left[294.16\times(0.5)^3\right]\left[-94.445\times(0.5)^4\right]$$

$$\Phi = 30.24^{\circ}$$

เมื่อทราบค่า Φ คำนวณตัวแปร B จากสมการที่ 3.16

$$B = tan(\Phi) = tan(30.24^{\circ}) = 0.6$$

เมื่อทราบค่า B ทำให้ทราบค่า F_1 คำนวณจากสมการที่ 3.17

$$F_1 = \frac{1}{(2-\sqrt{2})}\left[1-\frac{\sqrt{1+B^2}}{1+B}\right] = \frac{1}{(2-\sqrt{2})}\left[1-\frac{\sqrt{1+0.6^2}}{1+0.6}\right] = 0.463$$

เมื่อทราบค่า B ทำให้ทราบค่า F_2 คำนวณจากสมการที่ 3.18

$$F_1 = \frac{1}{(2-\sqrt{2})}\left[2\times\frac{\sqrt{1+B^2}}{1+B}-\sqrt{2}\right] = \frac{1}{(2-\sqrt{2})}\left[2\times\frac{\sqrt{1+0.6^2}}{1+0.6}-\sqrt{2}\right] = 0.074$$

เมื่อทราบค่า F_1 และ F_2 คำนวณ $U_{p2\text{-}re}$ จากสมการที่ 3.19

$$U_{p2\text{-}re} = 2(F_1U_{p2} + F_2U_{e2})\times(1pu)$$

$$U_{p2\text{-}re} = 2\left[((0.463\times3.264)+(0.074\times1.92))\right]\times(635.2) = 2159.89\text{kV}$$

ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส ($U_{p\text{-}cw}$) :

เมื่อทราบค่า $K_{cs} = 1.1632$ จากการประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดิน คำนวณค่า $U_{p\text{-}cw}$ จากสมการที่ 3.29

$$U_{p\text{-}cw} = K_{cs}U_{p2\text{-}re} = 1.1632\times2159.89 = 2152.38\text{kV}$$

ความคงทนแรงดันที่ต้องการระหว่างเฟสกับเฟส ($U_{p\text{-}rw}$) :

ตัวแปรความปลอดภัย (K_s) สำหรับฉนวนภายนอกมีค่าคงที่คือ $K_s = 1.05$

ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ (K_a) คำนวณ ตัวแปร m จากสมการที่ 3.34 จากตัวอย่างนี้ $U_{p\text{-}cw}(p-p) = 2512.38\text{kV}$ ดังนั้น m มีค่า

$$m = 1.397-\left[0.0003\times U_{cw}(p-p)\right]-\left[(7\times10^{-8})(U_{cw}(p-p))^2\right]$$
$$+\left[(2\times10^{-11})(U_{cw}(p-p))^3\right]$$

$$m = 1.397-\left[0.0003\times2152.38\right]-\left[(7\times10^{-8})(2152.38)^2\right]$$
$$+\left[(2\times10^{-11})(2152.38)^3\right]$$

$$m = 0.519$$

คำนวณค่า K_a จากสมการที่ 3.32

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} = e^{0.519\frac{1000}{8150}} = 1.066$$

คำนวณค่า $U_{p\text{-}rw}$ จากสมการที่ 3.37

$$U_{p\text{-}rw} = K_aK_sU_{p2\text{-}cw} = 1.066\times1.05\times2512.38 = 2812.11\text{kV}$$

คำนวณค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ จากสมการที่ 3.38

$$Test\ Value = \pm\frac{U_{p\text{-}rw}}{2} = \pm\frac{2812.11}{2} = \pm 1406.06\text{kV}$$

ค่าที่ใช้ในการทดสอบนี้ไม่ใช่ค่ามาตรฐาน เนื่องจากมีอุปกรณ์จำนวนน้อยที่ใช้งานที่แรงดันใช้งานของระบบ 735 kV

ก.3.2.8.2 แรงดันเกินชั่วคราว

ตัวแทนแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟส (U_{rp}) :

พิจารณาผลจากการปลดโหลด (Load Reject) $U_{e2} = 1.3pu$ คำนวณค่า $U_{rp}(p\text{-}p)$ จากสมการที่ 3.4

$$U_{rp}(p\text{-}p) = \sqrt{3}\frac{(1\,pu \times U_{p2})}{\sqrt{2}} = \sqrt{3}\frac{(653.2 \times 1.3)}{\sqrt{2}} = 1040.01\text{kV}$$

ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส (U_{cw}) :

ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน จะเท่ากับแรงดันเกินชั่วคราวที่ใช้แทนค่ากล่าวอีกอย่างหนึ่ง คือ ตัวแปรในการประสานฉนวน (K_c) เท่ากับ 1 คำนวณค่า $U_{cw}(p\text{-}p)$ จากสมการที่ 3.21

$$U_{cw}(p\text{-}p) = K_c U_{rp}(p\text{-}p) = 1 \times 1040.01 = 1040.01\text{kV}$$

ความคงทนแรงดันที่ต้องการระหว่างเฟสกับเฟส (U_{rw}) :

U_{rw} สำหรับฉนวนภายใน

ตัวแปรความปลอดภัย (K_s) สำหรับฉนวนภายในมีค่าคงที่ คือ $K_s = 1.15$ คำนวณค่า $U_{rw}(p\text{-}p)$ จากสมการที่ 3.35

$$U_{rw}(p\text{-}p) = K_s U_{cw}(p\text{-}p) = 1.15 \times 1040.01 = 1196.01\text{kV}$$

U_{rw} สำหรับฉนวนภายนอก

ตัวแปรความปลอดภัย(K_s) สำหรับฉนวนภายในมีค่าคงที่ คือ $K_s = 1.05$

ตัวอย่างนี้สมมุติ ฉนวนมีสภาพสกปรก ใช้ค่า $m = 0.5$ คำนวณค่า K_a จากสมการที่ 3.32

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} = e^{0.5\frac{1000}{8150}} = 1.063$$

คำนวณค่า $U_{rw}(p\text{-}p)$ จากสมการที่ 3.36

$$U_{rw}(p\text{-}p) = K_s K_a U_{cw}(p\text{-}p) = 1.05 \times 1.063 \times 1040.01 = 1160.81\text{kV}$$

การเปลี่ยนรูปไปยังความคงทนแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ระหว่างเฟสกับเฟส (SIW):

ความคงทนแรงดันความชั่วคราวที่ต้องการ(U_{rw}) จะถูกเปลี่ยนรูปไปยัง ความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (SIW) พิจารณาจากตารางที่ 2.5 ตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 คูณกับความคงทนแรงดันความชั่วคราวที่ต้องการ (U_{rw}) ได้ค่าความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงระหว่างเฟสกับเฟส (SIW)

- สำหรับฉนวนภายใน เลือก ฉนวนจุ่มของเหลว

$$SIW(p-p) = Conversion\ Factor \times U_{rw}(p-p) = 2.3 \times 1196.01 = 2750.82\text{kV}$$

- สำหรับฉนวนภายนอก เลือก ฉนวนที่สะอาด หรือเปียก

$$SIW(p-p) = Conversion\ Factor \times U_{rw}(p-p) = 1.7 \times 1160.81 = 1973.38\text{kV}$$

ดังนั้นค่าที่ใช้ในการทดสอบสวิตชิงอิมพัลส์ U_{rw} =2812.11kV มากกว่า $SIW(p-p)$ สำหรับฉนวนภายใน และฉนวนภายนอก แสดงว่าการทดสอบดังกล่าวพอเพียงและครอบคลุมทั้งทั้งฉนวนภายในและฉนวนภายนอก แต่ถ้า $U_{p\text{-}rw}$ มีค่าน้อยกว่า $SIW(p-p)$ ของฉนวนภายใน หรือฉนวนภายนอก มาตรฐานแนะนำให้ทำการวัดด้วยวิธีพิเศษ . (Special Mesurement)

ก.3.9 ระยะห่างน้อยที่สุด (Clearance)

ก.3.9.1 ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับดิน (Phase-to-earth clearances)

จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ทราบค่า มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (U_w) ค่า 1550 kV จากตารางที่ 3.7 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างเฟสกับดิน

สำหรับ Conductor-structure :

- Slow-front gap factor (K)=1.35
- ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับดิน (d)=4.9 m

คำนวณค่า K_{ff}^{+} ของ Conductor-structure จากสมการที่ 3.39

$$K_{ff}^{+} = 0.74 + (0.26 \times K) = 0.74 + (0.26 \times 1.35) = 1.05$$

สำหรับ Rod-structure :

- Slow-front gap factor K <1.15
- ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับดิน (d) =6.4 m

คำนวณค่า K_{ff}^{+} ของ Rod-structure จากสมการที่ 3.39

$$K_{ff}^{+} = 0.74 + (0.26 \times K) = 0.74 + (0.26 \times 1.15) = 1.04$$

พิจารณาเลือกค่า K_{ff}^{+} ที่มีค่าน้อยที่สุดจาก Conductor-Structure หรือ Rod-Structure จากตัวอย่างนี้ K_{ff}^{+} ของ Rod-Structure มีค่าน้อยที่สุด คือ 1.04 เพื่อใช้ในการคำนวณ U_{50RP}

พิจารณาเลือกค่า d ที่มีค่าน้อยที่สุดจาก Conductor-Structure หรือ Rod-Structure จากตัวอย่างนี้ d ของ Conductor-Structure มีค่าน้อยที่สุด คือ 4.9 เพื่อใช้ในการคำนวณ U_{50RP} จากสมการที่ 3.40

$$U_{50RP} = K_{ff}^{+} 530d = 1.04 \times 530 \times 4.9 = 2700\text{kV}$$

Conventional deviation มีค่าประมาณ 3% ของ U_{50} สำหรับอิมพัลส์ขั้วบวก นั้นคือ z มีค่า 0.03 จากนั้นคำนวณค่า LIW จากสมการที่ 3.41

$$LIW = U_{50RP}(1 - 1.3z) = 2700 \times (1 - (1.3 \times 0.03)) = 2595.55\text{kV}$$

LIW ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณ จากตัวอย่างนี้ LIW มีค่า 2595.55 kV เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่ได้รับการป้องกัน) มีค่า 2100 kV จะเห็นได้ว่า LIW ของระบบมีค่าสูงกว่าซึ่งถือเป็นกรณีที่ดี

ก.3.9.2 Phase-to- Phase clearances

จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ทราบค่า $U_{p\text{-}rw}$ =2812.11kV และทราบค่าแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบเป็นครึ่งหนึ่งของ $U_{p\text{-}rw}$ คือ $U^{+} = U^{-}$ =1406.06 kV และทราบค่า B =0.6 จากขั้นตอนการประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

คำนวณค่า U_0^{+} จากสมการที่ 3.42

$$U_0^{+} = U^{+}(1 + B) = 1406.06 \times (1 + 0.6) = 2249.7\text{kV}$$

คำนวณค่า U_{50} จากสมการ 3.43

$$U_{50} = \frac{U_0^{+}}{0.922} = \frac{2249.7}{0.922} = 2440.02\text{kV}$$

พิจารณา Parallel conductor configuration :

- Gap factor (K) ค่า 1.62

คำนวณค่า ระยะห่างระหว่างเฟสกับเฟส (d) จากสมการที่ 3.44

$$d = \frac{e^{\frac{U_{50}}{K \times 1080}} - 1}{0.46} = \frac{e^{\frac{2440.02}{1.62 \times 1080}} - 1}{0.46} = 6.59\text{m}$$

พิจารณา Rod-conductor configuration :

- Gap factor (K) ค่า 1.45

คำนวณค่า ระยะห่างระหว่างเฟสกับเฟส (d) จากสมการที่ 3.44

$$d = \frac{e^{\frac{U_{50}}{K \times 1080}} - 1}{0.46} = \frac{e^{\frac{2440.02}{1.45 \times 1080}} - 1}{0.46} = 8.15\text{m}$$

จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ทราบค่า มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าระหว่างเฟสกับดิน ค่า 1550 kV จากตารางที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง และค่าระยะห่างระหว่างเฟสกับเฟส (Phase-to-Phase clearance) ดังนี้

พิจารณา Parallel conductor configuration :

d = 7.6 m

พิจารณา Rod-conductor configuration :

d = 9.4 m

เมื่อพิจารณาค่าระยะห่างระหว่างเฟสกับเฟส (Phase-to-Phase clearance) ที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการเปิดตารางที่ 3.8 ตามมาตรฐาน ดังนั้นมาตรฐานแนะนำให้ทำการทดสอบแบบพิเศษ (Special Test)

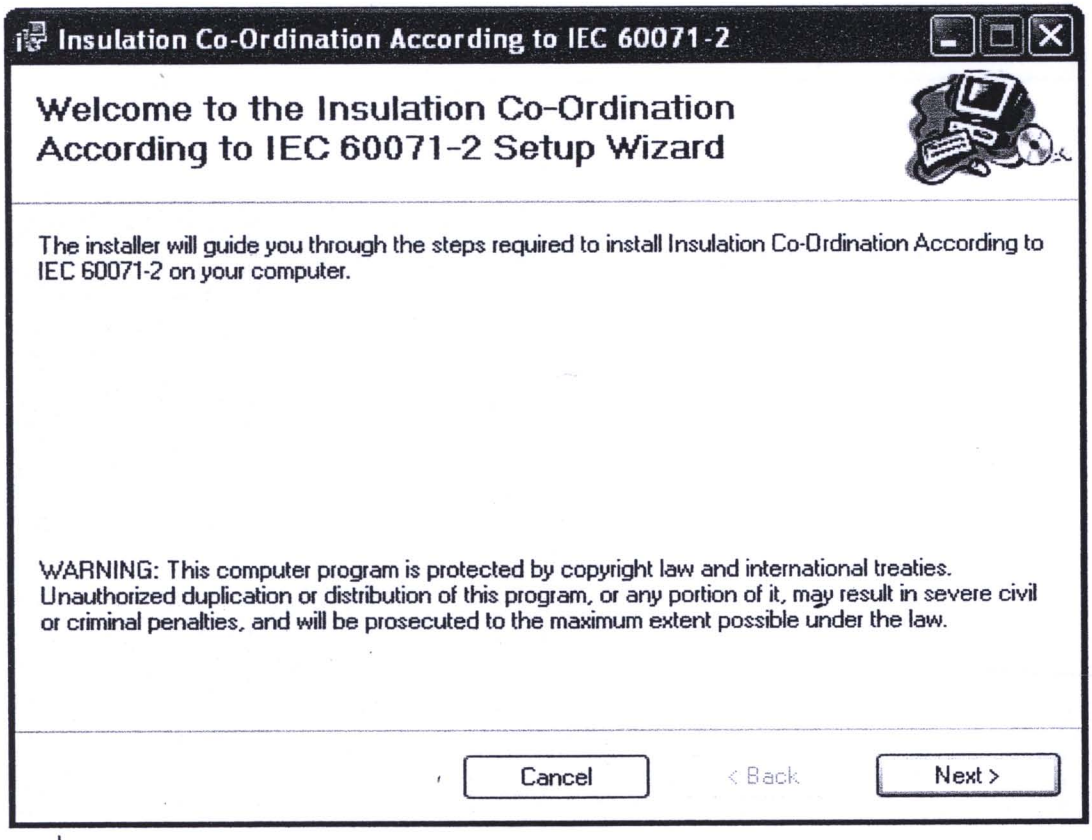
ภาคผนวก ข

การติดตั้งโปรแกรม

ขั้นตอนที่ 1 จากรูปที่ ข.1 คัดลอก Setup File ลงบน Desktop

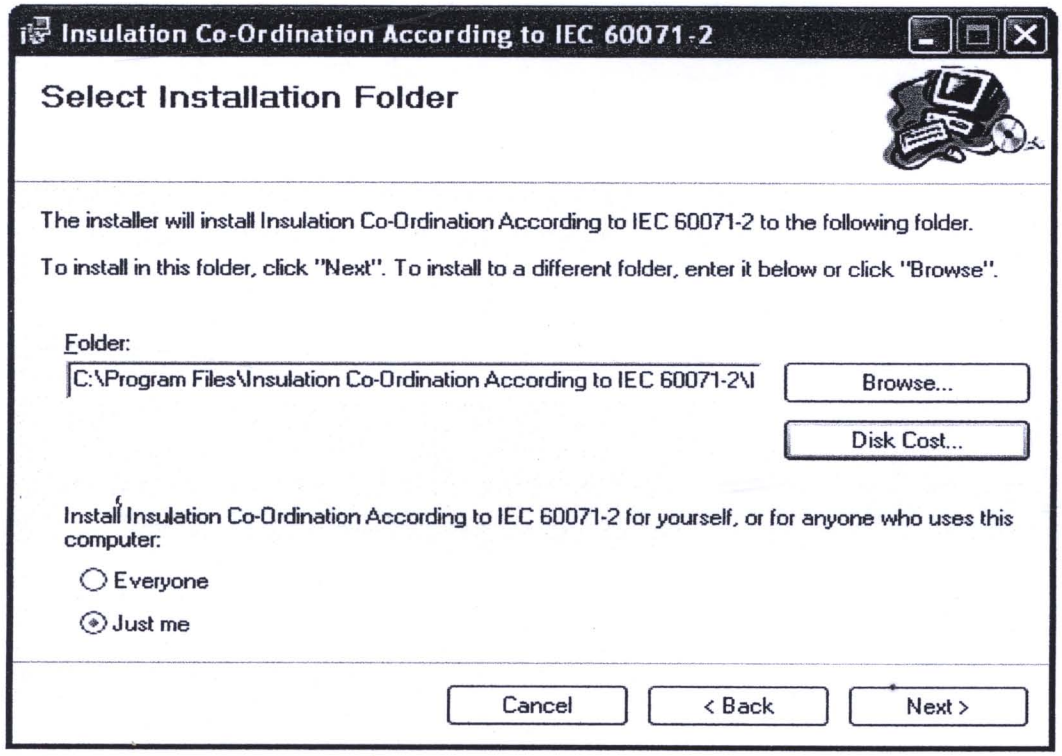
รูปที่ ข.1 Setup File

ขั้นตอนที่ 2 จากรูปที่ ข.2 Double Click ที่ Insulation Co-Ordination Setup File

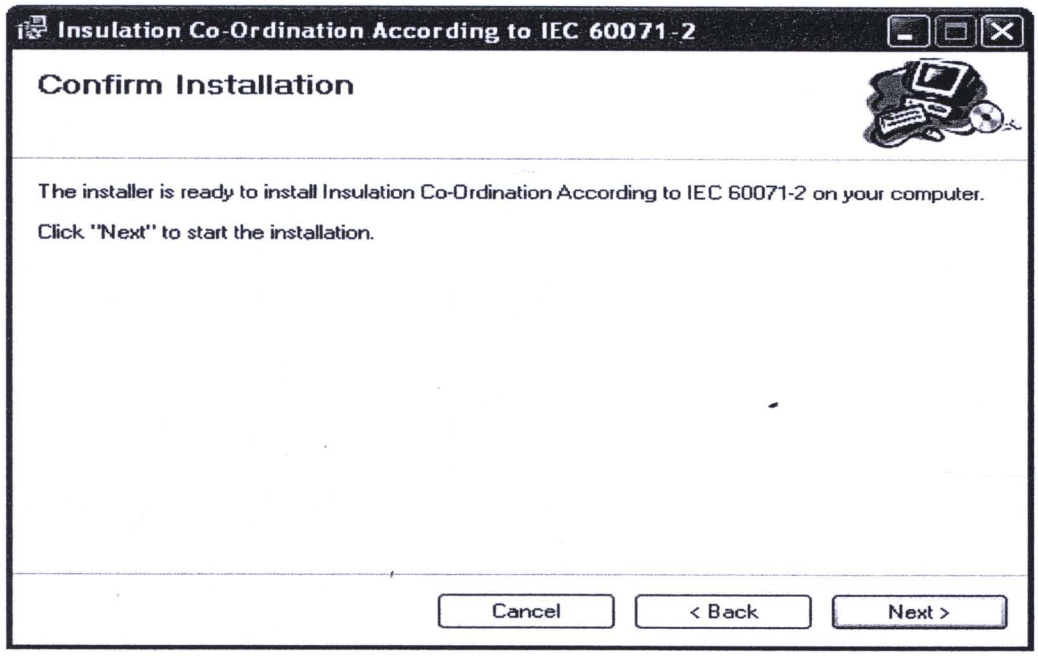


รูปที่ ข.2 Welcome to Insulation Co-Ordination According to IEC 60071-2 Setup Wizard

ขั้นตอนที่ 3 จากรูปที่ ข.2 เข้าสู่หน้า Welcome to Insulation Co-Ordination According to IEC 60071-2 Setup Wizard จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป



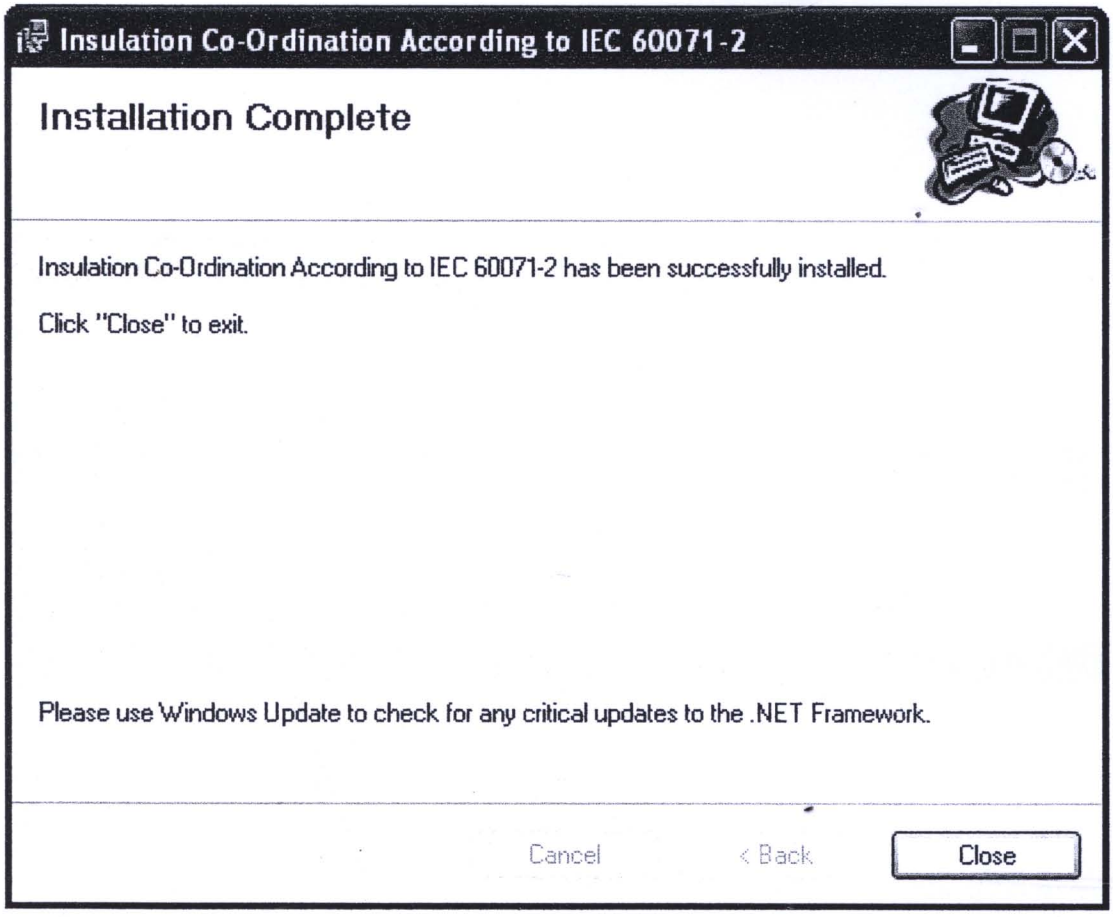
รูปที่ ข.3 Select Installation Folder



รูปที่ ข.4 Confirm Installation

ขั้นตอนที่ 4 จากรูปที่ ข.3 เข้าสู่หน้า Select Installation Folder เพื่อเลือกตำแหน่งที่จะทำการติดตั้ง โปรแกรม กรณีที่ผู้ใช้ไม่ได้เลือกตำแหน่งที่ต้องการจะติดตั้ง ตัวโปรแกรมจะเลือกให้โดยอัตโนมัติ คือ จะติดตั้งใน C:\Program Files และในส่วน Install Insulation Co-Ordination According to IEC 60071-2 for yourself, or for anyone who uses this Computer มี 2 ทางเลือก คือ Everyone และ Just me ให้ผู้ใช้เลือก Just me จากนั้นกดปุ่ม Next

ขั้นตอนที่ 5 จากรูปที่ ข.4 เข้าสู่หน้า Confirm Installation จากนั้นกดปุ่ม Next โปรแกรมจะเริ่มทำการติดตั้ง



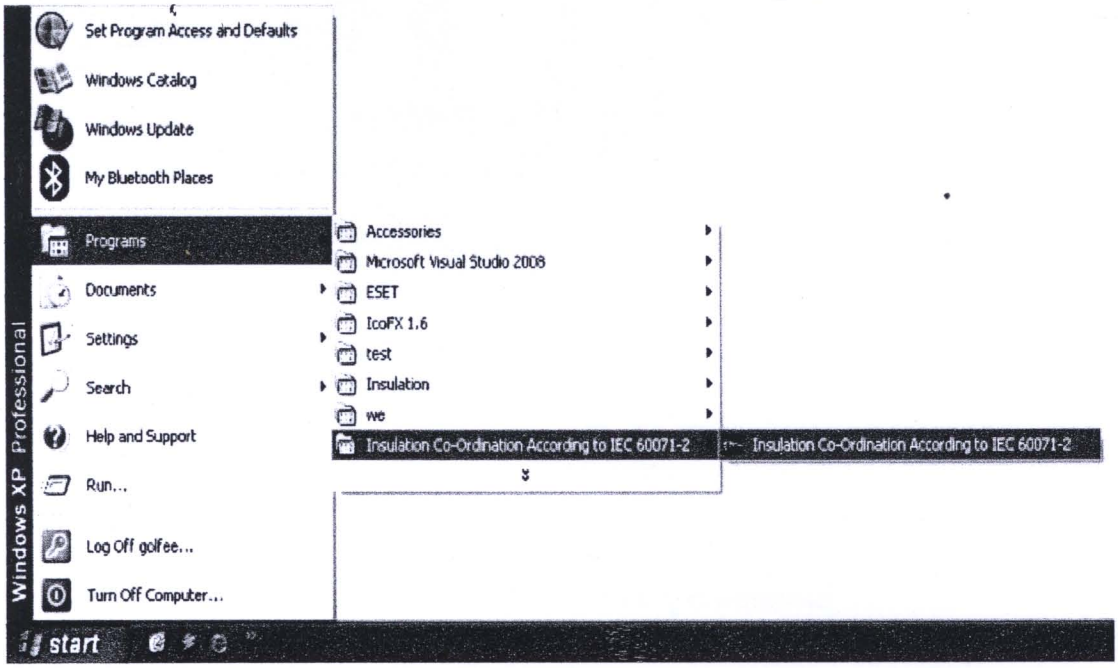
รูปที่ ข.5 Installation Complete

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ขั้นตอนที่ ข.5 จากรูปที่ 12 เข้าสู่หน้า Installation Complete คือ โปรแกรมทำการติดตั้งเสร็จสมบูรณ์จากนั้นกดปุ่ม Close เสร็จสิ้นการติดตั้งโปรแกรม

รูปที่ ข.6 Shortcut Insulation Co-Ordination

ขั้นตอนที่ 7 จากรูปที่ ข.6 เมื่อโปรแกรมทำการติดตั้งเสร็จสมบูรณ์ จะมี Shortcut Insulation Co-Ordination ขึ้นที่ Desktop โดยผู้ใช้งาน Double Click ที่ Shortcut Insulation Co-Ordination เพื่อเข้าใช้งานโปรแกรมได้ทันที



รูปที่ ข.7 การเรียกใช้งานโปรแกรมจาก Manu Start

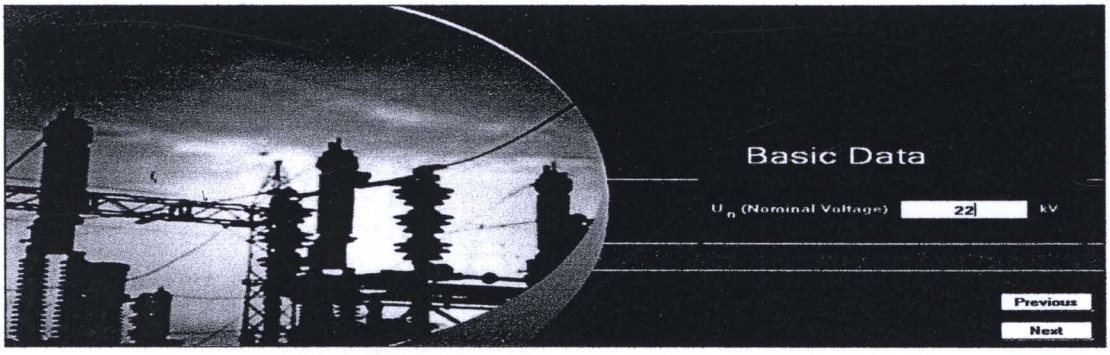
ขั้นตอนที่ 8 จากรูปที่ ข.7 เมื่อโปรแกรมทำการติดตั้งเสร็จสมบูรณ์ ผู้ใช้สามารถเรียกใช้งานโปรแกรมจาก Manu Start โดยเลือกหัวข้อ Program จากนั้นเลือก Folder ชื่อ Insulation Co-Ordination According to IEC 60071-2 จากนั้น Double Click ที่ Shortcut Insulation Co-Ordination According to IEC 60071-2 เพื่อเข้าใช้งานโปรแกรมได้ทันที

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรมการประสานสัมพันธ์ฉนวน

ค.1 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรมการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 22 kV ใน Range I (3.6 kV $\leq U_m \leq$ 36 kV)

ค.1.1 ข้อมูลเบื้องต้น



รูปที่ ค.1 ตัวอย่างการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันระบบ 22 kV

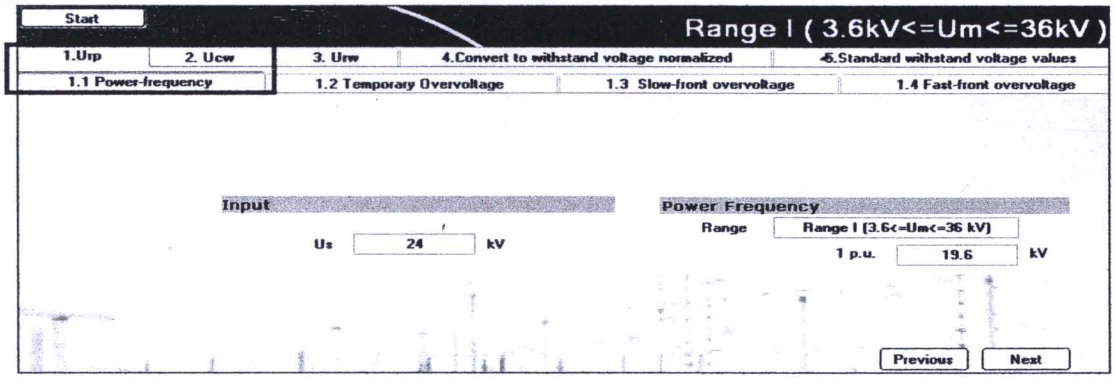
ตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวข้อง :

U_n คือ แรงดันระบุของระบบ

จากรูป ค.1 ในส่วนกรอบสีแดง ผู้ใช้งานป้อนค่าแรงดันระบุของระบบ (U_n) ตัวอย่างนี้คือ 22 kV หลังจากนั้น ผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

ค.1.2 ตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp})

ค.1.2.1 แรงดันเกินความถี่กำลัง



รูปที่ ค.2 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.1 Power-frequency

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

U_s คือ แรงดันสูงสุดของระบบ

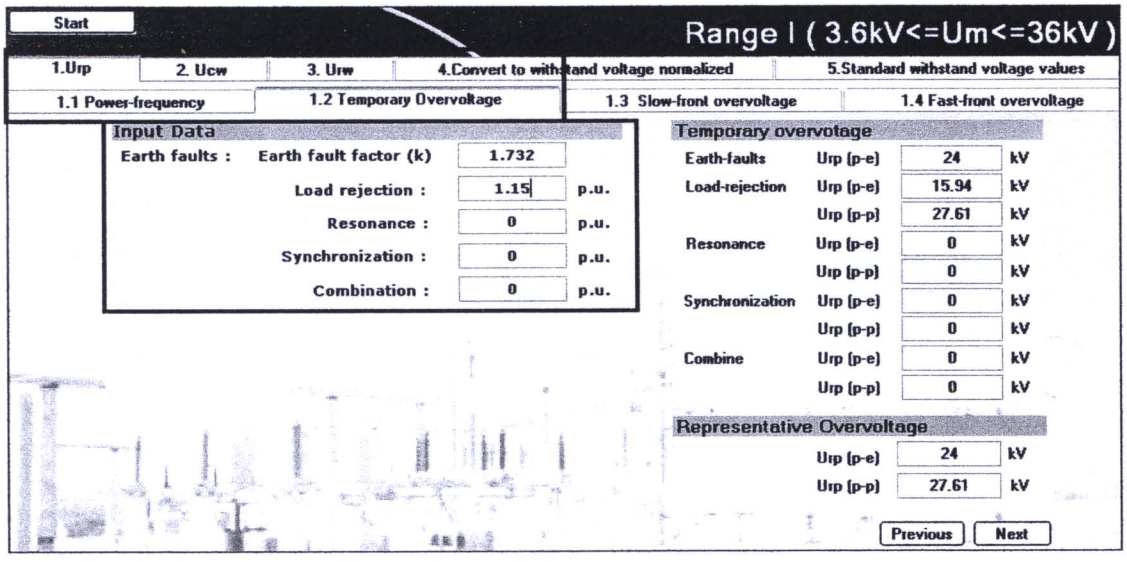
Range คือ ช่วงของแรงดันที่พิจารณา ซึ่งจะขึ้นกับ U_n ที่ผู้ใช้งานป้อน ซึ่งประกอบด้วย แรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$36 kV), แรงดันช่วงที่ 1 (52 kV$\leq U_m \leq$245 kV) และและแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV$\leq U_m \leq$800 kV)

1 *pu* คือ ค่าต่อหน่วย

จากรูปที่ ค.2 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 หัวข้อย่อย 1.1 Power Frequency เมื่อทราบค่า U_n จากหัวข้อ 4.1.1 โปรแกรมจะแสดงผล ดังนี้

- U_s คือ 24 kV พิจารณาจากตารางที่ 2.2
- แสดงว่าเป็นการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับช่วงที่ 1(3.6 kV$\leq U_m \leq$36 kV)
- ผลการคำนวณ 1 *pu* มีค่า 19.6 kV พิจารณาจากสมการที่ 3.2

ค.1.2.2 แรงดันเกินชั่วคราว



รูปที่ ค.3 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.2 Temporary Overvoltage

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

k คือ ตัวแปรความผิดพร่องลงดิน

U_{e2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับดินซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 %

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

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

จากรูปที่ ค.3 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.2 Temporary Overvoltage โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. ผู้ใช้ป้อนข้อมูล :

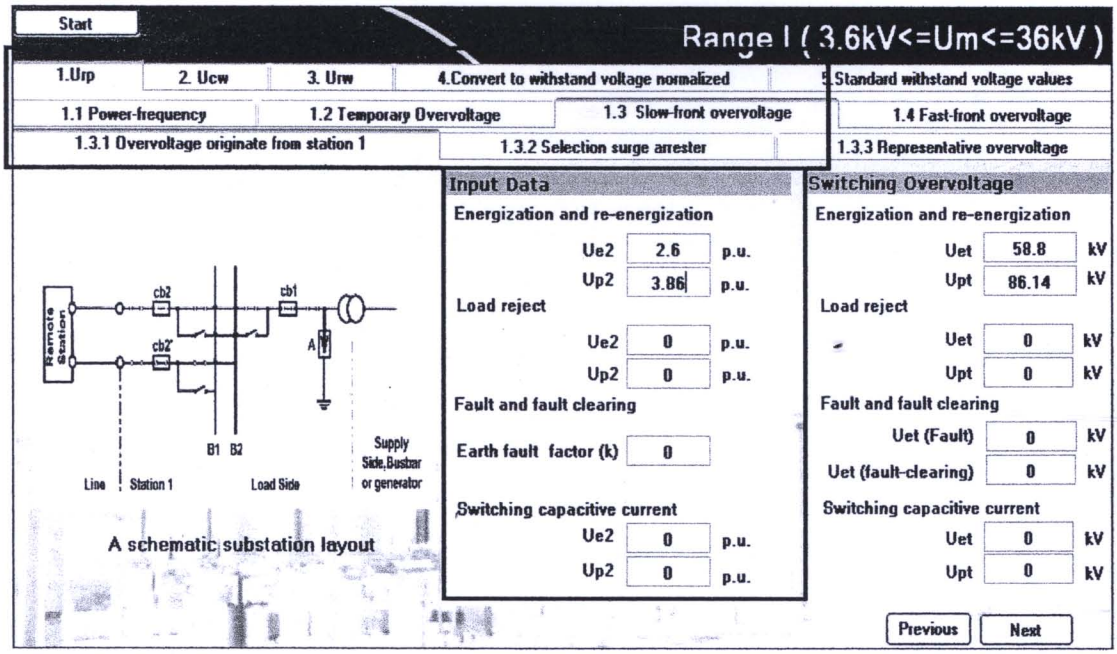
ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน พื้นที่สีชมพู คือ แหล่งกำเนิดแรงดันเกินที่สามารถเกิดขึ้นได้ (U_{e2}) เช่น ความผิดพร่องลงดิน การปลดโหลด แรโซแนน หรือ ผลรวมจากการเกิดหลายแหล่งกำเนิด ในตัวอย่างนี้เกิดความผิดพร่องลงดิน มีค่า k (ตัวแปรความผิดพร่องลงดิน) คือ 1.732 และเกิดการปลดโหลดเกิดแรงดันเกิน U_{e2} ขนาด 1.15 pu

2. ผลการคำนวณจากโปรแกรม :

- ในหัวข้อ Temporary Overvoltage แสดงผลจากการคำนวณแรงดันเกินชั่วคราวจากทุกแหล่งกำเนิด ($U_{rp}(p-e)$ และ $U_{rp}(p-p)$)

- ในหัวข้อ Representative Overvoltage โปรแกรมจะทำการเลือกค่า $U_{rp}(p-e)$ และ $U_{rp}(p-p)$ ที่มากที่สุดจากหัวข้อ Temporary Overvoltage มาแสดงผล ในที่นี้คือ $U_{rp}(p-e)$ มีค่า 24 kV และ $U_{rp}(p-p)$ มีค่า 27.61 kV จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

ค.1.2.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า



รูปที่ ค.4 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.1 Overvoltage originate from station 1

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

U_{e2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับดินซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 %

U_{p2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟสซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 %

k คือ ตัวแปรความผิดพร่องลงดิน

U_{et} คือ ค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับดิน

U_{pt} คือ ค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับเฟส

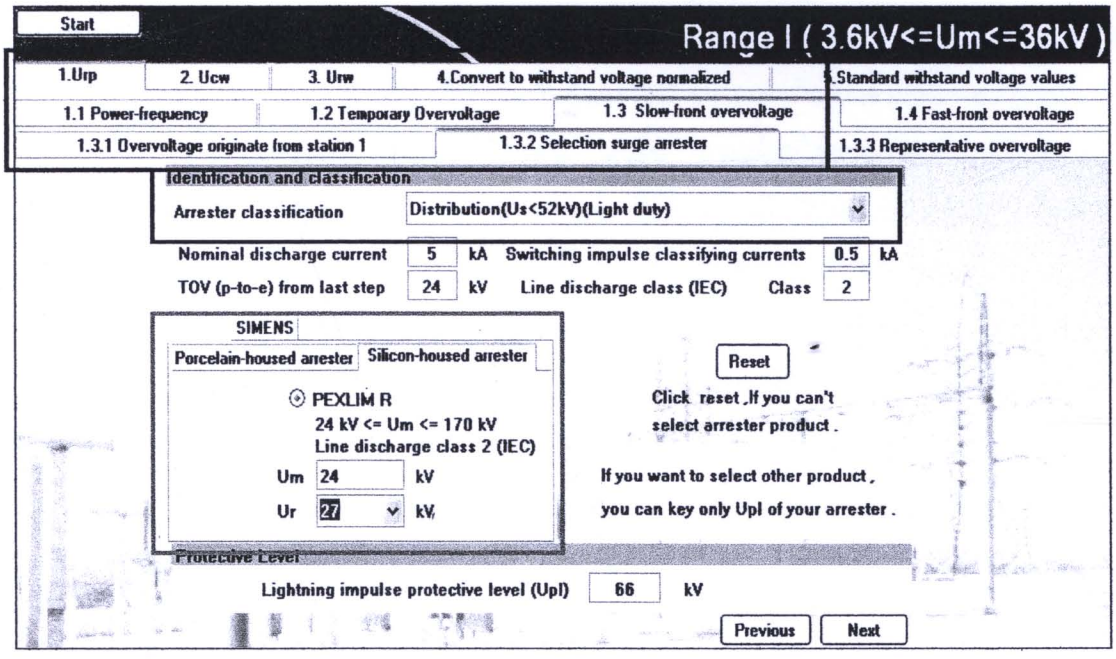
จากรูปที่ ค.4 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.1 Overvoltage originate station 1 โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. ผู้ใช้ป้อนข้อมูล :

ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน พื้นสีชมพู ผู้ใช้งานป้อนค่าแหล่งกำเนิดแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าที่สามารถเกิดขึ้นได้ คือ Energization and Re-Energization, Load Reject, Fault and Fault Clearing และ Switching Capacitive Current ตัวอย่างนี้สมมุติเกิด Energization and Re-Energization มีค่า U_{e2} มีค่า 2.6 pu และ U_{p2} มีค่า 3.86 pu

2. ผลการคำนวณจากโปรแกรม :

โปรแกรมแสดงผลการคำนวณค่า U_{et} และU_{pt} จากผลของ Energization and Re-Energization คือ U_{et} มีค่า 58.8 kV และค่า U_{pt} มีค่า 86.14 kV จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป



รูปที่ ค.5 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.2 Selection surge arrester

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

กระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (I_n) พิจารณาจากตารางที่ 3.1

ระดับการถ่ายเทประจุในสาย (line discharge class) พิจารณาจากตารางที่ 3.2

ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ (switching impulse classifying current) พิจารณาจากตารางที่ 3.3

U_m คือ แรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์

U_r คือ พิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จ

U_{pl} คือ ระดับการป้องกันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของกับดักเสิร์จ

U_{ps} คือ ระดับการป้องกันสวิตชิงอิมพัลส์ของกับดักเสิร์จ

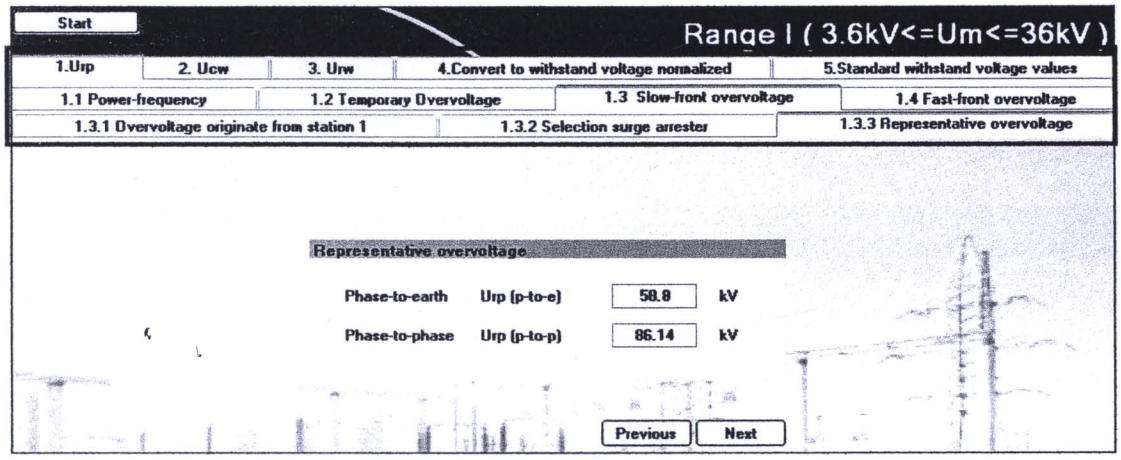
จากรูปที่ ค.5 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.2 Selection surge arrester มีรายละเอียดดังนี้

- ในส่วนกรอบสีน้ำเงินพื้นสีชมพู หัวข้อ Identificaiton and Classification เมื่อผู้ใช้งานเลือก Arrester Classification โปรแกรมจะแสดงค่ากระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (I_n) ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ (switching impulse classifying current), ระดับการถ่ายเทประจุในสาย (line discharge class) และแสดงค่าแรงดันเกินชั่วคราวระหว่างเฟสกับดินจากขั้นตอนที่ 1.2

- ตัวอย่างนี้สมมุติเลือก Arrester Classification คือ Distribution ($U_s \leq 52\text{kV}$) (Light duty) โปรแกรมจะทำการเลือกค่ากระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (I_n) มีค่า 5 kA, ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ (switching impulse classifying current) มีค่า 0.5 kA และ $TOV(p-e)$ มีค่า 212.18 kV ซึ่งเป็นค่าแรงดันกันชั่วคราวระหว่างเฟสกับดินจากขั้นตอนก่อนหน้านี้

- ในส่วนกรอบสีเขียวพื้นสีชมพู หัวข้อ การเลือกใช้งานผลิตภัณฑ์กับดักเสิร์จ ผู้ใช้งานสามารถเลือกบริษัท ABB หรือ SIMENS ซึ่งทั้งสองผลิตภัณฑ์ครอบคลุมการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 จากนั้นผู้ใช้งานสามารถเลือกชนิดของกับดักเสิร์จได้ว่าเป็นชนิด Porcelain-Housing Arrester หรือ Silicon-Housing Arrester เมื่อผู้ใช้งานเลือกรุ่นของกับดักเสิร์จ โปรแกรมจะทำการเลือก U_m ของกับดักเสิร์จที่สามารถใช้งานได้ จากนั้นโปแกรมจะแสดงค่า U_r ที่สามารถเลือกใช้งานได้ ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันเกินชั่วคราวระหว่างเฟสกับดิน ซึ่งผู้ใช้งานจะต้องทำการเลือกค่า U_r ซึ่งมีหลายค่าให้เลือกขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน หลังจากนั้นในหัวข้อ Protective Level โปรแกรมจะแสดงผลค่า U_{pl} และ U_{ps}

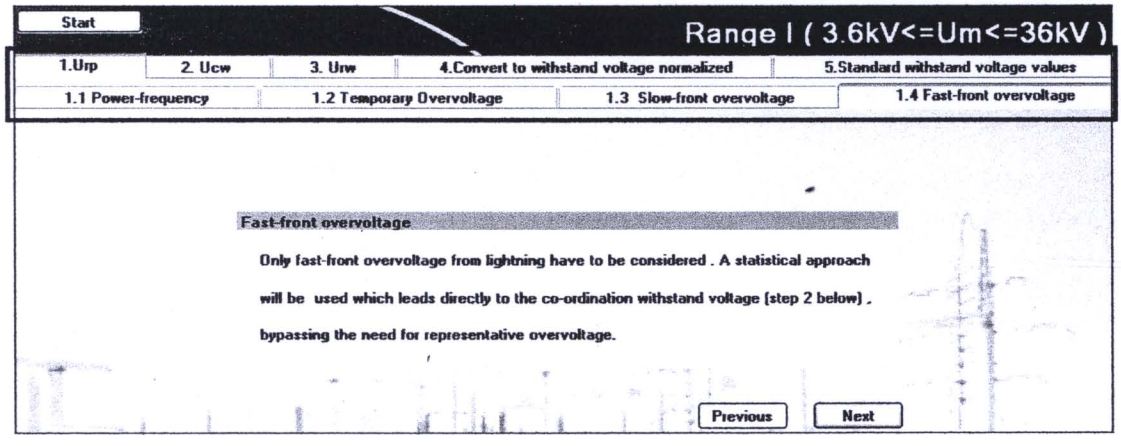
- ตัวอย่างนี้สมมุติเลือก กับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ ABB ชนิด Silicon-Housing Arrester รุ่น PEXLIM-R โปรแกรมจะแสดงผลการเลือกค่า U_m ของกับดักเสิร์จ มีค่า 24 kV ตัวอย่างนี้สมมุติเลือก U_r มีค่า 27 kV โปรแกรมจะแสดงผลค่า U_{pl} มีค่า 66 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป



รูปที่ ค.6 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.3 Representative Overvoltage

จากรูปที่ ค.6 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.3 Representative Overvoltage โปรแกรมแสดงผลการคำนวณค่า Representative Overvoltage สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า (Slow-Front Overvoltage) คือ $U_{rp}(p-e)$ มีค่า 58.8 kV และ $U_{rp}(p-p)$ มีค่า 86.14 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

ข.1.2.4 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

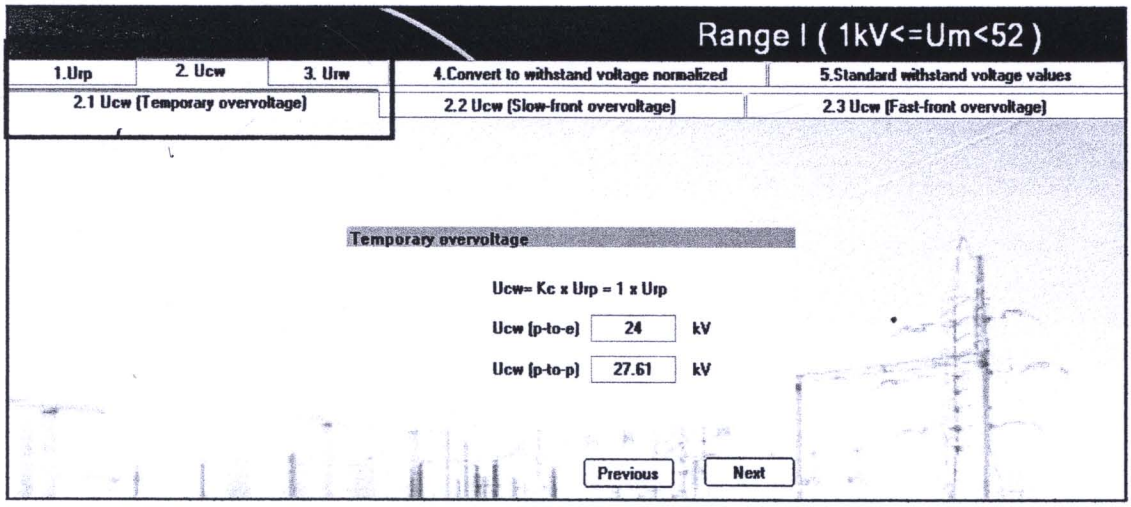


รูปที่ ค.7 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.4 Fast-front overvoltage

จากรูปที่ ค.7 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.4 Fast-front overvoltage โปรแกรมแสดงข้อความอธิบายว่า แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วจะพิจารณาในขั้นตอนที่ 2 U_{cw} ของการประสานสัมพันธ์ฉนวน จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

ค.1.3 แรงดันเกินที่ใช้ในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw})

ค.1.3.1 แรงดันเกินชั่วคราว



รูปที่ ค.8 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1 U_{cw} (Temporary Overvoltage)

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

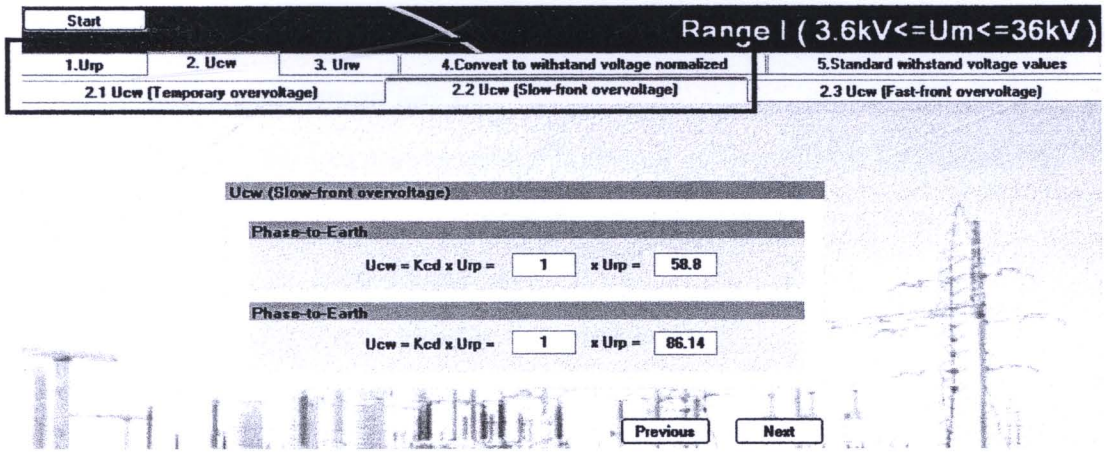
K_c คือ ตัวแปรในการประสานสัมพันธ์ฉนวน

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

$U_{cw}(p-p)$ คือ ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟสสำหรับแรงดันเกินชั่วคราว

จากรูปที่ ค.8 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1 U_{cw} (Temporary Overvoltage) โปรแกรมแสดงผลการคำนวณค่า U_{cw} จากสมการที่แสดง เมื่อทราบค่า U_{rp} จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ จากตัวอย่างนี้ $U_{cw}(p-e)$ มีค่า 24 kV และ $U_{cw}(p-p)$ มีค่า 27.61 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

ค.1.3.2 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า



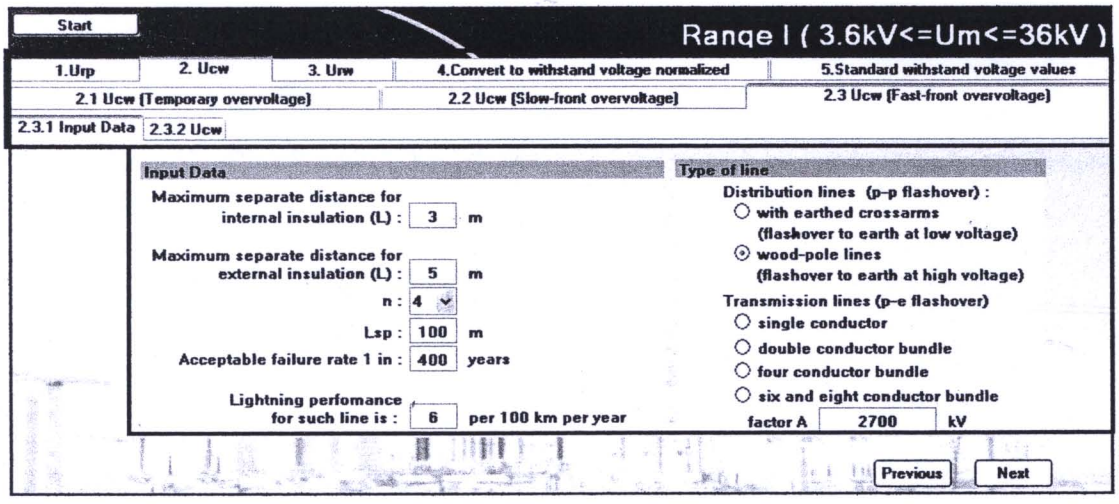
รูปที่ ค.9 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2 U_{cw} (Slow-Front Overvoltage)

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

K_{cd} คือ Deterministic co-ordination factor

จากรูปที่ ค.9 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2 U_{cw} (Slow-Front Overvoltage) โปรแกรมแสดงผลการคำนวณค่า U_{cw} จากสมการที่แสดง เนื่องจากทราบค่า U_{rp} จากขั้นตอนที่ 1 จากตัวอย่างนี้ได้ค่า $U_{cw}(p-e)$ = 58.8 kV และ $U_{cw}(p-p)$ = 86.14 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

ข.1.3.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว



รูปที่ ค.10 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.3.1 ข้อมูล Input สำหรับ U_{cw} (Slow-Front Overvoltage)

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

L คือ ระยะห่างระหว่างกับดักเสิร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน สำหรับฉนวนภายในและฉนวนภายนอก (m)

n คือ จำนวนของสายส่งเหนือศีรษะต่อไปยังสถานีไฟฟ้า ในการหาค่าของขนาดเสิร์จที่มาปะทะ

L_{sp} คือ ความยาวช่วง (m)

R_a คือ อัตราการล้มเหลวที่ยอมรับของอุปกรณ์ เมื่อพิจารณาสำหรับสายส่ง ตัวแปรโดยปกติจะเขียนในรูป (1/years)

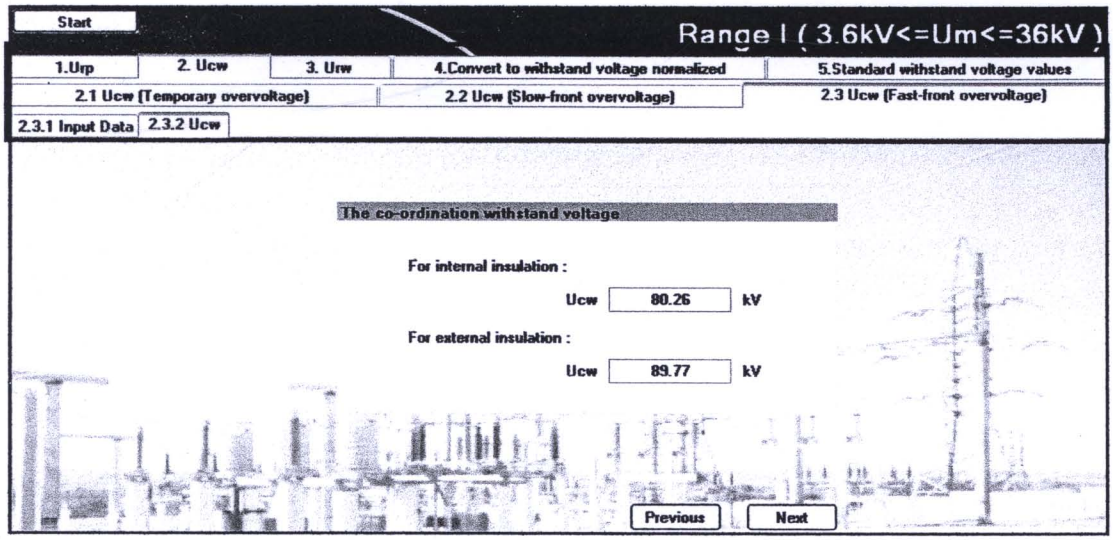
R_{km} คือ อัตราการขัดข้องของสายส่งเหนือศีรษะต่อปี สำหรับการออกแบบต่อหนึ่งกิโลเมตรแรก ในส่วนหน้าของสถานีไฟฟ้า โดยตัวแปรจะเขียนในรูป(1/km/year)

A คือ ตัวแปรแสดงคุณลักษณะของสายส่งพิจารณาตามตารางที่ 3.5

จากรูปที่ ค.10 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} .หัวข้อย่อย 2.3.1 ผู้ใช้งานป้อนข้อมูล สำหรับคำนวณค่า U_{cw} (Fast-Front Overvoltage) พิจารณาในส่วนกรอบสีน้ำเงิน ผู้ใช้งานต้องป้อนข้อมูล ตัวอย่างนี้สมมุติ

- L สำหรับฉนวนภายใน ค่า 3 m
- L สำหรับฉนวนภายนอก ค่า 5 m
- n มีค่า 4
- L_{sp} มีค่า 100 m
- R_a มีค่า 1 in 400 years
- R_{km} มีค่า 6 per 100 km. year
- เลือกชนิดของสายส่งจากตารางที่ 3.5 ตัวอย่างนี้สมมุติเลือก Wood pole lines ตัวแปร A มีค่า 2500

เมื่อผู้ใช้ป้อนข้อมูลอินพุตเสร็จสิ้น กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

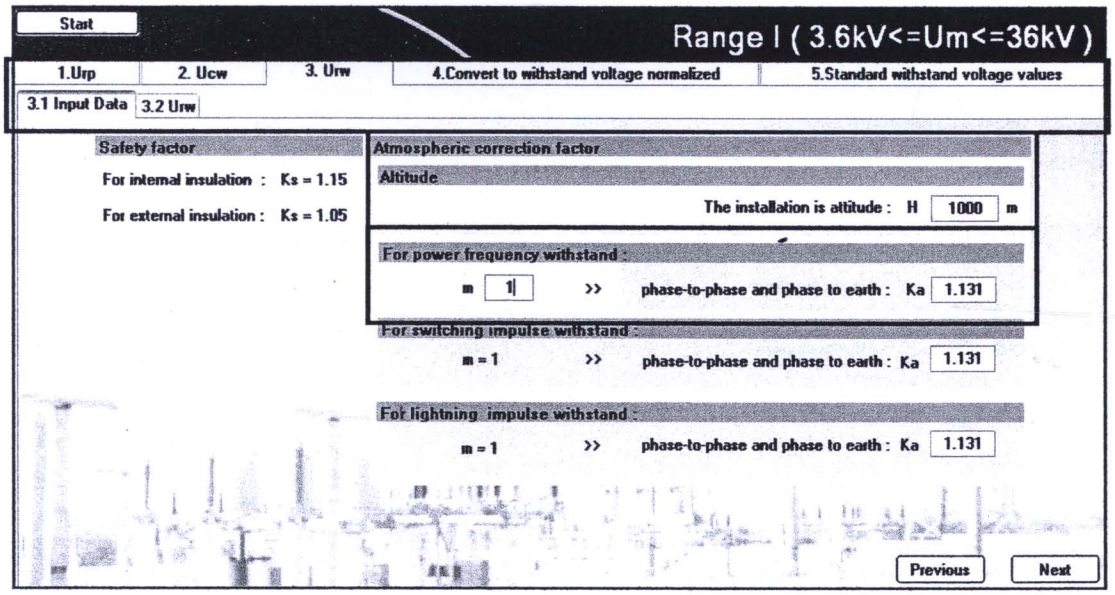


รูปที่ ค.11 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.3.2 ผลการคำนวณ U_{cw} (Slow-Front Overvoltage)

จากรูปที่ ค.11 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.3.2 โปรแกรมแสดงผลการคำนวณ U_{cw} (Slow-Front Overvoltage) สำหรับฉนวนภายในมีค่า 80.26 kV และ ค่า U_{cw} สำหรับฉนวนภายนอกมีค่า 89.77 kV

ค.1.4 ความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw})

ค.1.4.1 ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องป้อนค่า



รูปที่ ค.12 ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.1 ข้อมูล Input สำหรับการคำนวณ U_{rw}

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

H คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล

K_a คือ ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ

K_s คือ ตัวแปรความปลอดภัย

m คือ ตัวแปรยกกำลังใช้เพื่อคำนวณ K_a สำหรับฉนวนภายนอก

จากรูปที่ ค.12 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.1 ผู้ใช้งานป้อนข้อมูลสำหรับการคำนวณ U_{rw} ตัวอย่างนี้สมมุติ

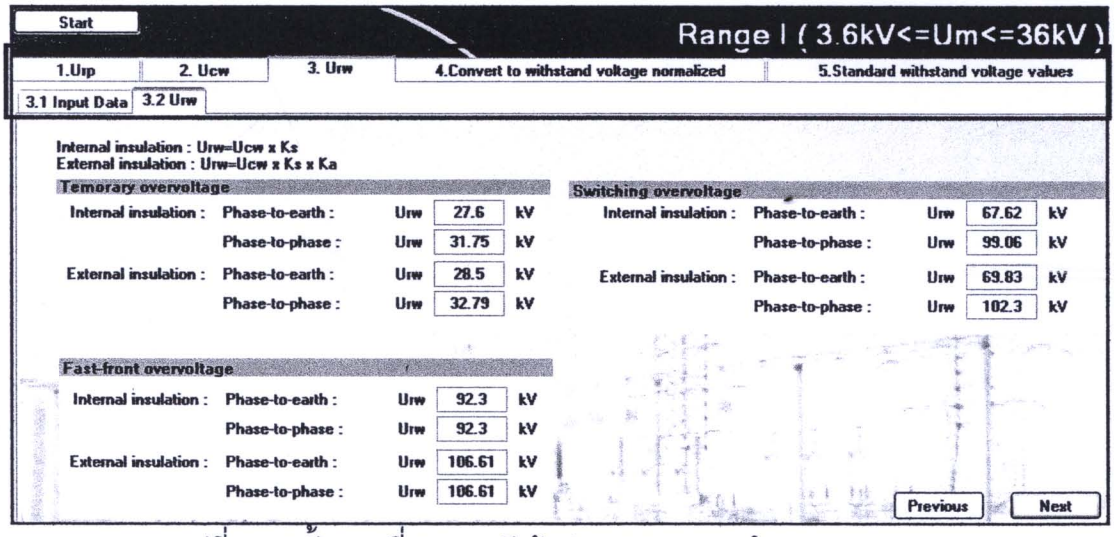
- ในส่วนกรอบสีน้ำเงินพื้นสีชมพู ผู้ใช้งานป้อนค่า H ตัวอย่างนี้สมมุติ H มีค่า 1000 m

- ในส่วนกรอบสีชมพู ผู้ใช้งานต้องป้อนค่า m สำหรับ Power Frequency ซึ่งจะขึ้นกับสภาพมลภาวะของฉนวน ถ้าฉนวนมีสภาพสกปรกค่า m มีค่า 0.5 ถ้าฉนวนมีสภาพสะอาด m มีค่า 1 ตัวอย่างนี้สมมุติ m มีค่า 1 เมื่อพิจารณา m ของสวิตชิงอิมพัลส์ (Switching Impulse) และอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) มีค่าคงที่ คือ 1 เมื่อทราบค่าตัวแปร m โปรแกรมจะคำนวณค่า K_a

- K_s เป็นค่าคงที่ สำหรับฉนวนภายใน K_s มีค่า 1.15 และสำหรับฉนวนภายนอก K_s มีค่า 1.05

เมื่อผู้ใช้ป้อนข้อมูลอินพุตเสร็จสิ้น กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

ค.1.4.2 ผลการคำนวณค่า U_{rw}



รูปที่ ค.13 ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.2 ผลการคำนวณ U_{rw}

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

$U_{rw}(p-e)$ คือ ความคงทนแรงดันที่ต้องการระหว่างเฟสกับดิน

$U_{rw}(p-p)$ คือ ความคงทนแรงดันที่ต้องการระหว่างเฟสกับเฟส

จากรูปที่ ค.13 ในกรอบสีแดง ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.2 แสดงผลการคำนวณ U_{rw} คือ

Temporary Overvoltage :

ฉนวนภายใน

$U_{rw}(p-e)$ = 27.6 kV

$U_{rw}(p-p)$ = 31.75 kV

ฉนวนภายนอก

$U_{rw}(p-e)$ = 28.5 kV

$U_{rw}(p-p)$ = 32.79 kV

Fast-Front Overvoltage :

ฉนวนภายใน

$U_{rw}(p-e)$ =92.3 kV

$U_{rw}(p-p)$ =92.3 kV

ฉนวนภายนอก

$U_{rw}(p-e)$ = 106.61 kV

$U_{rw}(p-p)$ = 106.61 kV

Swiching Overvoltage :

ฉนวนภายใน

$U_{rw}(p-e)$ = 67.62 kV

$U_{rw}(p-p)$ = 99.06 kV

ฉนวนภายนอก

$U_{rw}(p-e)$ = 69.83 kV

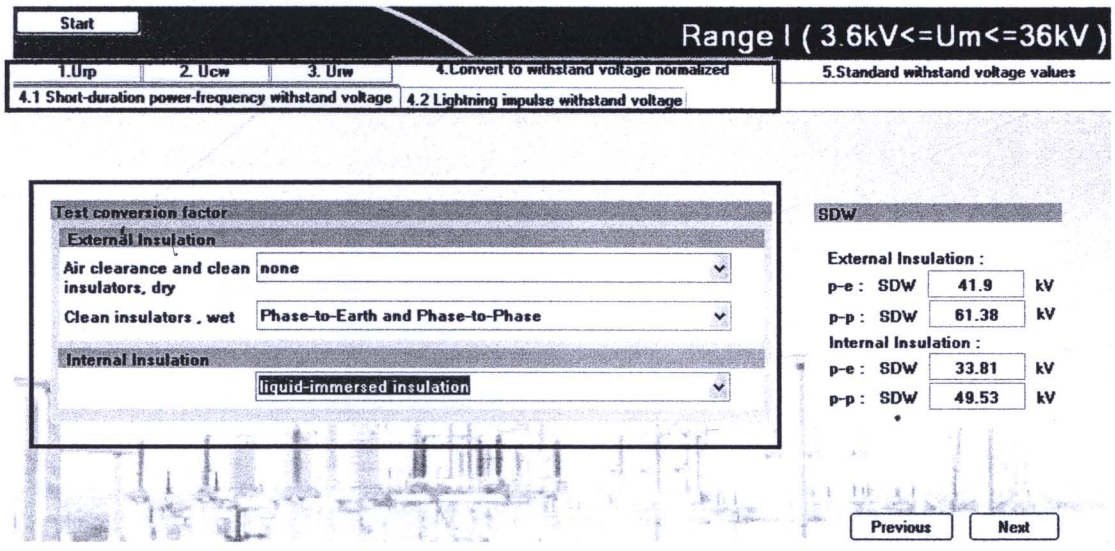
$U_{rw}(p-p)$ =102.3 kV

จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

ค.1.5 Conversion to withstand voltages normalized

U_{rw} สำหรับความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงที่ต้องการ เปลี่ยนรูปไปยังความคงทนแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (SDW) และ ไปยังความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW) โดยใช้ตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion factor) คูณกับ U_{rw} สำหรับ ความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงที่ต้องการ

ค.1.5.1 *SDW*



รูปที่ ค.14 ขั้นตอนที่ 4 Conversion to withstand voltage normalized หัวข้อย่อย 4.1 *SDW*

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

SDW คือ มาตรฐานความคงทนแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น

Test Conversion factor คือ ตัวแปรที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบสำหรับฉนวนภายนอก และฉนวนภายใน

จากรูปที่ ค.14 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 4 Conversion to withstand voltage normalized หัวข้อย่อย 4.1 *SDW* ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. ผู้ใช้งานป้อนค่า :

- ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน ผู้ใช้งานเลือกค่าตัวแปรที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับระหว่างเฟสกับดิน และระหว่างเฟสกับเฟส ผู้ใช้สามารถเลือกเป็น Air clearance and clean insulator ,dry หรือ Clean insulator, wet สำหรับฉนวนภายใน สำหรับระหว่างเฟสกับดิน และระหว่างเฟสกับเฟส ผู้ใช้สามารถเลือกเป็น GIS, Liquid immersed insulation หรือ Solid Insulation

- ตัวอย่างนี้สมมุติ เลือกตัวแปรที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับระหว่างเฟสกับดิน และระหว่างเฟสกับเฟส คือ Clean insulator, wet และสำหรับฉนวนภายใน สำหรับระหว่างเฟสกับดิน เลือกเป็น Liquid immersed insulation

2. ผลการคำนวณจากโปรแกรม :

เมื่อผู้ใช้งานป้อนข้อมูลข้างต้นแล้วเสร็จ โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณ *SDW* โดยพิจารณาแยกระหว่างฉนวนภายนอก และฉนวนภายใน ดังนี้

- ฉนวนภายนอก

SDW(p - e) มีค่า 41.9 kV

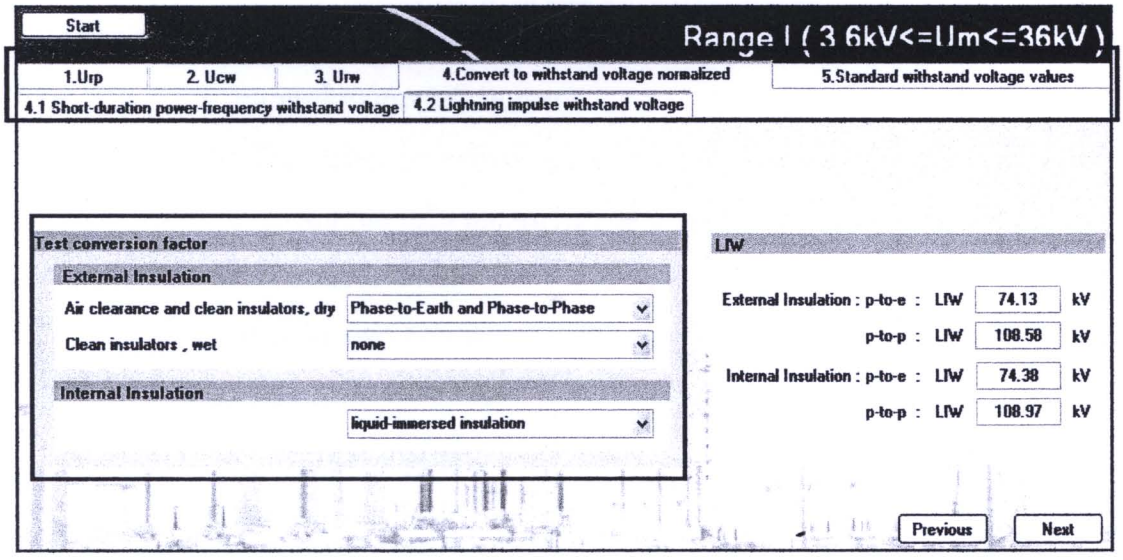
SDW(p - p) มีค่า 59.44kV

- ฉนวนภายใน

SDW(p - e) มีค่า 33.81kV

SDW(p - p) มีค่า 49.53 kV

ค.1.5.2 ***LIW***



ภาพที่ ค.15 ขั้นตอนที่ 4 Conversion to withstand voltage normalized หัวข้อย่อย 4.2 *LIW*

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

LIW คือ มาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

จากรูปที่ ค.15 ขั้นตอนที่ 4 Conversion to withstand voltage normalized หัวข้อย่อย 4.2 *LIW* ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. ผู้ใช้งานป้อนค่า :

- ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน ผู้ใช้ทำการเลือกค่าตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับระหว่างเฟสกับดิน และระหว่างเฟสกับเฟส ผู้ใช้สามารถเลือกเป็น Air clearance and clean insulator ,dry หรือ Clean insulator, wet สำหรับฉนวนภายใน สำหรับระหว่างเฟสกับดิน และระหว่างเฟสกับเฟส ผู้ใช้สามารถเลือกเป็น GIS, Liquid immersed insulation หรือ Solid Insulation

- ตัวอย่างนี้สมมุติ เลือก ตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับระหว่างเฟสกับดิน และระหว่างเฟสกับเฟส เป็น Air clearance and clean insulator ,dry และสำหรับฉนวนภายใน สำหรับระหว่างเฟสกับดิน เลือกเป็น Liquid immersed insulation

2. ผลการคำนวณจากโปรแกรม :

เมื่อผู้ใช้งานป้อนข้อมูลข้างต้นแล้วเสร็จ โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณ *LIW* โดยพิจารณาแยกระหว่างฉนวนภายใน และฉนวนภายนอก ดังนี้

- สำหรับฉนวนภายนอก

LIW(p - e) มีค่า 74.13kV

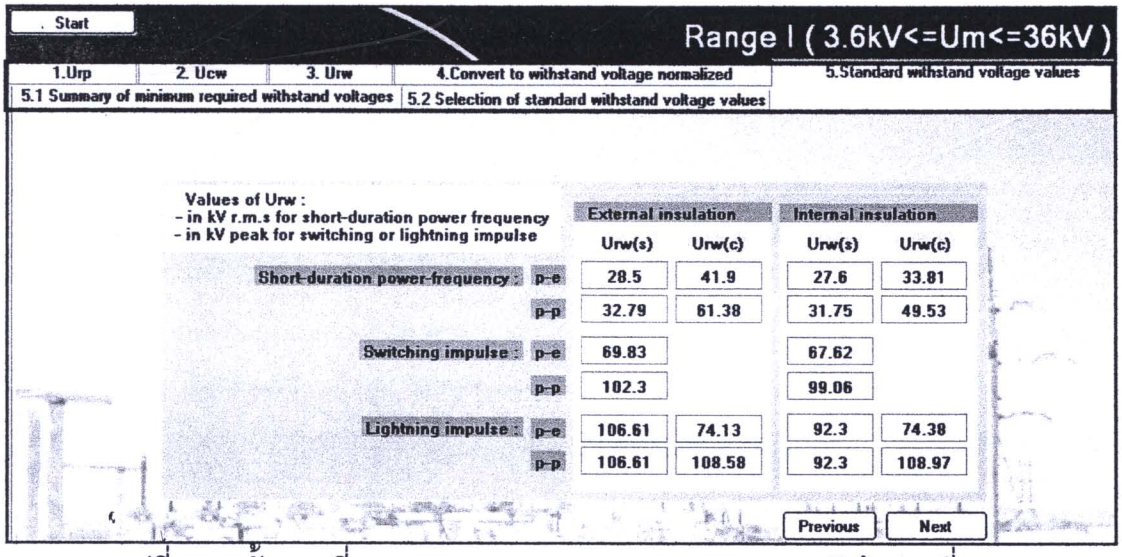
LIW(p - p) มีค่า 108.58kV

- สำหรับฉนวนภายใน

LIW(p - e) มีค่า 74.38 kV

LIW(p - p) มีค่า 108.97 kV

ค.1.6 การเลือกค่าความคงทนแรงดัน U_w



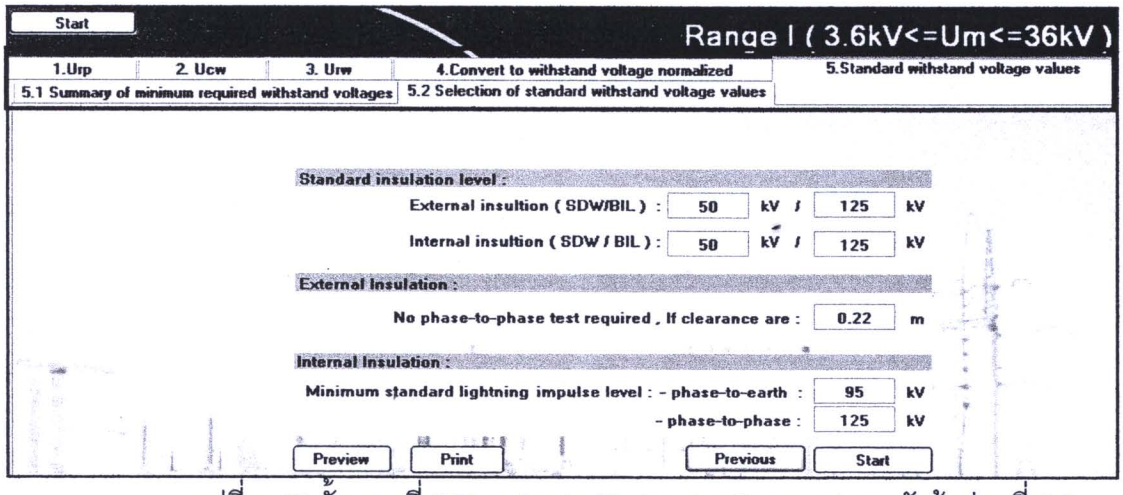
รูปที่ ค.16 ขั้นตอนที่ 5 Standard withstand voltage values หัวข้อย่อยที่ 5.1

Summary of minimum required withstand voltages

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

$U_{rw(s)}$ คือ ความคงทนแรงดันที่ต้องการ จากขั้นตอนที่ 3 ของการประสานสัมพันธ์ฉนวน

$U_{rw(c)}$ คือ การเปลี่ยนรูปของความคงทนแรงดันที่ต้องการจากขั้นตอนที่ 4 ของการประสานสัมพันธ์ฉนวน



รูปที่ ค.17 ขั้นตอนที่ 5 Standard withstand voltage values หัวข้อย่อยที่ 5.2

Selection of standard withstand voltage values

จากรูปที่ ค.17 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 5 Standard withstand voltage values หัวข้อย่อยที่ 5.2 Selection of standard withstand voltage values แสดงการเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับฉนวนภายใน และฉนวนภายนอก ส่วนที่ 2 แสดงระยะห่างระหว่างเฟสกับเฟส (p-p Clearance) สำหรับฉนวนภายนอก และส่วนที่ 3 แสดงค่าน้อยที่สุดของมาตรฐานระดับอิมพัลส์ฟ้าผ่า(BIL) สำหรับระหว่างเฟสกับดิน และระหว่างเฟสกับเฟส

ส่วนที่ 1 : จากรูปที่ ค.17 BIL ระหว่างเฟสกับเฟส

จากรูปที่ ค.16 พิจารณาฉนวนภายใน ระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับ SDW $U_{rw(s)}$= 31.75 kV และพิจารณาอิมพัลส์ฟ้าผ่าระหว่างเฟสกับเฟส $U_{rw(s)}$= 92.3 kV และ $U_{rw(c)}$ =, 108.97 kV เลือกค่าสูงสุด คือ $U_{rw(c)}$ พิจารณาจากตารางที่ 2.2 ที่ U_m =24 kV เลือก SDW = 50 kV และ BIL =125 kV

ส่วนที่ 2 : จากรูปที่ ค.17 ระยะห่างสำหรับระหว่างเฟสกับเฟสของฉนวนภายนอก

จากรูปที่ ค.17 เมื่อทราบค่า BIL = 125 kV จากนั้นพิจารณาจากตารางที่ 3.6 เพื่อเลือกค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างเฟสกับเฟส คือ 0.22 เมตร

ส่วนที่ 3: จากรูปที่ ค.17 BIL ระหว่างเฟสกับดินสำหรับฉนวนภายใน

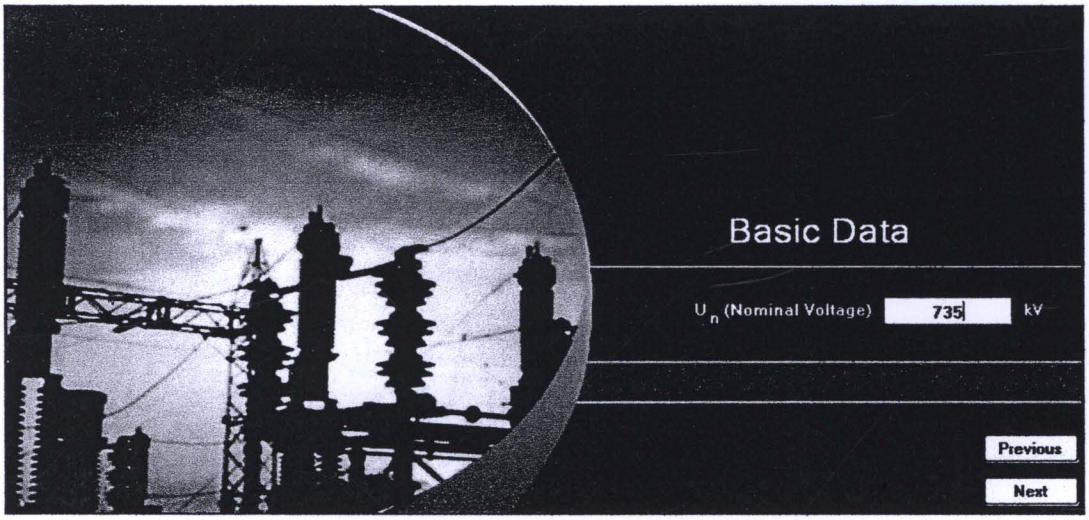
จากรูปที่ ค.16 พิจารณาอิมพัลส์ฟ้าผ่าระหว่างเฟสกับดินอยู่ระหว่าง $U_{rw(c)}$ = 74.38 kV และ $U_{rw(s)}$= 92.3 kV เลือกค่าที่สูงสุด คือ $U_{rw(s)}$ พิจารณาจากตารางที่ 2.2 ที่ U_m = 24 kV เลือก BIL ค่าน้อยสุด คือ 95 kV

สิ่งที่ต้องสังเกต คือ ค่า BIL ของอุปกรณ์จากโปรแกรมกำหนดเป็น 95 kV แทนที่ควรจะเป็น 125 kV ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ตามปกติ ค่า 95 kV เป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณซึ่งจะขึ้นกับความถูกต้องของข้อมูลอินพุต สิ่งที่เราต้องตรวจสอบ คือ ข้อมูลอินพุตที่ได้มาถูกต้องหรือไม่

ค.2 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม ประสานสัมพันธ์ฉนวน สำหรับสถานีไฟฟ้าในระบบ 735 kV ใน Range II ($300\text{kV} \leq U_m \leq 800\text{kV}$)

ค.2.1 ข้อมูลเบื้องต้น

จากรูปที่ ค.19 พิจารณาการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันระบบ 735 kV



รูปที่ ค.18 พิจารณาแรงดันระบบ 735 kV

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

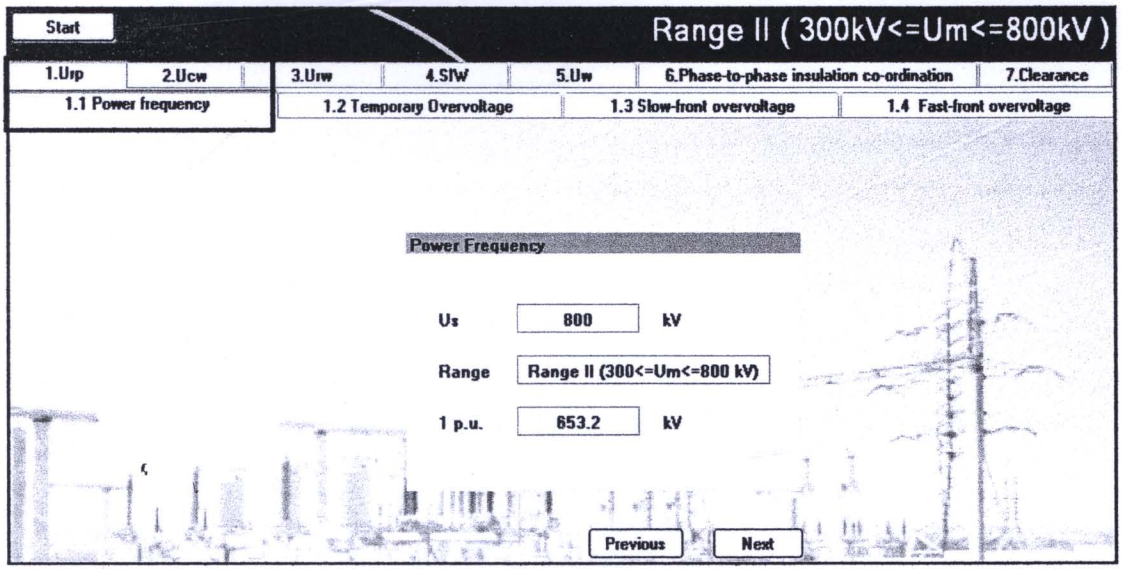
U_n คือ แรงดันระบุของระบบ

จากรูปที่ ค.18 ในส่วนกรอบสีแดง ผู้ใช้งานป้อนค่าแรงดันที่ระบุของระบบ (U_n) โดยผู้ใช้งานสามารถกรอกค่าได้ตั้งแต่ 3.6 kV ถึง 800 kV ซึ่งครอบคลุมแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV $\leq U_m \leq$ 245 kV) และและแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV $\leq U_m \leq$ 800 kV) สำหรับตัวอย่างนี้พิจารณาแรงดันของระบบ 735 kV จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ค.2.2 ตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp})

ค.2.2.1 แรงดันเกินความถี่กำลัง



รูปที่ ค.19 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.1 Power-frequency

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

U_s คือ แรงดันสูงสุดของระบบ

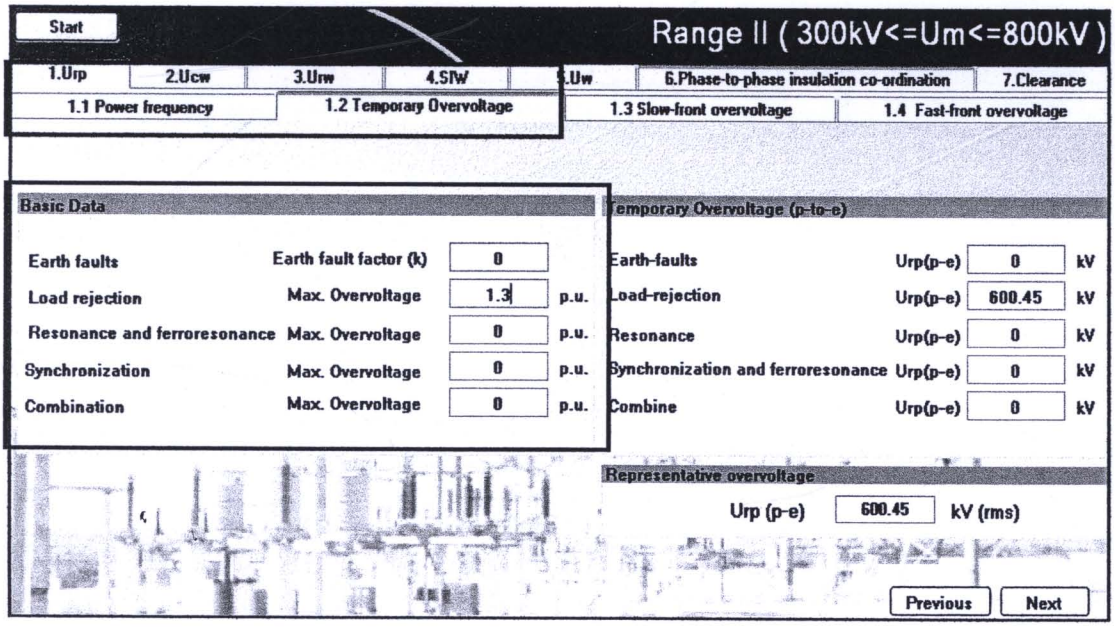
Range คือ ช่วงของแรงดันที่พิจารณา ซึ่งจะขึ้นกับ U_n ที่ผู้ใช้งานป้อน ซึ่งประกอบด้วย แรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$36 kV), แรงดันช่วงที่ 1 (52 kV$\leq U_m \leq$245 kV) และและแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV$\leq U_m \leq$800 kV)

1 pu คือ ค่าต่อหน่วย

จากรูปที่ ค.19 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 หัวข้อย่อย 1.1 Power Frequency เมื่อทราบค่า U_n จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ โดยโปรแกรมจะแสดงผลใน ดังนี้

- U_s คือ 800 kV พิจารณาจากตารางที่ 2.3
- แสดงว่าเป็นการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับส่วนที่ 2 (300 kV$\leq U_m \leq$ 800 kV)
- ผลการคำนวณ 1 'pu มีค่า 653.2 kV พิจารณาจากสมการที่ 3.2

ค.2.2.2 แรงดันเกินชั่วคราว



รูปที่ ค.20 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.2 Temporary Overvoltage

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

k คือ ตัวแปรความผิดพร่องลงดิน

U_{e2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับดินซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 %

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

จากรูปที่ ค.20 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.2 Temporary Overvoltage โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. ผู้ใช้ป้อนข้อมูล :

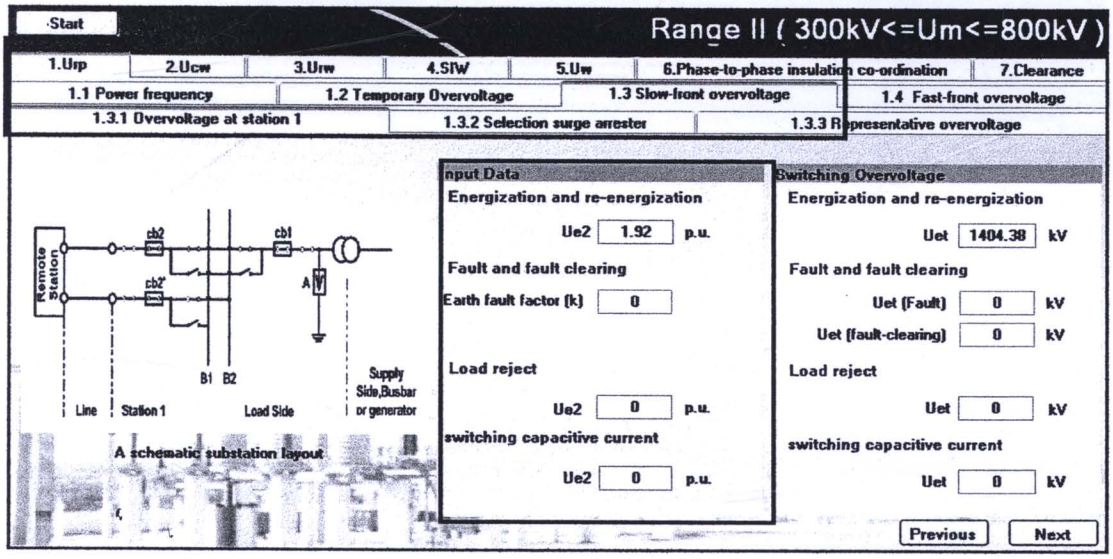
ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน พื้นที่สีชมพู คือ แหล่งกำเนิดแรงดันเกินที่เป็นไปได้ (U_{e2}) เช่น ความผิดพร่องลงดิน การปลดโหลด แรโซแนน หรือ ผลรวมจากการเกิดหลายแหล่งกำเนิด ในตัวอย่างนี้สมมุติเกิดการปลดโหลดเกิดแรงดันเกิน U_{e2} ขนาด 1.3 pu

2. ผลการคำนวณจากโปรแกรม :

- ในหัวข้อ Temporary Overvoltage แสดงผลจากการคำนวณแรงดันเกินชั่วคราวจากทุกแหล่งกำเนิด ($U_{rp}(p-e)$)

- ในหัวข้อ Representative Overvoltage โปรแกรมจะทำการเลือกค่า $U_{rp}(p-e)$ ที่มากที่สุดจากหัวข้อ Temporary Overvoltage มาแสดงผล ในที่นี้คือ $U_{rp}(p-e)$ มีค่า 600.45 kV จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

ค.2.2.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า



รูปที่ ค.21 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.1 Overvoltage originate from station 1

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

U_{e2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับดินซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 %

k คือ ตัวแปรความผิดพร่องลงดิน

U_{et} คือ ค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับดิน

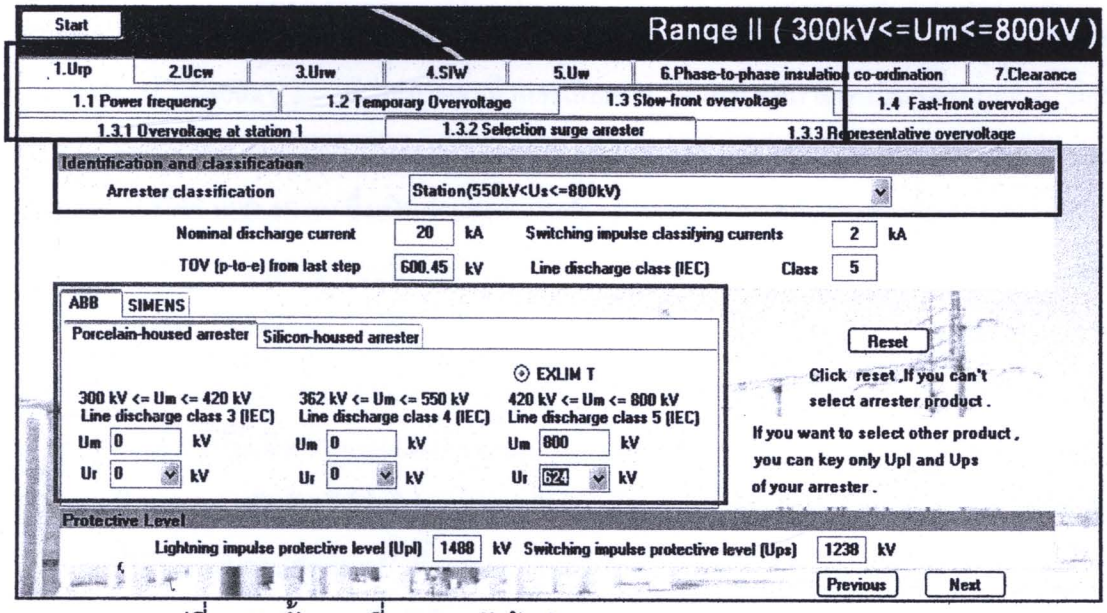
จากรูปที่ ค.21 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.1 Overvoltage originate from station 1 โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. ผู้ใช้ป้อนข้อมูล :

ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน พื้นสีชมพู ผู้ใช้งานป้อนค่าแหล่งกำเนิดแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าที่เป็นไปได้ คือ Energization and Re-Energization, Load Reject, Fault and Fault Clearing และ Switching Capacitive Current ตัวอย่างนี้สมมุติเกิด Energization and Re-Energization มีค่า U_{e2} มีค่า 1.92 pu

2. ผลการคำนวณจากโปรแกรม :

โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณค่า U_{et} จากผลของ Energization and Re -Energization คือ U_{et} มีค่า 1404.38 kV จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป



รูปที่ ค.22 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.2 Selection surge arrester

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

กระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ(I_n) พิจารณาจากตารางที่ 3.1

ระดับการถ่ายเทประจุในสาย (line discharge class) พิจารณาจากตารางที่ 3.2

ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ (switching impulse classifying current) พิจารณาจากตารางที่ 3.3

U_m คือ แรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์

U_r คือ พิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จ

U_{pl} คือ ระดับการป้องกันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของกับดักเสิร์จ

U_{ps} คือ ระดับการป้องกันอิมพัลส์สวิตชิงของกับดักเสิร์จ

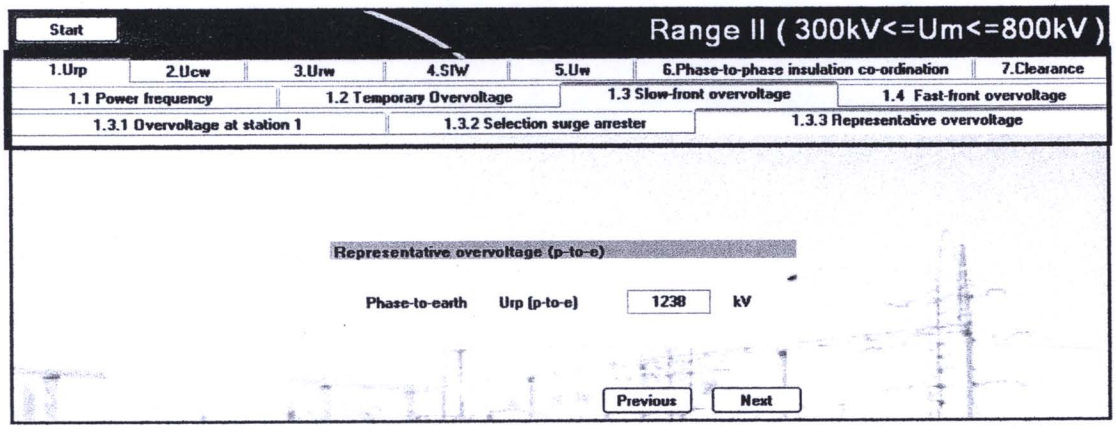
จากรูปที่ ค.22 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.2 Selection surge arrester มีรายละเอียดดังนี้

- ในส่วนกรอบสีน้ำเงินพื้นสีชมพู หัวข้อ Identificaiton and Classification เมื่อผู้ใช้งานเลือก Arrester Classification โปรแกรมจะแสดงค่ากระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ(I_n), ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ (switching impulse classifying current), ระดับการถ่ายเทประจุในสาย (line discharge class) และแสดงค่าแรงดันเกินชั่วคราวระหว่างเฟสกับดินจากขั้นตอนก่อนหน้านี้

- ตัวอย่างนี้สมมุติเลือก Arrester Classification คือ Station ($550\text{kV} < U_s \leq 800\text{kV}$) โปรแกรมจะทำการเลือกค่า ค่ากระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ(I_n) มีค่า 20 kA, Switching Impulse Classify Current มีค่า 2 kA, line discharge class คือ 2 และ $TOV(p-e)$ มีค่า 600.45 kV ซึ่งเป็นค่าแรงดันกันชั่วคราวระหว่างเฟสกับดินจากขั้นตอนก่อนหน้านี้

- ในส่วนกรอบสีเขียวพื้นสีชมพู หัวข้อการเลือกใช้งานผลิตภัณฑ์กับดักเสิร์จ ผู้ใช้งานสามารถเลือกบริษัท ABB หรือ SIMENS ซึ่งทั้งสองผลิตภัณฑ์ครอบคลุมการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 หลังจากนั้นผู้ใช้งานสามารถเลือกชนิดของกับดักเสิร์จได้ว่าเป็นชนิด Porcelain-Housing Arrester หรือ Silicon-Housing Arrester จากนั้นผู้ใช้งานเลือกรุ่นของกับดักเสิร์จ โปรแกรมจะทำการเลือก U_m ของกับดักเสิร์จที่สามารถใช้งานได้ หลังจากนั้นโปแกรมจะแสดงค่า U_r ที่สามารถเลือกใช้งานได้ ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันเกินชั่วคราวระหว่างเฟสกับดิน ซึ่งผู้ใช้งานจะต้องทำการเลือกค่า U_r ซึ่งมีหลายค่าให้เลือกขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน หลังจากนั้นในหัวข้อ Protective Level โปรแกรมจะแสดงค่า U_{pl} และ U_{ps}

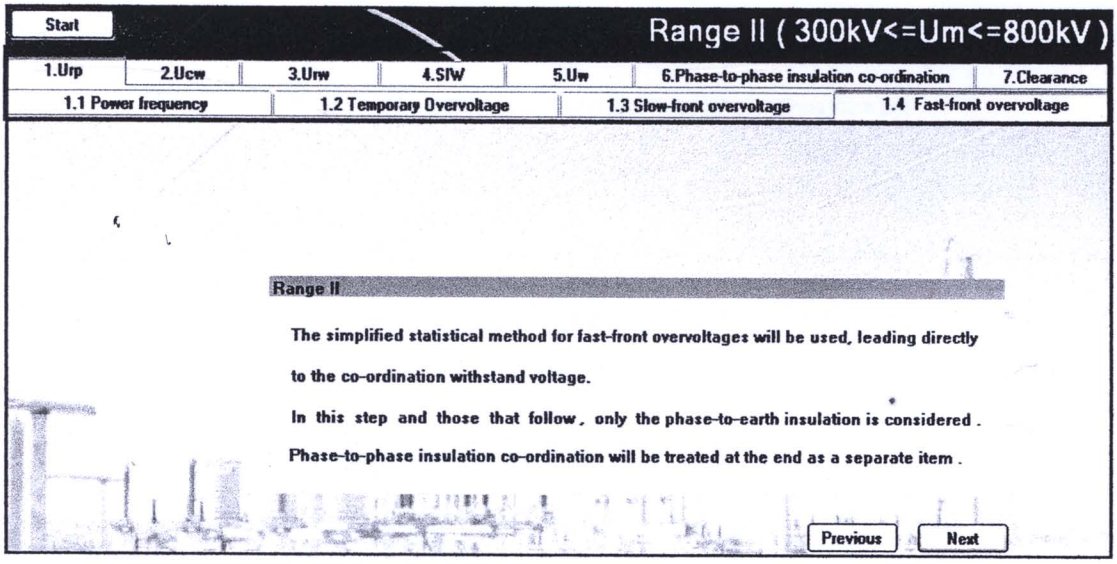
- ตัวอย่างนี้สมมุติเลือก กับดักเสิร์จบริษัท ABB ชนิด Porcelain-Housing Arrester รุ่น EXLIM-T โปรแกรมจะแสดงผลการเลือกค่า U_m ของกับดักเสิร์จ มีค่า 800 kV ตัวอย่างนี้สมมุติเลือก U_r ค่า 624 kV โปรแกรมจะแสดงผลค่า U_{pl} มีค่า 1488 kV และ U_{ps} มีค่า 1238 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป



รูปที่ ค.23 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.3 Representative Overvoltage

จากรูปที่ ค.23 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.3 Representative Overvoltage แสดงผลการคำนวณค่า Representative Overvoltage สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า (Slow-Front Overvoltage) คือ $U_{rp}(p-e)$ มีค่า 1238 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

ค.2.2.4 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว



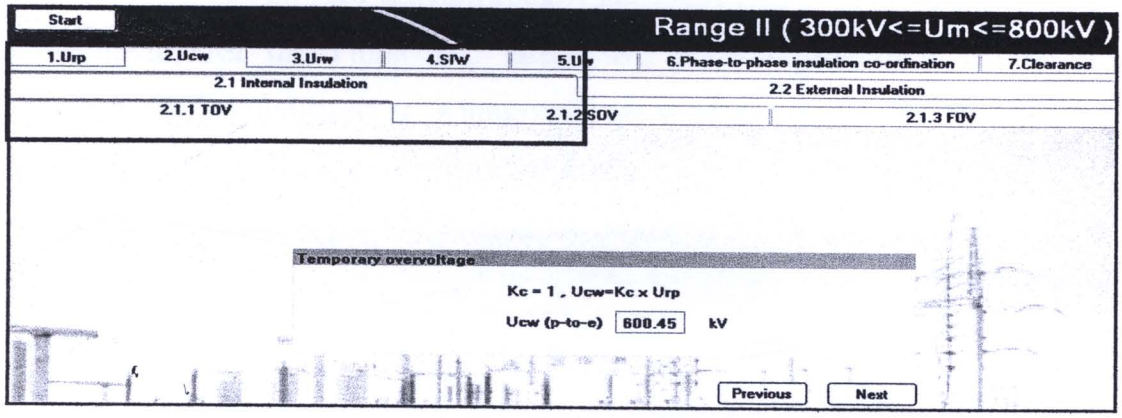
รูปที่ ค.24 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.4 Fast-front Overvoltage

จากรูปที่ ค.24 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.4 Fast-front overvoltage แสดงข้อความอธิบายว่า แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วจะพิจารณาในขั้นตอนที่ 2 U_{cw} ของการประสานสัมพันธ์ฉนวน จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

ค.2.3 ค่าความคงทนแรงดันในการประสานฉนวน (U_{cw})

ค.2.3.1 U_{cw} สำหรับฉนวนภายใน

U_{cw} สำหรับแรงดันเกินชั่วคราว



รูปที่ ค.25 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1.1 TOV สำหรับฉนวนภายใน

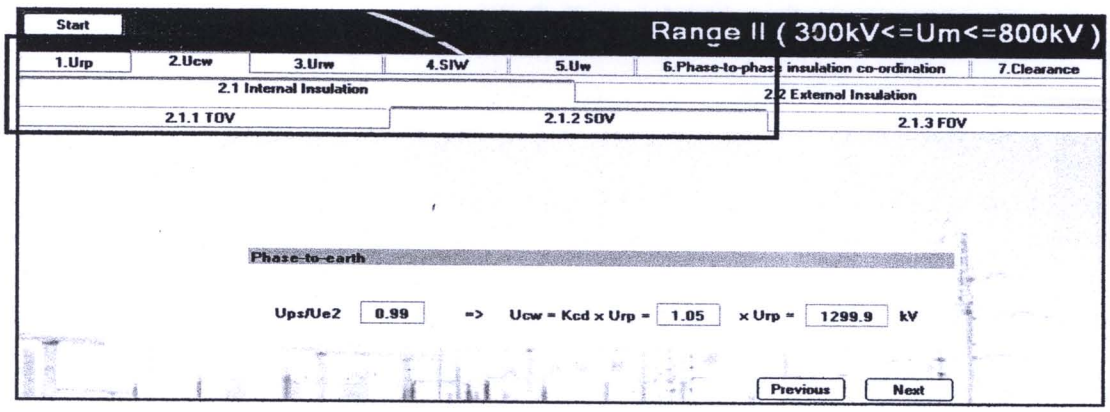
ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

K_c คือ ตัวแปรในการประสานสัมพันธ์ฉนวน

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

จากรูปที่ ค.25 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1.1 TOV สำหรับฉนวนภายใน แสดงผลการคำนวณค่า $U_{cw}(p-e)$ ค่า 600.45 kV จากสมการที่แสดง เนื่องจากทราบค่า U_{rp} จากขั้นตอนก่อนหน้านี้

U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า



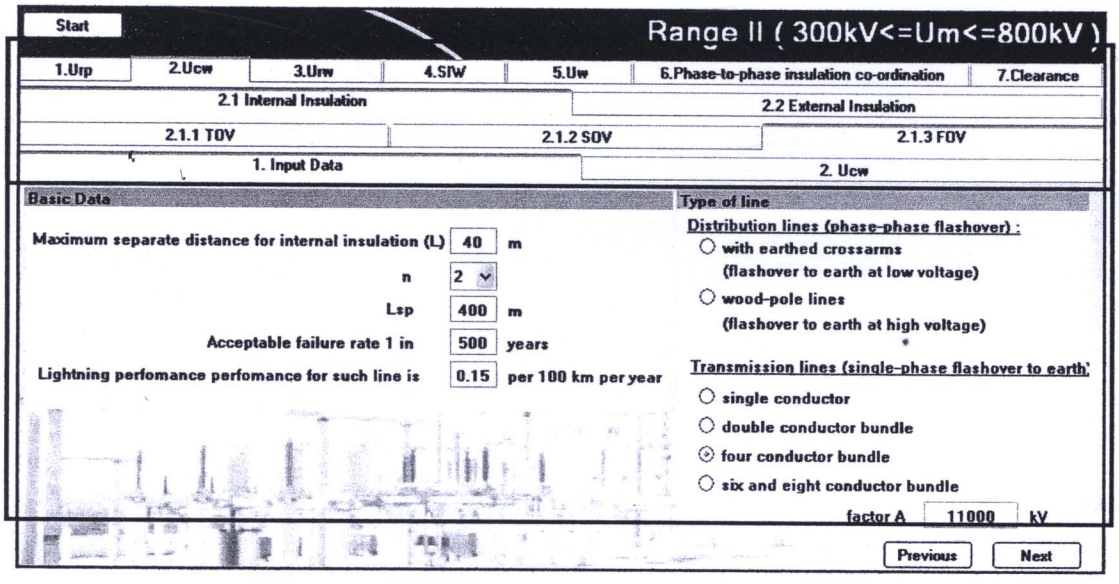
รูปที่ ค.26 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1.2 SOV สำหรับฉนวนภายใน

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

K_{cd} คือ Deterministic co-ordination factor

จากรูปที่ ค.26 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1.2 SOV สำหรับฉนวนภายใน เมื่อทราบค่า U_{ps} และค่า U_{rp} จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ ทำให้ทราบค่า K_{cd}=1.05 เพื่อนำมาคำนวณค่า U_{cw} จากสมการที่แสดง จากตัวอย่างนี้ U_{cw} มีค่า 1299.9 kV

U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว



รูปที่ ค.27 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1.3.1 ข้อมูลอินพุตสำหรับ FOV

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

L คือ ระยะห่างระหว่างกับดักเสิร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน สำหรับฉนวนภายใน (m)

n คือ จำนวนของสายส่งเหนือศีรษะต่อไปยังสถานีไฟฟ้า ในการหาค่าของขนาดเสิร์จที่มาปะทะ

L_{sp} คือ ความยาวช่วง (m)

R_a คือ อัตราการล้มเหลวที่ยอมรับของอุปกรณ์ เมื่อพิจารณาสำหรับสายส่ง ตัวแปรโดยปกติจะเขียนในรูป (1/years)

R_{km} คือ อัตราการขัดข้องของสายส่งเหนือศีรษะต่อปี สำหรับการออกแบบต่อหนึ่งกิโลเมตรแรก ในส่วนหน้าของสถานีไฟฟ้า โดยตัวแปรจะเขียนในรูป(1/km/year)

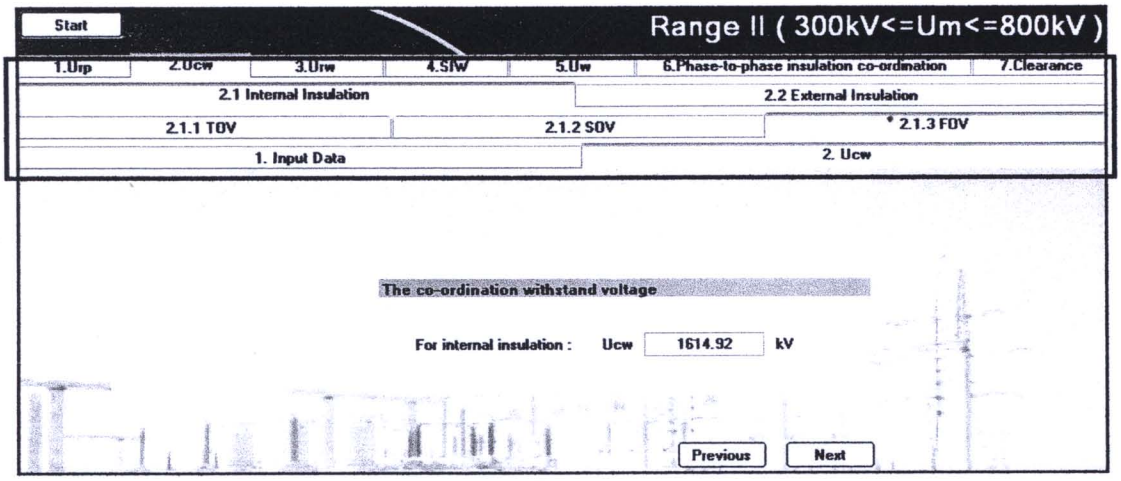
A คือ ตัวแปรแสดงคุณลักษณะของสายส่งพิจารณาตามตารางที่ 3.5

จากรูปที่ ค.27 ในส่วนกรอบสีแดง ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.3.1 ข้อมูล Input สำหรับ U_{cw} (Fast-Front Overvoltage) ตัวอย่างนี้สมมุติ

- L สำหรับฉนวนภายใน มีค่า 40 m
- n มีค่า 2
- L_{sp} มีค่า 400 m
- R_a มีค่า 1 in 500 years
- R_{km} มีค่า 0.15 per 100 km per year
- ชนิดของสายส่งพิจารณาตารางที่ 3.5 สมมุติเลือก Four conductor bundle

ตัวแปร A มีค่า 11000

เมื่อผู้ใช้ป้อนข้อมูลอินพุตเสร็จสิ้น กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

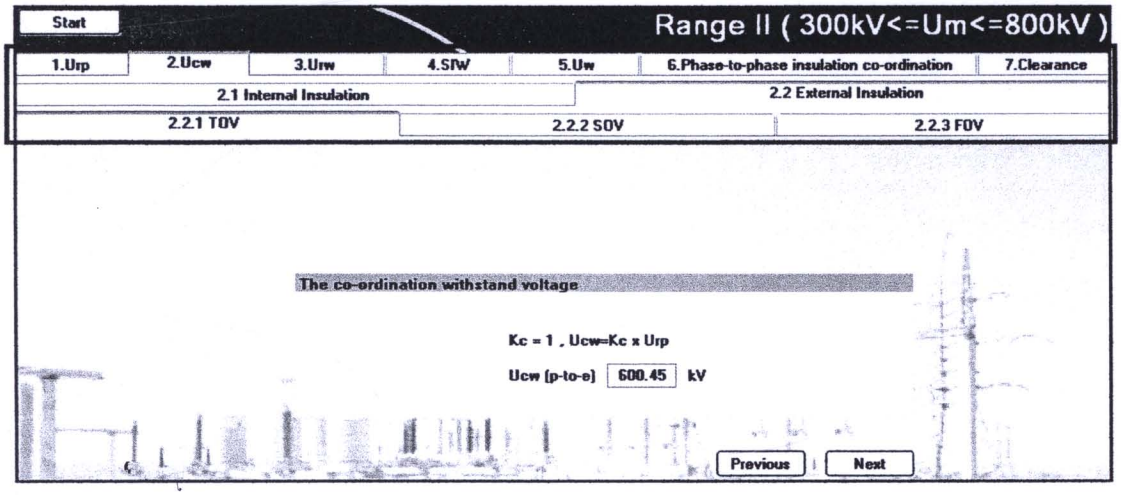


รูปที่ ค.28 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} สำหรับ FOV

จากรูปที่ ค.28 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 ผลการคำนวณ U_{cw} สำหรับ FOV มีค่า $U_{cw}(p-e)$ ค่า 1614.92 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

ค.2.3.2 U_{cw} สำหรับฉนวนภายนอก

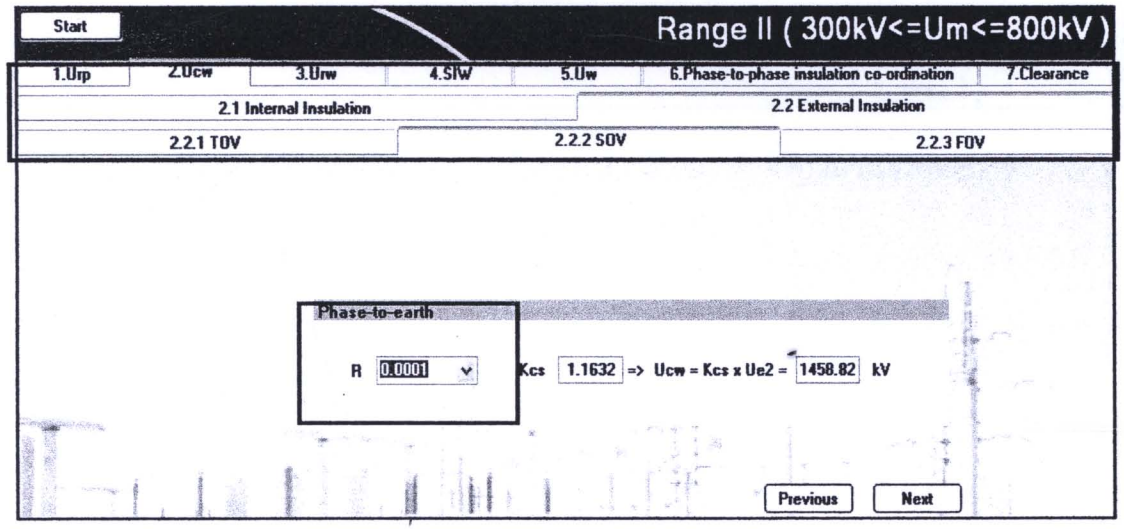
U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า



รูปที่ ค.29 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2.1 TOV สำหรับฉนวนภายนอก

จากรูปที่ ค.29 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2.1 TOV สำหรับฉนวนภายนอก แสดงผลการคำนวณค่า $U_{cw}(p-e)$ ค่า 600.45 kV พิจารณาจากสมการที่แสดง โดยตัวแปรค่า K_c มีค่าคงที่ คือ 1

U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า



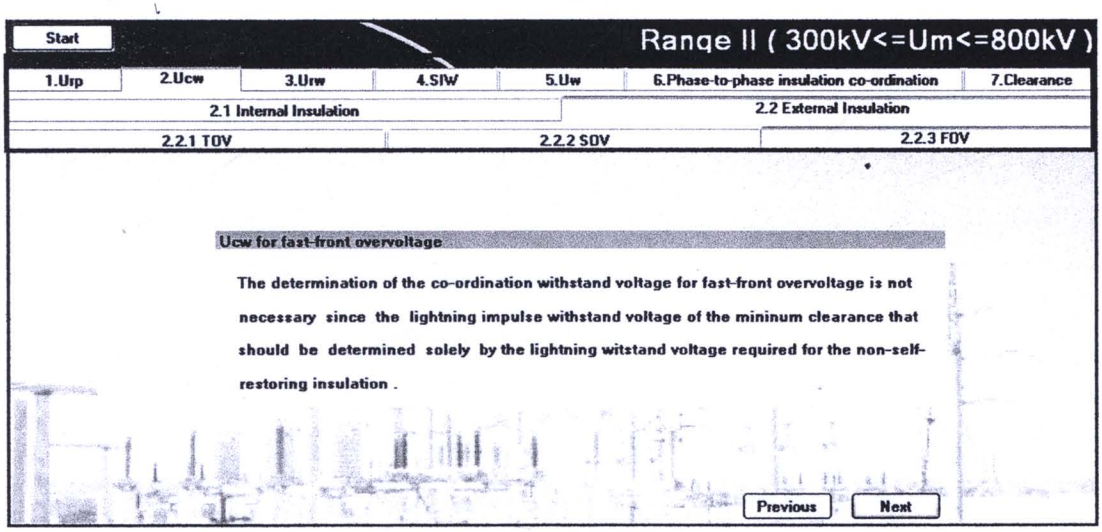
รูปที่ ค.30 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2.2 SOV สำหรับฉนวนภายนอก

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

R คือ ความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของฉนวน

K_{cs} คือ ตัวแปรในการประสานฉนวนทางสถิติ

จากรูปที่ ค.30 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2.2 SOV สำหรับฉนวนภายนอก ในส่วนกรอบสีน้ำเงินพื้นสีชมพู ผู้ใช้ทำการเลือกค่า R ผู้ใช้สามารเลือกค่า 0.1, 0.01, 0.001หรือ 0.0001 โดยตามมาตรฐานแนะนำว่า ค่าที่ยอมรับได้ คือ ค่า 0.0001 จากนั้นโปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณค่า K_{cs} ค่า 1.1632 ซึ่งเป็นค่าค่าที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง K_{cs} และค่า U_{e2} เพื่อนำมาคำนวณค่า $U_{cw}(p-e)$ ค่า 1458.82 kV จากสมการที่แสดง

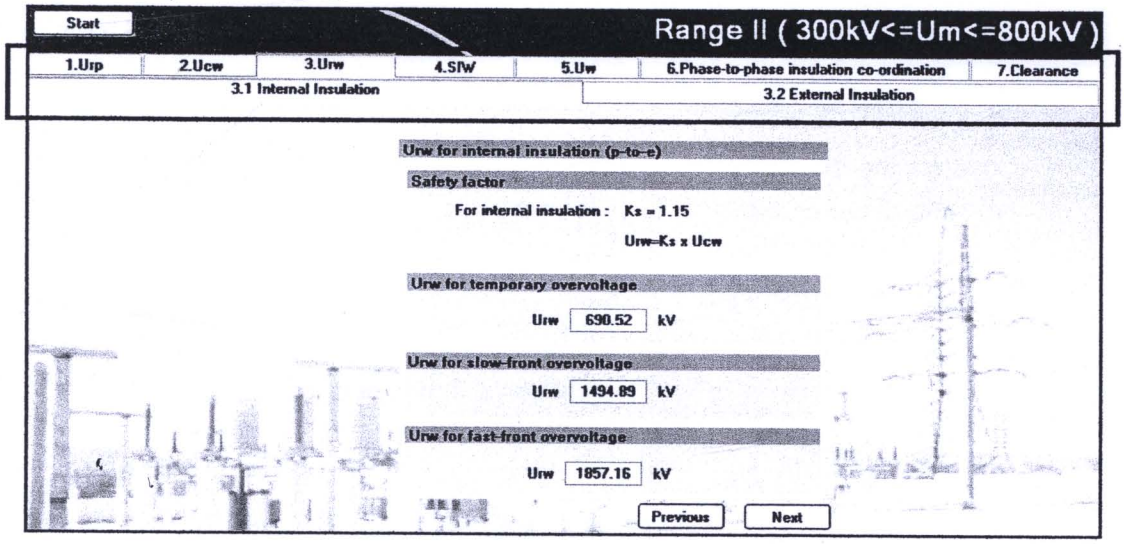


รูปที่ ค.31 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2.3 FOV สำหรับฉนวนภายนอก

จากรูปที่ ค.31 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2.3 FOV สำหรับฉนวนภายนอก แสดงข้อความอธิบายว่า การคำนวณค่า U_{cw} สำหรับฉนวนภายนอก มาตรฐานแนะนำว่าไม่จำเป็น

ค.2.4 ความคงทนที่ต้องการ (U_{rw})

ค.2.4.1 U_{rw} สำหรับฉนวนภายใน



รูปที่ ค.32 ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.1 FOV สำหรับฉนวนภายใน

จากรูปที่ ค.32 ในส่วนกรอบสีแดง ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.1 FOV สำหรับฉนวนภายใน แสดงผลการคำนวณค่า U_{rw} สำหรับฉนวนภายใน พิจารณาจากสมการที่แสดง โดยตัวแปร K_s เป็นค่าคงที่มีค่า 1.15 มีผลดังนี้

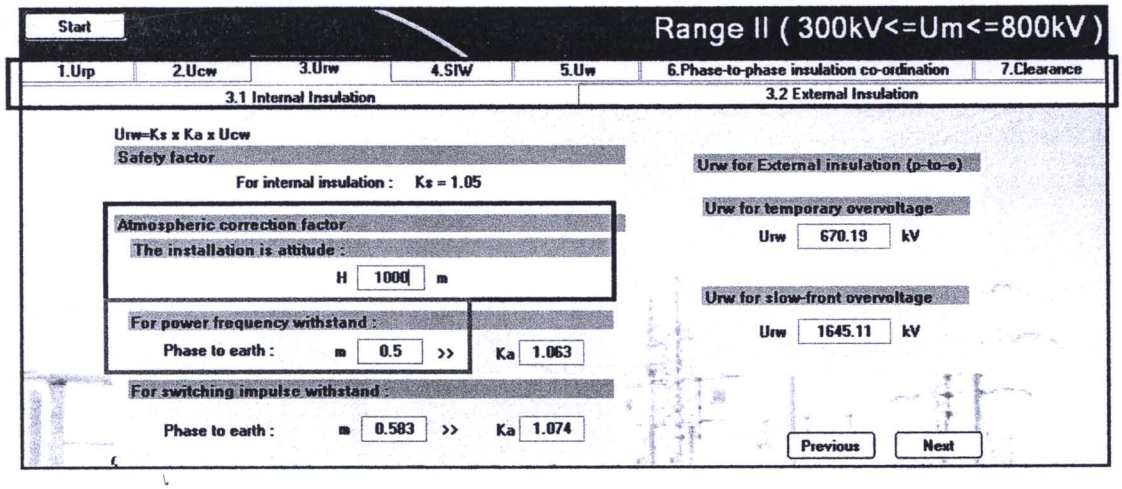
U_{rw} for temporary overvoltage: $U_{rw}(p-e)$ มีค่า 690.52 kV

U_{rw} for slow-front overvoltage: $U_{rw}(p-e)$ มีค่า 1494.89 kV

U_{rw} for Fast-front overvoltage: $U_{rw}(p-e)$ มีค่า 1857.16 kV

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ค.2.4.2 U_{rw} สำหรับฉนวนภายนอก



รูปที่ ค.33 ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.2 สำหรับฉนวนภายนอก

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

H คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล

K_a คือ ตัวแปรชดเชยระดับความสูง

K_s คือ ตัวแปรความปลอดภัย

m คือ ตัวแปรยกกำลังใช้เพื่อคำนวณ K_a สำหรับฉนวนภายนอก

จากรูปที่ ค.33 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.2 ผู้ใช้งานป้อนข้อมูลสำหรับการคำนวณ U_{rw} ตัวอย่างนี้สมมุติ

- ในส่วนกรอบสีชมพูพื้นสีชมพู ผู้ใช้งานป้อนค่า H ตัวอย่างนี้สมมุติ H มีค่า 1000 m

- ในส่วนกรอบสีเขียว ผู้ใช้งานต้องป้อนค่า m สำหรับ Power Frequency ซึ่งจะขึ้นกับสภาพมลภาวะของตัวฉนวน ถ้าฉนวนมีสภาพสกปรกค่า m มีค่า 0.5 ถ้าฉนวนมีสภาพสะอาด m มีค่า 1 ตัวอย่างนี้สมมุติ m มีค่า 0.5 เมื่อพิจารณา m ของสวิตชิงอิมพัลส์ (Switching Impulse) เป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ เมื่อทราบค่าตัวแปร m โปรแกรมจะคำนวณค่า K_a

- K_s เป็นค่าคงที่ สำหรับฉนวนภายนอก K_s มีค่า 1.05

จากรูปที่ ค.33 แสดงผลการคำนวณ ค่า U_{rw} สำหรับฉนวนภายนอก ดังนี้

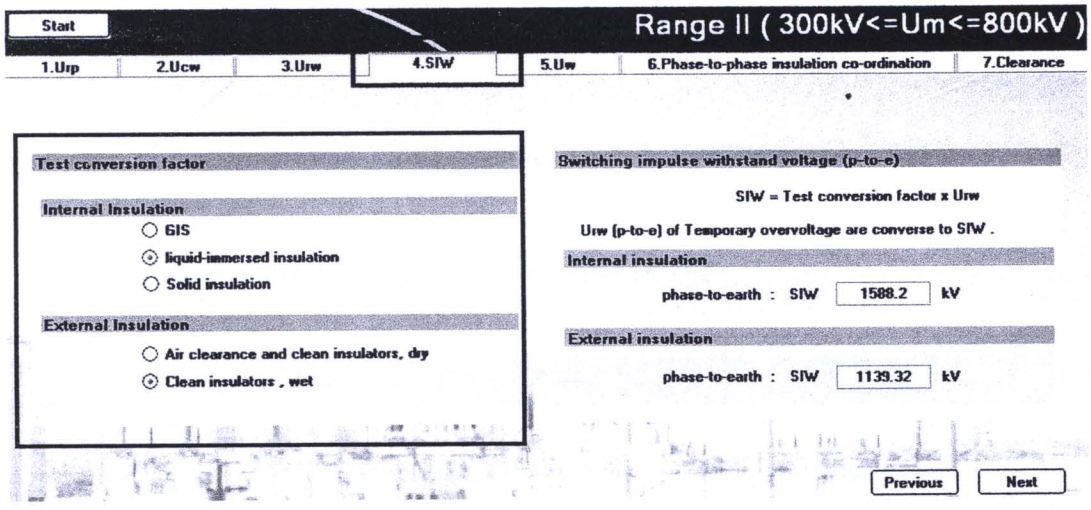
U_{rw} for temporary overvoltage: $U_{rw}(p-e)$ มีค่า 670.19 kV

U_{rw} for slow-front overvoltage: $U_{rw}(p-e)$ มีค่า 1645.11 kV

จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

ค.2.5 การเปลี่ยนรูปของไปยังความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (*SIW*)

ความคงทนแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (*SDW*) จะถูกเปลี่ยนรูปไปยังความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (*SIW*) พิจารณาตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) จากตารางที่ 2.5



รูปที่ ค.34 ขั้นตอนที่ 4 Conversion to switching impulse withstand voltage (*SIW*)

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

SIW คือ มาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

Test Conversion factor คือ ตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบสำหรับฉนวนภายนอก และฉนวนภายใน

จากรูปที่ ค.34 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 4 Conversion to withstand voltage normalized (*SIW*) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. ผู้ใช้งานป้อนค่า :

- ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน ผู้ใช้งานเลือกค่าตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) สำหรับฉนวนภายในระหว่างเฟสกับดิน ผู้ใช้งานสามารถเลือกเป็น GIS, Liquid immersed insulation หรือ Solid Insulation สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับระหว่างเฟสกับดิน ผู้ใช้งานสามารถเลือกเป็น Air clearance and clean insulator ,dry หรือ Clean insulator, wet

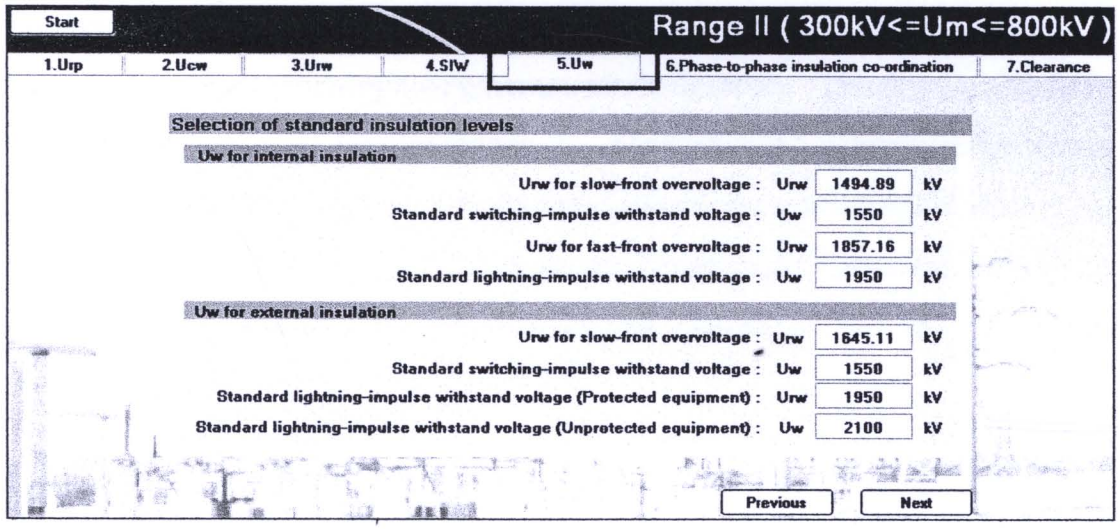
- ตัวอย่างนี้สมมุติ เลือกค่าตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) สำหรับฉนวนภายใน ระหว่างเฟสกับดิน เลือกเป็น Liquid immersed insulation สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับระหว่างเฟสกับดิน เลือก Clean insulator, wet

2. ผลการคำนวณจากโปรแกรม :

เมื่อผู้ใช้งานป้อนข้อมูลข้างต้นแล้วเสร็จ โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณ *SIW* โดยพิจารณาแยกระหว่าง ฉนวนภายใน และ ฉนวนภายนอก คือ

- สำหรับฉนวนภายใน: *SIW(p - e)* มีค่า 1588.2 kV
- สำหรับฉนวนภายนอก: *SIW(p - e)* มีค่า 1139.32 kV

ค.2.6 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w)



รูปที่ ค.35 ขั้นตอนที่ 5 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w)

จากรูปที่ ค.35 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 5 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w) สำหรับฉนวนภายใน และฉนวนภายนอก ดังนี้

ค.2.6.1 U_w สำหรับฉนวนภายใน

เมื่อทราบค่า U_{rw} for slow-front overvoltage คือ $U_{rw}(p-e)$ ค่า 1,494.89 kV จากนั้นเปิดตารางที่ 2.3 มาตรฐานระดับการฉนวนที่ระดับแรงดันสูงสุดของระบบ คือ 800 kV เพื่อเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (Standard switching-impulse withstand voltage) โดยเลือกค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $U_{rw}(p-e)$ ในตัวอย่างนี้เลือกค่า U_w ค่า 1550 kV

เมื่อทราบค่า U_{rw} for fast-front overvoltage คือ $U_{rw}(p-e)$ ค่า 1,857.16 kV จากนั้นเปิดตารางที่ 2.3 มาตรฐานระดับการฉนวนเพื่อเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Standard lightning Impulse withstand voltage) โดยเลือกค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $U_{rw}(p-e)$ ในตัวอย่างนี้เลือกค่า U_w ค่า 1950 kV

ค.2.6.2 U_w สำหรับฉนวนภายนอก

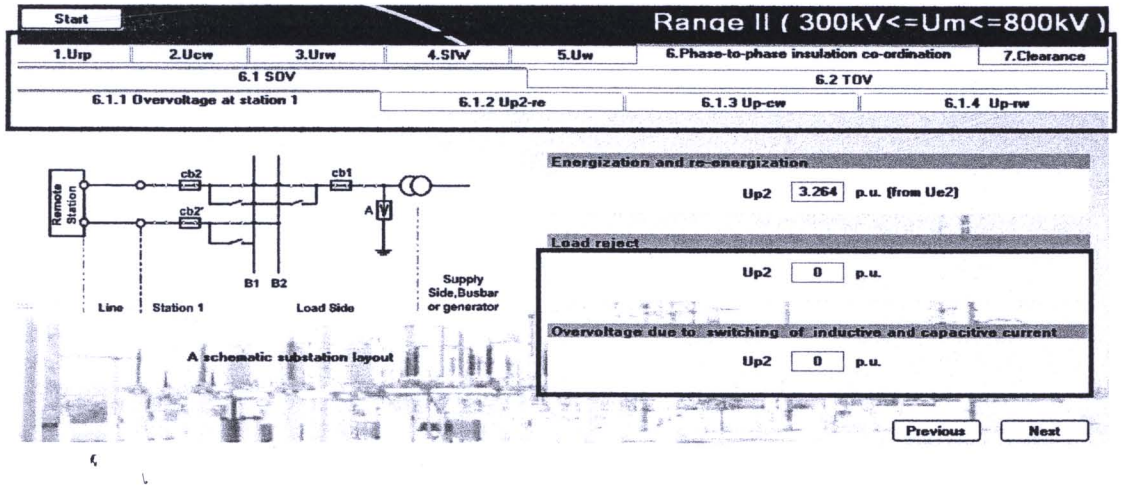
เมื่อทราบค่า U_{rw} for slow-front overvoltage คือ $U_{rw}(p-e)$ ค่า 1,645.11 kV จากนั้นเปิดตารางที่ 2.3 มาตรฐานระดับการฉนวนเพื่อเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (Standard switching-impulse withstand voltage) โดยเลือกค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $U_{rw}(p-e)$ ในตัวอย่างนี้เลือกค่า U_w ค่า 1550 kV

พิจารณามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า(สำหรับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันจากกับดักเสิร์จ) เลือกค่า U_w เท่ากับ U_w ของ Internal Insulation คือ 1950 kV

พิจารณามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่ได้รับการป้องกันจากกับดักเสิร์จ) เลือกโดยเลือกค่า U_w จากตารางที่ 2.3 มาตรฐานระดับการฉนวน โดยเลือกค่าเพิ่มขึ้นจากมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า(สำหรับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันจากกับดักเสิร์จ) หนึ่งระดับ สำหรับตัวอย่างนี้ มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่ได้รับการป้องกันจากกับดักเสิร์จ) คือ 2100 kV

ค.2.7 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

ค.2.7.1 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

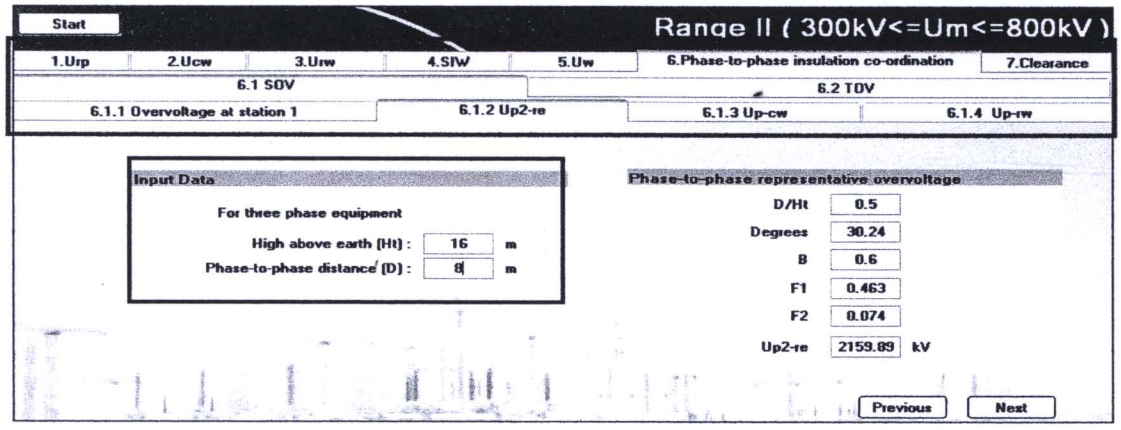


รูปที่ ค.36 ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อยที่ 6.1.1 Overvoltage at station 1

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

U_{p2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟสซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 %

จากรูปที่ ค.36 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงหัวข้อ 6.1.1 พิจารณา Overvoltage at station 1 ในหัวข้อ Energization and re-energization เป็นผลการคำนวณจากความสัมพันธ์ของ U_{e2} และ U_{p2} จากการประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดิน สำหรับหรับตัวอย่างนี้มี Energization and re-energization มีค่า U_{p2} ค่า 3.264 pu และในหัวข้อ Load reject และ Overvoltage from capacitive current ผู้ใช้สามารถป้อนข้อมูล U_{p2} จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อสู่ขั้นตอนต่อไป



รูปที่ ค.37 ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อยที่ 6.1.2 $U_{p2\text{-}re}$

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

$U_{p2\text{-}re}$ คือ ตัวแทนแรงดันเกินของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า ระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับแรงดันช่วงที่ 2

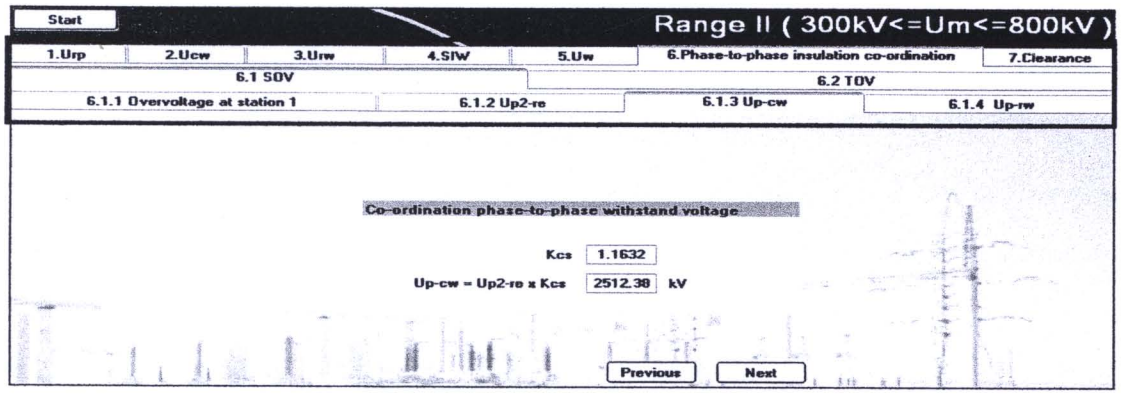
Ht คือ ความสูงเหนือพื้นดิน

D คือ ระยะห่างระหว่างเฟสกับเฟส

Φ คือ inclination angle แสดงคุณลักษณะฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

B คือ ตัวแปรอธิบายถึงคุณลักษณะการถ่ายเทประจุระหว่างเฟสกับเฟส

จากรูปที่ ค.37 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อยที่ 6.1.2 $U_{p2\text{-}re}$ ผู้ใช้ต้องป้อนข้อมูล ตัวอย่างนี้สมมุติ High above earth (Ht) ค่า 16 m และ Phase-to-Phase Distance(D) ค่า 8 m หลังจากป้อนข้อมูลแล้วเสร็จ โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณค่า $U_{p2\text{-}re}$ ค่า 2159.89 kV



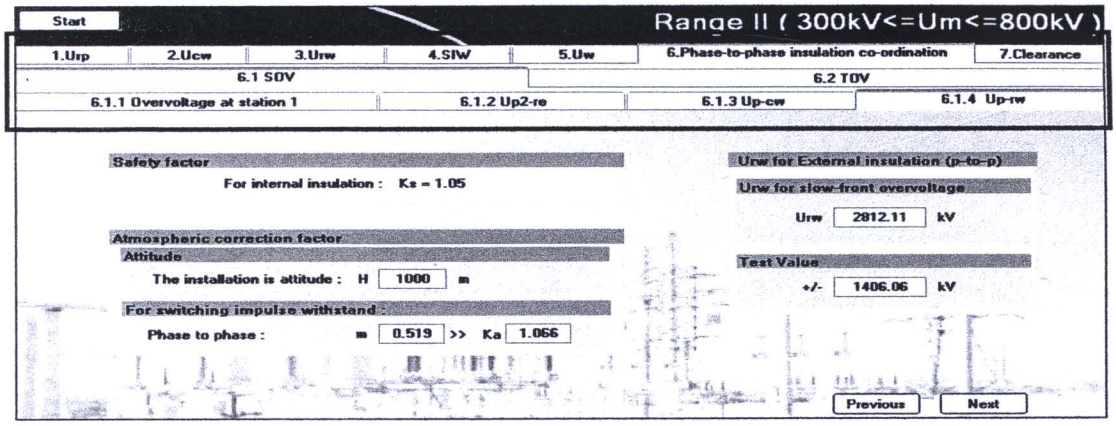
รูปที่ ค.38 ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อยที่ 6.1.3 $U_{p\text{-}cw}$

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

$U_{p\text{-}cw}$ คือ ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า ระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับแรงดันช่วงที่ 2

K_{cs} คือ ตัวแปรในการประสานฉนวนทางสถิติ

จากรูปที่ ค.38 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อยที่ 6.1.3 $U_{p\text{-}cw}$ โปรแกรมแสดงผลการคำนวณ $U_{p\text{-}cw}$ พิจารณาจากสมการที่แสดงในรูป โดยตัวแปร K_{cs} มีค่า 1.1632 เป็นค่าที่ได้มาจากการประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดิน ตัวอย่างนี้ $U_{p\text{-}cw}$ มีค่า 2512.38 kV



รูปที่ ค.39 ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อย 6.1.4 $U_{p\text{-}rw}$

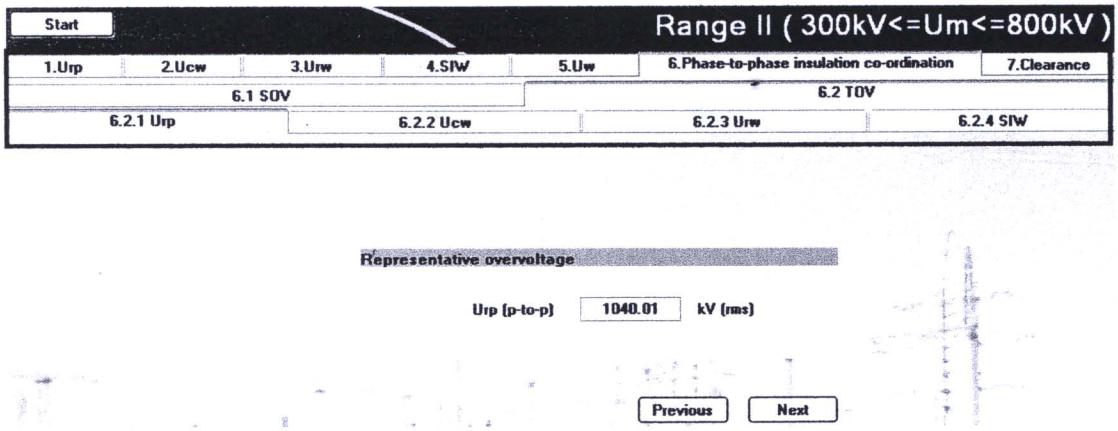
ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

$U_{p\text{-}rw}$ คือ ความคงทนแรงดันที่ต้องการของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า ระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับแรงดันช่วงที่ 2

Test Value คือ ค่าบวก และลบ ครึ่งหนึ่งของ $U_{p\text{-}rw}$

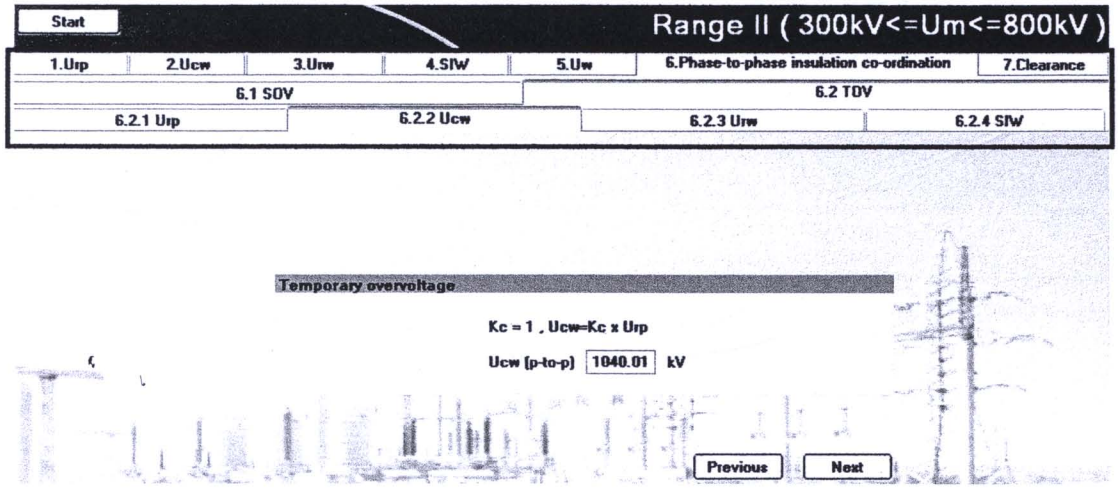
จากรูปที่ ค.39 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อย 6.1.4 $U_{p\text{-}rw}$ พิจารณาตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ $U_{p\text{-}rw}$ คือ ตัวแปรความปลอดภัย (K_s) สำหรับฉนวนภายในมีค่าคงที่ คือ 1.05 และตัวแปรชดสภาพบรรยากาศ (K_a) คำนวณได้เมื่อทราบค่า ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (H) ค่า 1000 m และ m มีค่า 0.519 จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ จากนั้นโปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณค่า $U_{p\text{-}rw}$ คือ 2812.11 kV และเมื่อนำ $U_{p\text{-}rw}$ หารด้วย 2 จะได้ค่า Test Value $\pm$ 1406.06 kV

ค.2.7.2 แรงดันเกินชั่วคราว



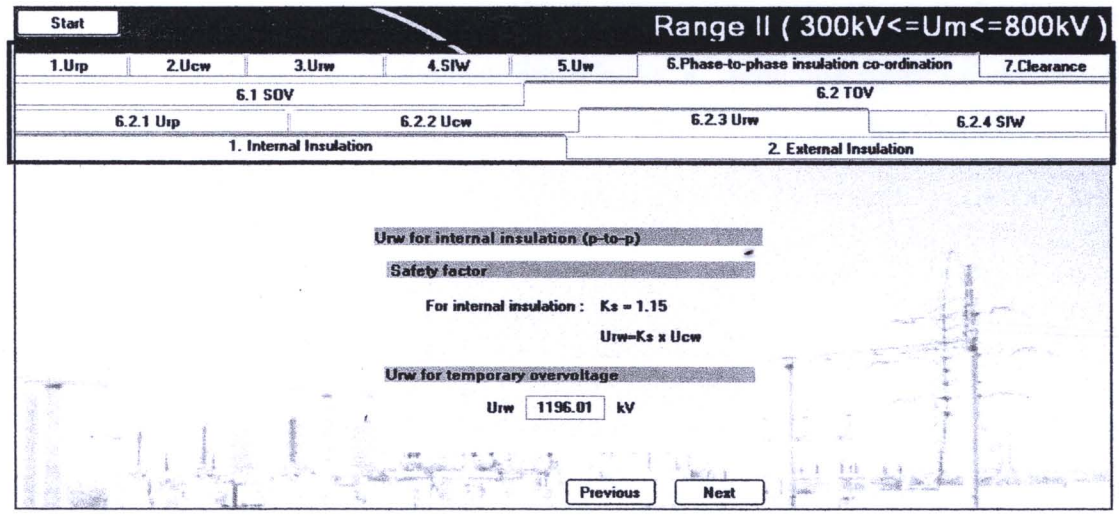
รูปที่ ค.40 ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อย 6.2.1 U_{rp}

จากรูปที่ ค.40 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อย 6.2.1 U_{rp} แสดงผลการคำนวณ U_{rp} ของ TOV ระหว่างเฟสกับเฟส ตัวอย่างนี้มีค่า $U_{rp}(p-p)$ ค่า 1040.01 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป



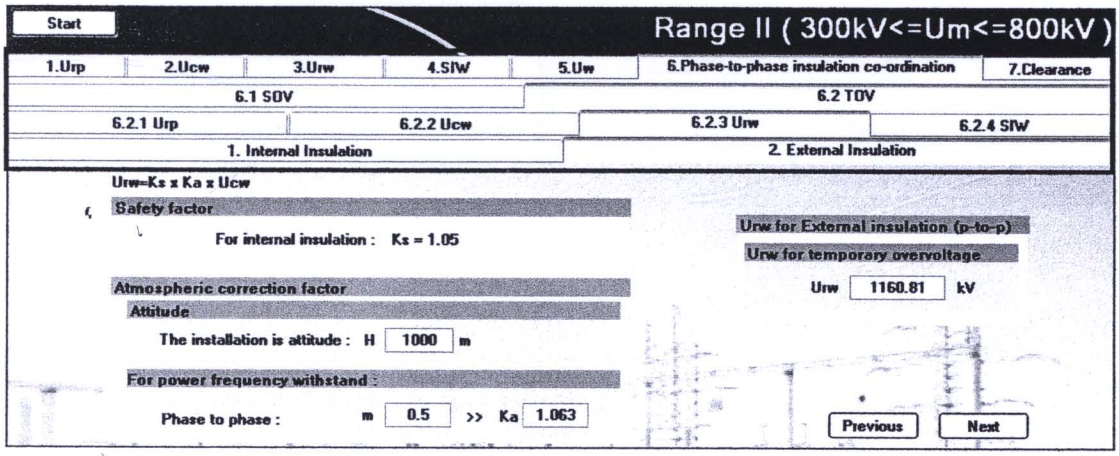
รูปที่ ค.41 ขั้นตอนที่ 6 P-to-P insulation co-ordination หัวข้อย่อย 6.1.4 U_{cw}

จากรูปที่ ค.41 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 6 Phase-to-Phase insulation co-ordination หัวข้อย่อย 6.1.4 U_{cw} แสดงผลการคำนวณค่า U_{cw} สำหรับ TOV พิจารณาจากสมการที่แสดง ตัวแปร K_c มีค่าคงที่ คือ 1 จากตัวอย่างนี้ $U_{cw}(p-p)$ มีค่า 1040.01 kV



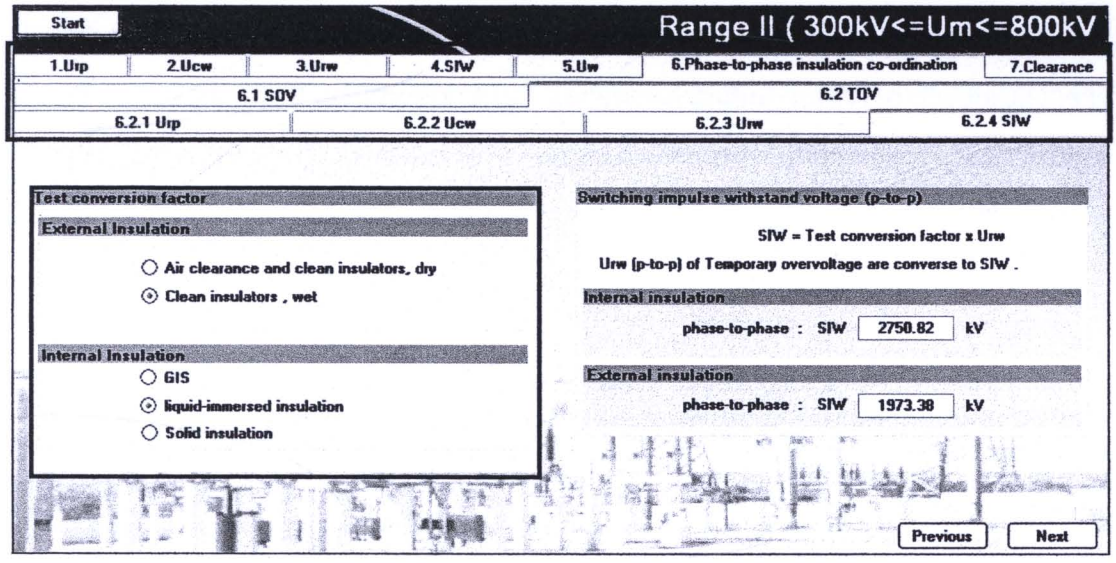
รูปที่ ค.42 ขั้นตอนที่ 6 P-to-P Insulation Co-Ordination หัวข้อย่อยที่ 6.2.3.1 U_{rw} สำหรับ Internal Insulation

จากรูปที่ ค.42 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 6 P-to-P Insulation Co-Ordination หัวข้อย่อยที่ 6.2.3.1 U_{rw} สำหรับ Internal Insulation แสดงผลการคำนวณค่า U_{rw} สำหรับ Internal Insulation สำหรับ TOV ในขั้นตอนที่ 6 P-to-P Insulation Co-Ordination พิจารณาจากสมการที่แสดง ตัวแปร K_s สำหรับฉนวนภายในเป็นค่าคงที่ คือ 1.15 จากตัวอย่างนี้ U_{rw} มีค่า 1196.01 kV



รูปที่ ค.43 ขั้นตอนที่ 6 P-to-P Insulation Co-Ordination
หัวข้อย่อยที่ 6.2.3.2 U_{rw} สำหรับ External Insulation

จากรูปที่ ค.43 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 6 P-to-P Insulation Co-Ordination หัวข้อย่อยที่ 6.2.3.2 U_{rw} สำหรับ External Insulation ตัวแปร K_s สำหรับฉนวนภายนอกเป็นค่าคงที่ คือ 1.05 ในส่วนกรอบสีชมพูตัวแปร K_a คำนวณได้เมื่อทราบค่าตัวแปร H คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล และตัวแปร m เป็นค่าที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า U_{cw} จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ จากนั้นโปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณค่า $U_{rw}(p-p)$ มีค่า 1160.81 kV



รูปที่ ค.44 ขั้นตอนที่ 6 P-to-P Insulation Co-Ordination หัวข้อย่อยที่ 6.2.4 *SIW*

จากรูปที่ ค.44 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 6 P-to-P Insulation Co-Ordination หัวข้อย่อยที่ 6.2.4 *SIW* ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

ผู้ใช้งานป้อนค่า :

- ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน ผู้ใช้งานเลือกค่าตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับระหว่างเฟสกับเฟส ผู้ใช้งานสามารถเลือกเป็น Air clearance and clean insulator ,dry หรือ Clean insulator, wet สำหรับฉนวนภายใน สำหรับระหว่างเฟสกับเฟส ผู้ใช้งานสามารถเลือกเป็น GIS, Liquid immersed insulation หรือ Solid Insulation

- ตัวอย่างนี้สมมุติ เลือกตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับระหว่างเฟสกับเฟส เลือก Clean insulator, wet สำหรับฉนวนภายใน สำหรับระหว่างเฟสกับเฟส เลือกเป็น Liquid immersed insulation

ผลการคำนวณจากโปรแกรม :

เมื่อผู้ใช้งานป้อนข้อมูลข้างต้นแล้วเสร็จ โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณสำหรับ *SIW(p - p)* โดยพิจารณาแยกระหว่าง ฉนวนภายใน และ ฉนวนภายนอก คือ

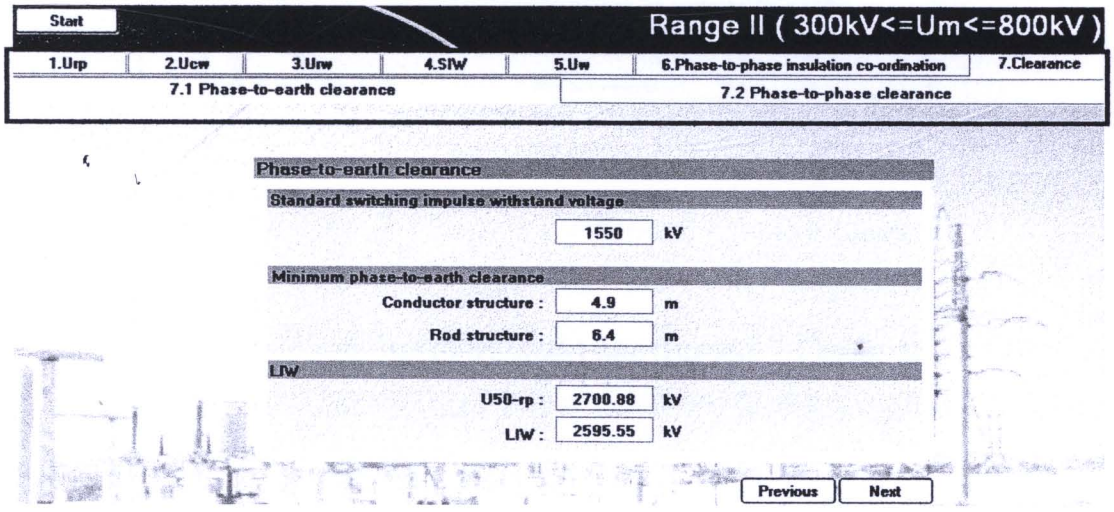
- สำหรับฉนวนภายใน: *SIW(p - p)* มีค่า 2750.82 kV

- สำหรับฉนวนภายนอก: *SIW(p - p)* มีค่า 1973.38 kV

ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าที่ใช้ในการทดสอบสวิตชิงอิมพัลส์ $U_{p\text{-}rw}$ =2812.11 kV มากกว่า $SIW(p-p)$ สำหรับฉนวนภายใน และฉนวนภายนอก แสดงว่าการทดสอบดังกล่าวเพียงพอ และครอบคลุมทั้งทั้งฉนวนภายใน และฉนวนภายนอก แต่ถ้า $U_{p\text{-}rw}$ มีค่าน้อยกว่า $SIW(p-p)$ ของฉนวนภายใน หรือฉนวนภายนอก มาตรฐานแนะนำให้ทำการวัดด้วยวิธีพิเศษ (Special Measurement)

ค.2.8 Clearance

ค.2.8.1 Phase-to-earth clearances

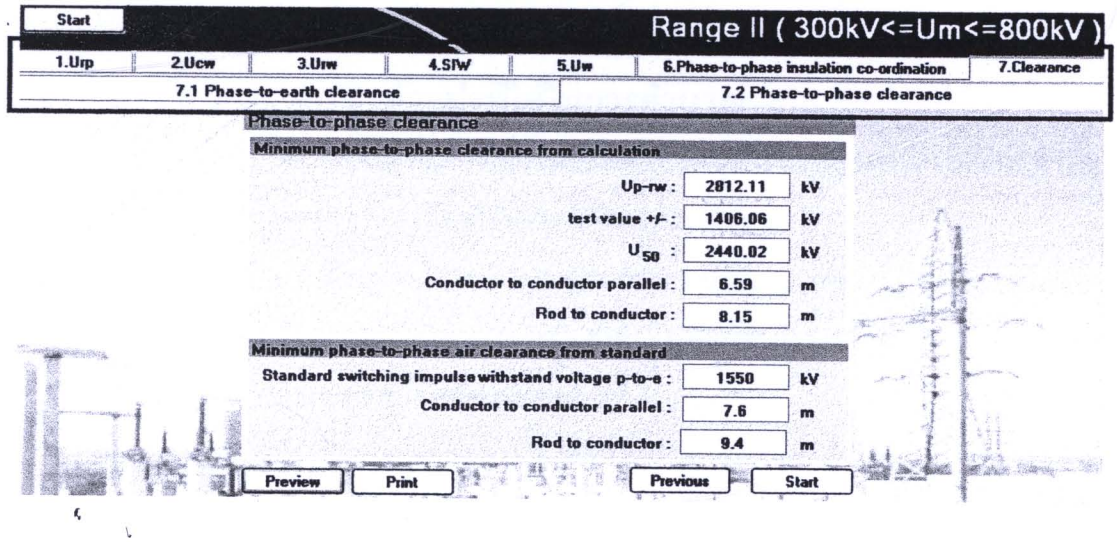


จากรูปที่ ค.45 ขั้นตอนที่ 7 Clearance หัวข้อย่อยที่ 7.1 P-to-E Clearance

จากรูปที่ ค.45 ในส่วนกรอบสีแดงแสดง ขั้นตอนที่ 7 Clearance หัวข้อย่อยที่ 7.1 P-to-E Clearance แสดงผลการคำนวณ Phase-to-earth clearance พิจารณาหัวข้อ Standard switching impulse withstand voltage จากตัวอย่างนี้มีค่า 1550 kV ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 U_w พิจารณาหัวข้อ Minimum Phase-to-earth clearance จากนั้นใช้ค่า switching impulse withstand voltage ค่า 1550 kV เปิดตาราง 3.7 เพื่อหาค่า Minimum phase-to-earth (m) จากตัวอย่างนี้ได้ค่า Minimum phase-to-earth (m) สำหรับ Conductor Structure ค่า 4.9 m และสำหรับ Rod Structure ค่า 6.4 m

พิจารณาหัวข้อ LIW ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณเมื่อทราบค่า Minimum phase -to-earth (m) สำหรับ Conductor Structure และ Rod Structure จากตัวอย่างนี้ LIW มีค่า 2595.55 kV เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Standard Lightning Impulse withstand voltage (Unprotected Equipment) มีค่า 2100 kV จะเห็นได้ว่า LIW ของระบบมีค่าสูงกว่าซึ่งถือเป็นกรณีที่ดี

ค.2.8.2 Phase-to-Phase clearances



รูปที่ ค.46 ขั้นตอนที่ 7 Clearance หัวข้อย่อยที่ 7.1 P-to-P Clearance

จากรูปที่ ค.46 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 7 Clearance หัวข้อย่อยที่ 7.1 P-to-P Clearance แสดงผลการคำนวณ P-to-P Clearance โดยพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง Minnimum P-to-P Clearance ที่ได้จากการคำนวณ กับ Minimum P-to-P Clearance ที่ได้จากการเปิดตารางตามมาตรฐาน

Minimum P-to-P Clearance ผลการคำนวณ :

เมื่อทราบค่า $U_{p\text{-}rw}$ ค่า 2182.11 kV โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณค่า Min P-to-P Clearance ที่ได้จากการคำนวณ สำหรับ Conductor to conductor parallel มีค่า 6.59 m และสำหรับ Rod to Conductor มีค่า 8.15 m

Min P-to-P Clearance จากการเปิดตารางตามมาตรฐาน :

เมื่อทราบค่า Standard switching impulse withstand voltage ระหว่างเฟสกับดินค่า 1550 kV จากขั้นตอนที่ 5 U_w จากนั้นทำการเปิด ตาราง 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างอากาศระหว่างเฟสกับเฟส ได้ค่าสำหรับ Conductor to conductor parallel มีค่า 7.6 m และสำหรับ Rod to Conductor มีค่า 9.4 m

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง Minimum P-to-P Clearance ที่ได้จากการคำนวณ กับ Minimum P-to-P Clearance ที่ได้จากการเปิดตารางตามมาตรฐาน พบว่าค่าที่ได้จากมาตรฐานมีค่าสูงกว่า มาตรฐานมีคำแนะนำว่าควรทำการทดสอบแบบพิเศษ (Special Test)

ภาคผนวก ง

ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

A คือ ตัวแปรที่แสดงคุณสมบัติอิทธิพลจากความรุนแรงของฟ้าผ่ากระทำต่ออุปกรณ์ ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของสายส่งที่ต่อไปยังจุดที่พิจารณา (kV)

B คือ ตัวแปรอธิบายถึงคุณลักษณะการถ่ายเทประจุระหว่างเฟสกับเฟส

BIL คือ มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (kV)

d คือ ระยะห่าง (Clearance) (m)

D คือ ระยะระหว่างเฟสกับเฟส (m)

H คือ ความสูงเหนือระดับทะเล (m)

Ht คือ ความสูงเหนือระดับพื้นดิน (m)

I_n คือ กระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (kA)

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

K_a คือ ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ

K_c คือ ตัวแปรในการประสานสัมพันธ์ฉนวน

K_s คือ ตัวแปรความปลอดภัย

K_{cd} คือ Deterministic Co-Ordination Factor

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

K_{cs} คือ ตัวแปรในการประสานฉนวนทางสถิติ

k คือ ตัวแปรความผิดพร่องลงดิน

L คือ ระยะห่างระหว่างกับดักเสิร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน (m)

L_a คือ ผลลัพธ์ของสายเหนือศีรษะต่ออัตราการขัดข้อง ที่ยอมรับได้ (m)

L_{sp} คือ ระยะห่างระหว่างเสา (Span length) (m)

LIW คือ มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (m)

m คือ ตัวแปรยกกำลังใช้เพื่อคำนวณ K_a สำหรับฉนวนภายนอก

n คือ จำนวนของสายส่งเหนือศีรษะต่อไปยังสถานีไฟฟ้า ในการหาค่าของขนาดเสิร์จที่มาปะทะ

R คือ ความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของฉนวน

R_a คือ อัตราการล้มเหลวที่ยอมรับของอุปกรณ์ เมื่อพิจารณาสำหรับสายส่ง ตัวแปรโดยปกติจะเขียนในรูป (1/years)

R_{km} คือ อัตราการขัดข้องของสายส่งเหนือศีรษะต่อปี สำหรับการออกแบบต่อหนึ่งกิโลเมตรแรก ในส่วนหน้าของสถานีไฟฟ้า โดยตัวแปรจะเขียนในรูป(1/km/year)

SDW คือ มาตรฐานความคงทนแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (kV)

SIW คือ มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (kV)

U^+ คือ แรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ขั้วบวกที่ใช้ทดสอบฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส (kV)

U^- คือ แรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ขั้วลบที่ใช้ทดสอบฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส (kV)

U_0^+ คือ ค่าสมมูลของส่วนประกอบระหว่างเฟสกับดินที่ใช้แทนค่าวิกฤตที่สุดระหว่างแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟส (equivalent positive phase-to-earth component use to represent the most critical phase to phase overvoltage) (kV)

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

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

U_{cw} คือ ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (kV)

U_{et} คือ ค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับดิน (kV)

U_{e2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับดินซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 % (kV)

U_m คือ แรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (kV)

U_n คือ แรงดันระบุของระบบ (kV)

U_{p2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟสซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 % (kV)

$U_{p2\text{-}re}$ คือ ตัวแทนแรงดันเกินของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า ระหว่างเฟสกับเฟสสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 (kV)

U_s คือ แรงดันสูงสุดของระบบ (kV)

U_w คือ มาตรฐานความคงทนแรงดัน (kV)

U_{pl} คือ ระดับการป้องกันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของกับดักเสิร์จ (kV)

U_{ps} คือ ระดับการป้องกันสวิตชิงอิมพัลส์ของกับดักเสิร์จ (kV)

U_{pt} คือ ค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำระหว่างเฟสกับเฟส (kV)

$U_{p\text{-}cw}$ คือ ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ ระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับแรงดันช่วงที่ 2 (kV)

$U_{p\text{-}rw}$ คือ ความคงทนแรงดันที่ต้องการของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ ระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับแรงดันช่วงที่ 2 (kV)

U_{rp} คือ ตัวแทนแรงดันเกิน (kV)

U_{rw} คือ ความคงทนแรงดันที่ต้องการ (kV)

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

ϕ คือ inclination angle แสดงคุณลักษณะฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ว่าที่ ร้อยตรี สกล สังขะกูล เกิดวันที่ 8 ตุลาคม 2527 ที่ จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2550 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 ปัจจุบันทำงานตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค