โปรแกรมสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนตามมาตรฐาน IEC 60071-2 :1996

ว่าที่ ร้อยตรี สกล สังขะกูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A COMPUTER SOFTWARE FOR INSULATION CO-ORDINATION ACCORDING TO IEC 60071-2:1996

Acting Sub Lt. Sakon Sangkakool

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โปรแกรมสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนตามมาตรฐาน IEC 60071-2 :1996
โดย	ว่าที่ ร้อยตรี สกล สังขะกูล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.อรรณพ ลิ้มสีมารัตน์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สกล สังขะกูล : โปรแกรมสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนตามมาตรฐาน IEC 60071-2:1996. (A COMPUTER SOFTWARE FOR INSULATION CO-ORDINATION ACCORDING TO IEC 60071-2:1996) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์, 143 หน้า.

มาตรฐานสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนตาม IEC 60071-2 : 1996 [1] มีความซับซ้อนยากที่จะทำความเข้าใจ โดยแสดงถึงการประยุกต์ใช้งาน และการเลือกระดับการฉนวนหรือการติดตั้งอุปกรณ์ในระบบ 3 เฟส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการลงทุนสูง โดยจุดมุ่งหมายหลักคือการหาค่าพิกัดความคงทนแรงดันของอุปกรณ์ในช่วงที่ 1 (ตั้งแต่ 3.6 kV ถึง 245 kV) และในช่วงที่ 2 (ตั้งแต่ 300 kV ถึง 800 kV) มาตรฐานนี้ครอบคลุมฉนวนระหว่างเฟสกับดิน และฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส กระบวนการประสานสัมพันธ์ฉนวนช่วยลดอัตราการเสียหายของอุปกรณ์ในระหว่างทำงาน ลดผลเสียจากการหยุดการทำงาน และลดการซ่อมบำรุง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ โปรแกรมที่แสดงถึงขั้นตอนการคำนวณของการประสานสัมพันธ์ฉนวน เพื่อให้ได้ค่าความคงทนแรงดันของอุปกรณ์ โดยผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลอินพุตในแต่ละขั้นตอน เช่น แหล่งกำเนิดแรงดันเกิน การเลือกใช้กับดักเสิร์จ เป็นต้น จุดประสงค์หลักของโปรแกรม คือ เพื่อความสะดวกในการคำนวณ และประโยชน์ในการวิเคราะห์ผลจากการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต สกล สังขะกูล

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก [illegible]

ปีการศึกษา 2553

5170717321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : INSULATION CO-ORDINATION / IEC-60071-2

SAKON SANGKAKOOL : A COMPUTER SOFTWARE FOR INSULATION CO-ORDINATION ACCORDING TO IEC 60071-2:1996. ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR KOMSON PETCHARAKS, Ph.D., 143 pp.

IEC 60071-2 : 1996 [1] specifies and recommends. the application and selection of insulation level of equipment, or equipment installation in 3-phase system. This is an important issue as it involves a high investment cost. The main objective of IEC 60071-2 : 1996 is to determine the rated withstand voltage of equipment in range I (from 1 kV to 245 kV) and in range II (from 300 kV to 800 kV). This standard covers both the phase-to-earth (p-e) and phase-to-phase (p-p) insulation. The insulation co-ordination procedure can reduce accidental rate of equipment damage during the operation, reduce disadvantage of work outage, and also reduce maintenance cost.

A computer software is developed to demonstrate the calculation steps of the insulation co-ordination to achieve the standard rated withstand voltage of an equipment. User can change input parameters in each step, e.g. overvoltages source, the selection of surge arrester. The aim is for the convenience in the calculation and benefit in the analysis of calculation result.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Electrical Engineering Student's Signature S. Sangkakool

Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature K. Petcharaks

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีโดยตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขจนเสร็จเรียบร้อยด้วยดีโดยตลอดต่อการทำวิทยานิพนธ์

นอกจากนั้นต้องขอบคุณพระคุณคณะกรรมการสอบ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล และ ดร.อรรณพ ลิ้มสีมารัตน์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอบสนับสนุน ให้โอกาส และความปรารถนาดีเสมอมา ตลอดจนทุกๆ ท่านที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ญ

สารบัญตาราง..... ฏ

สารบัญภาพ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์..... 1

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... 1

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินการ..... 2

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์..... 2

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์..... 2

บทที่ 2 กระบวนการประสานสัมพันธ์ฉนวน..... 3

2.1 การหาค่าตัวแทนแรงดันเกิน(U_{rp})..... 4

2.2 การหาค่าความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน(U_{cw})..... 5

2.3 การหาค่าความคงทนแรงดันที่ต้องการ(U_{rw})..... 6

2.4 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรง(U_{w})..... 6

บทที่ 3 การประยุกต์ใช้งานการประสานสัมพันธ์ฉนวน..... 12

3.1 ตัวแทนแรงดันเกิน(U_{rp})..... 12

3.1.1 แรงดันเกินความถี่กำลัง..... 12

3.1.2 แรงดันเกินชั่วคราว..... 12

3.1.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า..... 14

หน้า

3.1.3.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$36 kV)..... 14
3.1.3.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (52 kV$\leq U_m \leq$245 kV)..... 15
3.1.3.3 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (300 kV$\leq U_m \leq$800 kV)..... 16
3.1.3.3.1 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดิน..... 16
3.1.3.3.2 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส..... 16
3.1.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว..... 18
3.2 ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน(U_{cw})..... 18
3.2.1 แรงดันเกินชั่วคราว..... 18
3.2.2 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า..... 19
3.2.2.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$36 kV)..... 19
3.2.2.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (52 kV$\leq U_m \leq$245 kV)..... 19
3.2.2.3 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV$\leq U_m \leq$800 kV)..... 21
3. 2.2.3.1 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดิน..... 21
3. 2.2.3.2 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส..... 22
3.2.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว..... 23
3.2.3.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$245 kV)..... 23
3.2.3.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV$\leq U_m \leq$800 kV)..... 24
3.3 ความคงทนแรงดันที่ต้องการ(U_{rw})..... 24
3.3.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$245 kV)..... 24
3.3.1.1 ตัวแปรความปลอดภัย (K_s)..... 24
3.3.1.2 ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ (K_a)..... 25
3.3.1.3 ความคงทนแรงดันเกินที่ต้องการ(U_{rw}) สำหรับฉนวนภายใน..... 26
3.3.1.4 ความคงทนแรงดันเกินที่ต้องการ(U_{rw}) สำหรับฉนวนภายนอก..... 26
3.3.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV$\leq U_m \leq$800 kV)..... 26
3.3.2.1 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดิน..... 26
3.3.2.2 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส..... 27
3.4 การเปลี่ยนรูปของU_{rw}..... 27
3.4.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$245 kV)..... 27
3.4.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV$\leq U_m \leq$800 kV)..... 27

หน้า

3.5 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรง(U_w)..... 27
3.5.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$36 kV)..... 27
3.5.2 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (52 kV$\leq U_m \leq$245 kV)..... 29
3.5.3 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV$\leq U_m \leq$800 kV)..... 29
3.5.3.1 ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับดิน (Phase-to-earth clearances)..... 29
3.5.3.2 ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟส (Phase-to-phase clearances)..... 29

บทที่ 4 การออกแบบ และการใช้งานโปรแกรมการสำหรับประสานสัมพันธ์ฉนวน..... 33
4.1 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม ประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าในระบบ
230 kV ใน Range I (52 kV$\leq U_m \leq$245 kV) 35
4.1.1 ข้อมูลเบื้องต้น..... 35
4.1.2 ตัวแทนแรงดันเกิน(U_{rp})..... 36
4.1.2.1 แรงดันเกินความถี่กำลัง..... 36
4.1.2.2 แรงดันเกินชั่วคราว..... 37
4.1.2.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า..... 38
4.1.2.4 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว..... 43
4.1.3 ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน(U_{cw})..... 43
4.1.3.1 แรงดันเกินชั่วคราว..... 43
4.1.3.2 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า..... 44
4.1.3.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว..... 45
4.1.4 ความคงทนแรงดันที่ต้องการ(U_{rw})..... 47
4.1.5 Convert to withstand voltage normalized..... 50
4.1.6 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรง(U_w)..... 53

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ..... 57

รายการอ้างอิง..... 59
ภาคผนวก..... 60

หน้า

ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณการประสานสัมพันธ์ฉนวน..... 61
ภาคผนวก ข การติดตั้งโปรแกรม..... 94
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรมการประสานสัมพันธ์ฉนวน..... 98
ภาคผนวก ง ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ..... 140
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 143

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ประเภทแรงดันเกิน.....	4
2.2	มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$245 kV).....	8
2.3	มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 คือ$U_m >$ 245 kV.....	9
2.4	ตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปสำหรับแรงดันช่วงที่ 1.....	10
2.5	ตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปสำหรับแรงดันช่วงที่ 2.....	11
3.1	กระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ.....	14
3.2	ระดับการถ่ายเทประจุในสาย.....	14
3.3	ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์	14
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของตัวแปรในการประสานฉนวนทางสถิติ K_{cs} และความ เสี่ยงต่อการล้มเหลวของฉนวน(R) จากรูปที่ 3.4	22
3.5	ตัวแปร A เปลี่ยนแปลงตามชนิดของสายส่ง	24
3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างอากาศ(minimum air clearance).....	28
3.7	ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างอากาศระหว่างเฟสกับดิน.....	30
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างอากาศระหว่างเฟสกับเฟส.....	32
ก.1	ผลสรุปความคงทนแรงดันที่ต้องการค่าน้อยที่สุด สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV ในระดับแรงดันช่วงที่1	67
ก.2	การเลือกมาตรฐานระดับการฉนวน สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1	67
ก.3	ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟสของ ฉนวนภายนอก สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1	67

ตารางที่		หน้า
ก.4	ผลการเลือกค่าน้อยที่สุดของค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ของฉนวนภายใน สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1.....	68
ก.5	ผลสรุปความคงทนแรงดันที่ต้องการค่าน้อยที่สุด สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 230 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1.....	78
ก.6	การเลือกมาตรฐานระดับการฉนวน สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานี ไฟฟ้าระบบจำหน่าย 230 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1.....	79
ก.7	ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟสของฉนวนภายนอก สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 230 kV ในระดับแรงดันช่วงที่1.....	79
ก.8	ผลการเลือกค่าน้อยที่สุดของค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนภายใน สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 230 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1.....	79
ก.9	ผลการเลือกมาตรฐานความคงทนแรงดัน(U_w) สำหรับฉนวนภายใน สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าในระบบ 735 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 2	86
ก.10	ผลการเลือกมาตรฐานความคงทนแรงดัน(U_w) สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าในระบบ 735 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 2.....	87

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ผังงาน สำหรับการหาค่าพิกัดมาตรฐานความคงทนแรงดัน……..……..	3
3.1	อัตราส่วนค่า U_{e2} และU_{p2} ของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำจากผลของการปลดพลังงานออก (Re-Energization) …..……...	17
3.2	Inclination angle (Φ) สำหรับฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส ซึ่งจะขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟส (D) ต่อความสูงเหนือพื้นดิน (H_t)……..	18
3.3	การหาค่า Deterministic co-ordination factor (K_{cd})……	20
3.4	ความสัมพันธ์ความเสียงต่อการล้มเหลวของฉนวนภายนอกสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้ำ(R) เทียบกับตัวแปรในการประสานสัมพันธ์ฉนวนทางสถิติ ระหว่าง U_{cw} ……	21
3.5	เลขยกกำลังของตัวแปรชดเชยระดับความสูงสำหรับฉนวนภายนอก m ขึ้นกับค่า $U_{cw}(p-e)$ ……	25
3.6	เลขยกกำลังของตัวแปรชดเชยระดับความสูงสำหรับฉนวนภายนอก mขึ้นกับค่า $U_{cw}(p-p)$ ……	26
4.1	หน้าแรกของตัวโปรแกรมสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวน……	33
4.2	การประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับระดับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV $\leq U_m \leq$ 36 kV) ……..	33
4.3	การประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับระดับแรงดันช่วงที่ 1 (52 kV $\leq U_m \leq$ 245 kV) ……	34
4.4	การประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับระดับแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV $\leq U_m \leq$ 800 kV) ……...	34
4.5	ตัวอย่างการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันระบบ 230 kV ……	35
4.6	ขั้นตอนที่ 1U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.1 Power-frequency……...	36
4.7	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.2 Temporary Overvoltage……..	37
4.8	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.3.1 Overvoltage from remote station……	38
4.9	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.3.2 Overvoltage at station 1……..	39
4.10	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.3.3 Selection Surge Arrester……	40

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่		หน้า
4.11	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.3.4.1 For line entrance equipment……	42
4.12	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.3.4.2 For other equipment……	42
4.13	ขั้นตอนที่ 1U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.4 Fast-front overvoltage……..	43
4.14	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อยที่ 2.1 U_{cw} (Temporary overvoltage) ……..	43
4.15	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อยที่ 2.2 U_{cw} (Slow-front overvoltage) ……	44
4.16	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อยที่ 2.3.1 ข้อมูล Input สำหรับ U_{cw} (Fast-front overvoltage) ……	45
4.17	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อยที่ 2.3.2 ผลการคำนวณ U_{cw} (Fast-front overvoltage) ……	47
4.18	ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อยที่ 3.1 ข้อมูล Input สำหรับคำนวณ U_{rw} ……..	47
4.19	ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อยที่ 3.2 ผลการคำนวณคำนวณ U_{rw} ……..	48
4.20	ขั้นตอนที่ 4 Convert to withstand voltage normalized หัวข้อย่อยที่ 4.1 Short-duration power-frequency withstand voltage……..	50
4.21	ขั้นตอนที่ 4 Convert to withstand voltage normalized หัวข้อย่อยที่ 4.2 Lightning Impulse withstand voltage……..	51
4.22	ขั้นตอนที่ 5 Standard withstand volatage หัวข้อย่อยที่ 5.1 Summary of minimum required withstand voltage……	53
4.23	ขั้นตอนที่ 5 Standard withstand volatage หัวข้อย่อยที่ 5.2 Selection of standard withstand voltage values……	53
ก.1	วงจรที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนในระดับแรงดันช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2……..	61
ข.1	Setup File……..	94
ข.2	Welcome to Insulation Co-Ordination According to IEC 60071-2 Setup Wizard……...	94
ข.3	Select Installation Folder……...	95
ข.4	Confirm Installation……..	95
ข.5	Installation Complete……..	96
ข.6	Shortcut Insulation Co-Ordination……..	97
ข.7	การเรียกใช้งานโปรแกรมจาก Manu Start……..	97

รูปที่		หน้า
ค.1	ตัวอย่างการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันระบบ 22 kV……	98
ค.2	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.1 Power-frequency……	98
ค.3	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.2 Temporary Overvoltage……	99
ค.4	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.1 Overvoltage originate from station 1……	100
ค.5	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.2 Selection surge arrester……..	101
ค.6	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.3 Representative Overvoltage……..	103
ค.7	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.4 Fast-front overvoltage……	103
ค.8	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1 U_{cw} (Temporary Overvoltage)……	104
ค.9	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2 U_{cw} (Slow-Front Overvoltage) ……..	105
ค.10	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.3.1 ข้อมูล Input สำหรับ U_{cw} (Slow-Front Overvoltage) ……..	105
ค.11	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.3.2 ผลการคำนวณ U_{cw} (Slow-Front Overvoltage) ……..	107
ค.12	ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.1 ข้อมูล Input สำหรับการคำนวณ U_{rw} ……..	107
ค.13	ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.2 ผลการคำนวณ U_{rw} ……..	108
ค.14	ขั้นตอนที่ 4 Conversion to withstand voltage normalized หัวข้อย่อย 4.1 SDW ……..	110
ค.15	ขั้นตอนที่ 4 Conversion to withstand voltage normalized หัวข้อย่อย 4.2….	111
ค.16	ขั้นตอนที่ 5 Standard withstand voltage values หัวข้อย่อยที่ 5.1 Summary of minimum required withstand voltages……..	113
ค.17	ขั้นตอนที่ 5 Standard withstand voltage values หัวข้อย่อยที่ 5.2 Selection of standard withstand voltage values……..	113
ค.18	พิจารณาแรงดันระบบ 735 kV……	115
ค.19	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.1 Power-frequency……	116
ค.20	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.2 Temporary Overvoltage……..	117
ค.21	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.1 Overvoltage originate from station 1…..	118
ค.22	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.2 Selection surge arrester……..	119
ค.23	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.2 Representative Overvoltage……	120

รูปที่		หน้า
ค.24	ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.4 Fast-front Overvoltage……..	121
ค.25	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1.1 TOV สำหรับฉนวนภายใน…….	122
ค.26	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1.2 SOV สำหรับฉนวนภายใน……..	122
ค.27	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1.3.1 ข้อมูลอินพุตสำหรับ FOV……...	123
ค.28	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} สำหรับ FOV……..	124
ค.29	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2.1 TOV สำหรับฉนวนภายนอก……..	125
ค.30	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2.2 SOV สำหรับฉนวนภายนอก……..	125
ค.31	ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2.3 FOV สำหรับฉนวนภายนอก……..	126
ค.32	ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.1 FOV สำหรับฉนวนภายใน…….	127
ค.33	ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.2 สำหรับฉนวนภายนอก……..	128
ค.34	ขั้นตอนที่ 4 Conversion to switching impulse withstand voltage (SIW)…	129
ค.35	ขั้นตอนที่ 4 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w)……	130
ค.36	ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อยที่ 6.1.1 Overvoltage at station 1……	132
ค.37	ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อยที่ 6.1.2 $U_{p2\text{-}re}$ ……	132
ค.38	ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อยที่ 6.1.3 $U_{p\text{-}cw}$ ……	133
ค.39	ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อย 6.1.4 $U_{p\text{-}rw}$ ……	134
ค.40	ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อย 6.2.1 U_{rp} ……	134
ค.41	ขั้นตอนที่ 6 P-to-P insulation co-ordination หัวข้อย่อย 6.1.4 U_{cw} ……	135
ค.42	ขั้นตอนที่ 6 P-to-P Insulation Co-Ordination หัวข้อย่อยที่ 6.2.3.1 U_{rw} สำหรับ Internal Insulation……	135
ค.43	ขั้นตอนที่ 6 P-to-P Insulation Co-Ordination หัวข้อย่อยที่ 6.2.3.2 U_{rw} สำหรับ External Insulation……...	136
ค.44	ขั้นตอนที่ 6 P-to-P Insulation Co-Ordination หัวข้อย่อยที่ 6.2.4 SIW ……	137
ค.45	ขั้นตอนที่ 7 Clearance หัวข้อย่อยที่ 7.1 P-to-E Clearance……..	138
ค.46	ขั้นตอนที่ 7 Clearance หัวข้อย่อยที่ 7.1 P-to-P Clearance……..	139

บทที่1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มาตรฐานสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนตาม IEC 60071-2 : 1996 [1] มีความซับซ้อนยากที่จะทำความเข้าใจ โดยแสดงถึงการประยุกต์ใช้งาน และการเลือกระดับการฉนวน หรือการติดตั้งอุปกรณ์ในระบบ 3 เฟส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญเกี่ยวข้องกับการลงทุนสูง โดยจุดมุ่งหมายหลักคือ การหาค่าพิกัดความคงทนแรงดันของอุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบแรงดันในช่วงที่ 1 (ตั้งแต่ 3.6 kV ถึง 245 kV) และในช่วงที่ 2 (ตั้งแต่ 300 kV ถึง 800 kV) มาตรฐานนี้ครอบคลุมฉนวนระหว่างเฟสกับดิน และฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส กระบวนการประสานสัมพันธ์ฉนวนช่วยลดอัตราการเสียหายของอุปกรณ์ในระหว่างทำงาน ลดผลเสียจากการหยุดการทำงาน และลดการซ่อมบำรุง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอโปรแกรมที่แสดงถึงขั้นตอนการคำนวณของการประสานสัมพันธ์ฉนวน เพื่อให้ได้ค่าความคงทนแรงดันของอุปกรณ์ โดยผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลอินพุตในแต่ละขั้นตอน เช่น แหล่งกำเนิดแรงดันเกิน การเลือกใช้กับดักเสิร์จ เป็นต้น จุดประสงค์หลักของโปรแกรม คือ เพื่อความสะดวกในการคำนวณ และประโยชน์ในการวิเคราะห์ผลจากการคำนวณ

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อช่วยให้การประสานสัมพันธ์ฉนวนให้เป็นไปตามมาตรฐาน และมีความสะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น
2. เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลอินพุตในแต่ละขั้นตอนของการประสานสัมพันธ์ฉนวนได้เหมาะสมกับความต้องการ
3. เพื่อศึกษาการประสานสัมพันธ์ฉนวนของอุปกรณ์ที่ใช้งานที่ระดับแรงดันในช่วงที่ 1 และ ช่วงที่ 2

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบแรงดันในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2
2. สามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลอินพุตในแต่ละขั้นตอนของการประสานสัมพันธ์ฉนวนได้
3. สามารถเลือกใช้กับดักเสิร์จเพื่อป้องการแรงดันเกินตามความต้องการผู้ใช้
4. สามารถแสดงผลการประสานสัมพันธ์ฉนวนในรูปแบบตารางข้อมูลได้

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินการ

1. ศึกษาขั้นตอนการประสานสัมพันธ์ฉนวนตามมาตรฐาน IEC 60071-2 : 1996
2. ศึกษาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
3. ออกแบบ และเขียนโปรแกรมสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวน
4. ทดสอบการทำงานให้เป็นไปตามมาตรฐาน
5. สรุปและแก้ไขข้อบกพร่อง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

ทำให้การประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับอุปกรณ์ที่ระดับแรงดันในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 มีความสะดวก และลดความซับซ้อนในการคำนวณ เพื่อให้ได้มาซึ่งความคงทนแรงดันของอุปกรณ์ผ่านตามมาตรฐาน IEC 60071-1: 2006 และตามความต้องการของผู้ใช้

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่จะนำเสนอในแต่ละบทเรียงลำดับดังนี้

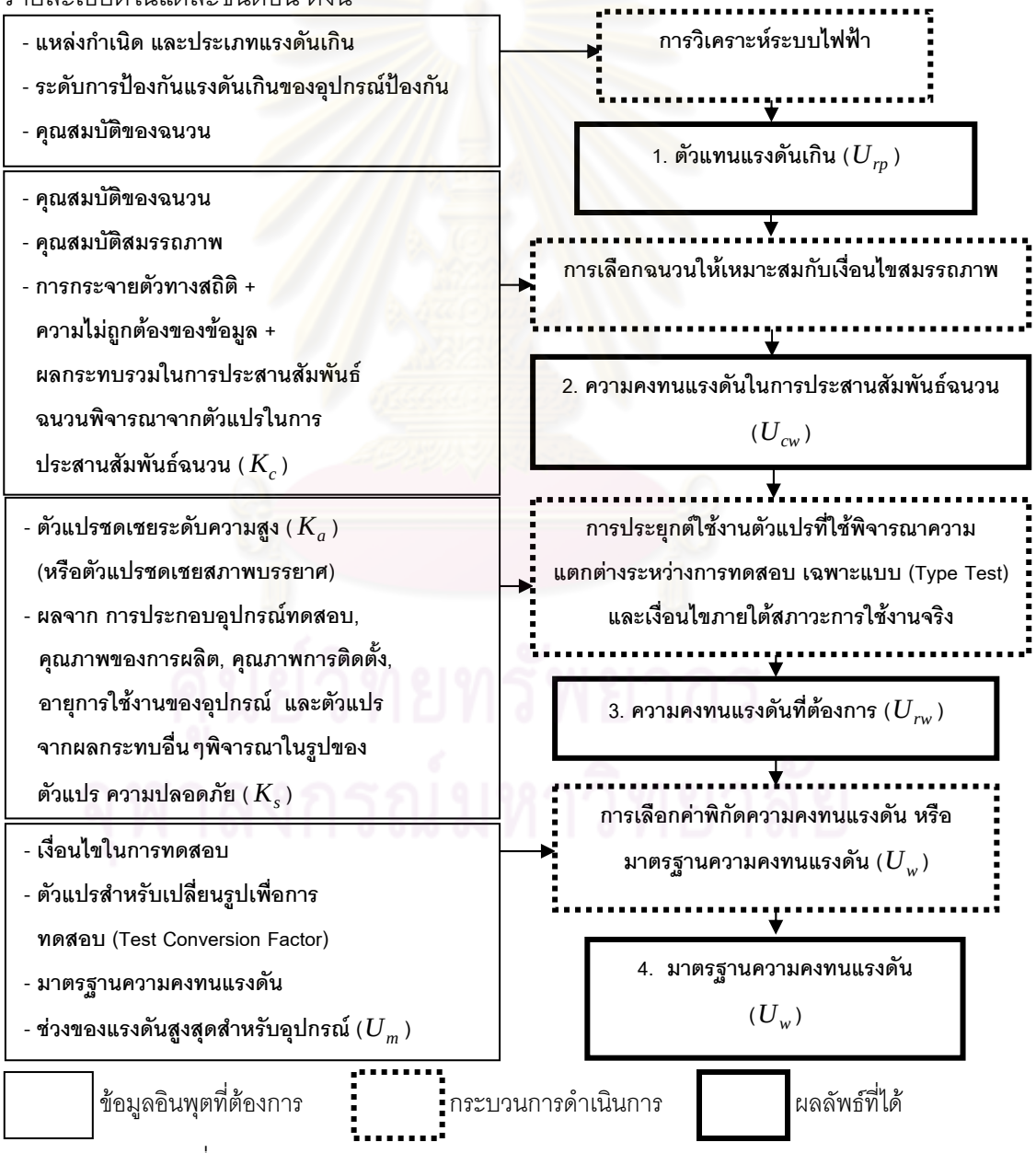
บทที่ 2 กระบวนการประสานสัมพันธ์ฉนวน
บทที่ 3 การประยุกต์ใช้งานการประสานสัมพันธ์ฉนวน
บทที่ 4 การออกแบบ และการใช้งานโปรแกรมการสำหรับประสานสัมพันธ์ฉนวน
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

กระบวนการประสานสัมพันธ์ฉนวน

กระบวนการประสานสัมพันธ์ฉนวน มีจุดมุ่งหมายหลัก คือ การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w) ที่เหมาะสม ที่ระดับแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) ที่พิจารณา ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.1 กระบวนการประสานสัมพันธ์ฉนวนประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก คือ ตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp}), ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw}), ความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw}) และการเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w) โดยได้อธิบายถึงรายละเอียดในแต่ละขั้นตอน ดังนี้



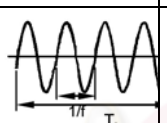
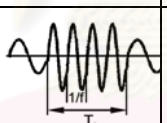
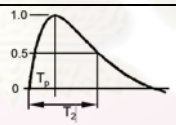
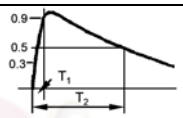
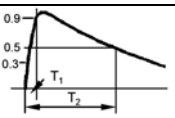
รูปที่ 2.1 ผังงาน สำหรับการหาค่าพิกัดมาตรฐานความคงทนแรงดัน

2.1 การหาค่าตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp})

จากรูปที่ 2.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ทำให้ทราบค่าแรงดันเกินซึ่งก่อให้เกิดความเครียดต่อฉนวน โดยพิจารณาจากขนาด รูปคลื่น และช่วงเวลา ซึ่งจะต้องพิจารณาตำแหน่งของการเกิดแรงดันเกิน เพื่อหาวิธีการป้องกัน โดยเลือกอุปกรณ์เพื่อจำกัดแรงดันเกินที่เหมาะสม

แรงดันเกินแต่ละประเภท ใช้เพื่อวิเคราะห์เพื่อหาค่าตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp}) จากตารางที่ 2.1 พิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างรูปคลื่นของแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันตามมาตรฐาน เพื่อใช้หาค่ามาตรฐานความคงทนของแรงดันในการทดสอบ

ตารางที่ 2.1 ประเภทของแรงดันเกิน [2]

ประเภท	ความถี่ต่ำ		สภาวะชั่วครู่ (Transient)		
	แรงดันเกินต่อเนื่อง (COV)	แรงดันเกินชั่วคราว (TOV)	แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า (SOV)	แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว (FOV)	แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วมาก (VFFV)
รูปคลื่นแรงดัน					
ช่วงของแรงดัน	f=50Hz หรือ 60 Hz $\tau_t \geq 3600$ s	10 Hz < f < 500 Hz 0.02s $\leq \tau_t \leq$ 3600 s	20uS $\leq T_p \leq$ 5000 us $T_2 \leq 20$ ms	0.1 uS $\leq T_1 \leq$ 20 us $T_2 \leq 300$ us	$T_f \leq 100$ ns 0.3 MHz < f_1 < 100 MHz 30 KHz < f_2 < 300 KHz
รูปคลื่นแรงดันมาตรฐาน	f=50Hz หรือ 60 Hz τ_t *)	48 Hz $\leq$ f $\leq$ 62 Hz τ_t = 60 s	τ_p = 250 us τ_2 = 2500 us	τ_1 = 1.2 us τ_2 = 50 us	*)
มาตรฐานความคงทนแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ	*)	ความถี่กำลังช่วงเวลาสั้นที่ใช้ในการทดสอบ (SDW)	สวิตชิงอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบ (SIW)	อิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ใช้ในการทดสอบ (LIW)	*)
*) กำหนดโดยคณะกรรมการที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์นั้นๆ					

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 2.1 ประเภทของตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp}) มีดังนี้

- แรงดันต่อเนื่องความถี่กำลัง กำหนดให้เท่ากับแรงดันสูงสุดของระบบ (U_s)
- แรงดันเกินชั่วคราว เกิดจากความผิดพร่อง การปลดโหลด หรือเกิดภายใต้สภาวะแรโซแนน เป็นต้น
- แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า เกิดจากความผิดพร่อง การสวิตชิง หรือเกิดฟ้าผ่าโดยตรงไปยังสายส่ง
- แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว เกิดจากการสวิตชิง ฟ้าผ่า หรือความผิดพร่อง
- แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วมาก เกิดจากความผิดพร่อง หรือการสวิตชิง ในสถานีไฟฟ้าภายในอาคาร ซึ่งใช้แก๊ส SF_6 เป็นฉนวน

2.2 การหาค่าความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw})

การหาค่าความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน คือ การหาค่าที่น้อยที่สุดของความคงทนแรงดันของฉนวนให้สอดคล้องกับ เงื่อนไขสมรรถภาพ (performance criterion) เพื่อให้ฉนวนสามารถรับภาระได้ ภายใต้สภาวะการทำงานปกติที่ต้องเจอกับตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp})

ค่าความคงทนแรงดันที่ใช้ในการประสานสัมพันธ์ฉนวน หาค่าโดยนำตัวแทนแรงดันเกิน(U_{rp}) คูณด้วยตัวแปรในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (K_c) โดย K_c ขึ้นกับปัจจัยดังนี้

- คุณสมบัติของฉนวน
- เงื่อนไขสมรรถภาพ (performance criterion)
- ความถูกต้องในการหาค่าตัวแทนแรงดันเกิน
- การประเมินค่าทางสถิติ จากการกระจายตัวของแรงดันเกิน

ความคงทนของแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน หาค่าได้โดยวิธีใดวิธีหนึ่ง คือ การสมมุติค่าความคงทนของแรงดัน หรือ การหาค่าความคงทนของแรงดันทางสถิติ ซึ่งการเลือกใช้วิธีการใดนั้นจะส่งผลกระทบต่อการหาค่าตัวแปรในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (K_c) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 3

2.3 การหาค่าความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw})

การหาค่าความคงทนของแรงดันที่ต้องการ คือ การเปลี่ยนแปลงค่าความคงทนของแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw}) ให้เป็นไปตามเงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐาน (Standard test condition) โดยการคูณความคงทนของแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw}) ด้วยตัวแปรซึ่งมีหน้าที่ชดเชยความแตกต่างระหว่างสภาวะการใช้งานจริงของฉนวน และมาตรฐานความคงทนของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งตัวแปรที่ทำหน้าที่ชดเชย มีดังนี้

- ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ (K_a) ทำหน้าที่ชดเชยความแตกต่างระหว่างความคงทนของไดอิเล็กตริก (dielectric strength) ภายใต้สภาวะความดันเฉลี่ย ณ จุดที่พิจารณาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานความดันอ้างอิง

- ตัวแปรความปลอดภัย (K_s) มีหน้าที่ชดเชยผลกระทบจาก ความแตกต่างในการประกอบอุปกรณ์, การกระจายตัวจากคุณภาพในการผลิต, คุณภาพในการติดตั้ง, อายุการใช้งานของฉนวนที่คาดการณ์ไว้ และอิทธิพลอื่นที่เราไม่รู้ โดยการพิจารณาตัวแปรความปลอดภัยนั้นไม่สามารถหาผลกระทบจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งได้ ดังนั้นตัวแปรความปลอดภัยเป็นค่าที่ได้จากประสบการณ์ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 3

2.4 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w)

การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w) ของฉนวน จะต้องพิจารณาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ และต้องเพียงพอที่จะพิสูจน์ได้ว่าสามารถรับภาระทั้งหมดของความคงทนแรงดันที่ต้องการได้

การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w) เริ่มต้นจากการเลือกค่าแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) โดยจะเลือกจากค่า U_m ที่มากกว่า หรือเท่ากับแรงดันสูงของระบบ (U_s) ที่นำอุปกรณ์ไปติดตั้ง ซึ่งมาตรฐานแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

แรงดันช่วงที่ 1 แรงดันมากกว่า 3.6 kV ถึง 245 kV พิจารณาจากตารางที่ 2.2 ที่ระดับแรงดันนี้จะครอบคลุมทั้งระบบส่ง และระบบจำหน่าย

แรงดันช่วงที่ 2 แรงดันมากกว่า 245 kV พิจารณาจากตารางที่ 2.3 ที่ระดับแรงดันนี้จะครอบคลุมระบบส่งเท่านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อทราบค่า U_m หลังจากนั้นทำการเลือกค่าของความคงทนแรงดัน พิจารณาจากตารางมาตรฐานพิกัดความคงทนแรงดันโดยเลือกค่ามากกว่า หรือเท่ากับ

- ความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw}) ในกรณีที่มีรูปคลื่นของ U_{rw} ตรงกับตารางมาตรฐานพิกัดความคงทนแรงดัน

- ความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw}) คูณด้วย ตัวแปรสำหรับเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) ในกรณีที่รูปคลื่น U_{rw} แตกต่างไปจากตารางมาตรฐานพิกัดความคงทนแรงดัน

การเลือกค่าตัวแปรสำหรับเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) แรงดันช่วงที่ 1 พิจารณาจากตารางที่ 2.4 จะเปลี่ยนรูปคลื่นความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงที่ต้องการ (SIW) ไปเป็น ความคงทนแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (SDW) และความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW) เนื่องจาก SDW และ LIW ครอบคลุมความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงที่ต้องการ (SIW) และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2.2 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 แรงดันมากกว่า 3.6 kV ถึง 245 kV รูปคลื่นแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ คือ มาตรฐานพิกัดความคงทนแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (SDW) และมาตรฐานพิกัดความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW)

การเลือกค่าตัวแปรสำหรับเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) สำหรับแรงดันช่วงที่ 2 พิจารณาจากตารางที่ 2.5 จะเปลี่ยนรูปคลื่นความคงทนแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้นที่ต้องการ (SDW) ไปเป็นความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (SIW) เนื่องจาก SIW ครอบคลุมความคงทนแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้นต้องการ (SDW) และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 แรงดันมากกว่า 245 kV รูปคลื่นแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ คือ มาตรฐานพิกัดความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (SIW) ส่วนการพิจารณาเลือกค่ามาตรฐานพิกัดความคงทนแรงดันอิมฟ้าผ่า (LIW) จะพิจารณาเลือกจากความคงทนแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วที่ต้องการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$245 kV) [2]

แรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) kV(r.m.s)	มาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (SDW) kV(r.m.s)	มาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW) kV(Peak)
3.6	10	20
		40
7.2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17.5[a]	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52[a]	95	250
72.5	140	325
100[b]	(150)	(380)
	185	450
123	(185)	(450)
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170[a]	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อสังเกตจากตารางที่ 2.2

-ถ้าค่าในวงเล็บไม่เพียงพอสำหรับการพิสูจน์ ความคงทนของแรงดันเฟสเทียบเฟสที่ต้องการ อาจจะเพิ่มค่าแรงดันทดสอบความคงทนของแรงดันเฟสเทียบเฟสถ้าจำเป็น

-ค่ายกกำลัง a เป็นค่า U_m ที่ไม่นิยมใช้ใน IEC 60038 และไม่ค่อยนิยมใช้ในมาตรฐานของอุปกรณ์

-ค่ายกกำลัง b เป็นค่า U_m ที่ไม่ได้กล่าวถึง ใน IEC 60038 แต่ค่านี้เป็นค่าที่แนะนำให้ใช้ช่วงที่ 1 ในมาตรฐานของบางอุปกรณ์

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 คือ U_m > 245 kV [2]

แรงดันสูงสุดสำหรับ อุปกรณ์ (U_m) kV (r.m.s)	มาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ (SIW)			มาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW) kV (peak)
	ฉนวนตามยาว kV (peak)	ระหว่างเฟสกับเฟส kV (peak)	ระหว่างเฟสกับเฟส (อัตราส่วนระหว่างเฟสกับดินค่ายอด)	
300	750	750	1.5	850
				950
	750	850	1.5	950
				1050
362	850	850	1.5	950
				1050
	850	950	1.5	1050
				1175
420	850	850	1.6	1050
				1175
	950	950	1.5	1175
				1300
	950	1050	1.5	1300
				1425
550	950	950	1.7	1175
				1300
	950	1050	1.6	1300
				1425
	950 1050	1175	1.5	1425
				1550

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 2 คือ U_m > 245 kV [2]

แรงดันสูงสุดสำหรับ อุปกรณ์ (U_m) kV (r.m.s)	มาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ (SIW)			มาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW) kV (peak)
	ฉนวนตามยาว kV (peak)	ระหว่างเฟสกับเฟส kV (peak)	ระหว่างเฟสกับเฟส (อัตราส่วนระหว่างเฟสกับดินค่ายอด)	
800	1175	1300	1.7	1675
				1800
	1175	1425	1.7	1800
				1950
	1175	1550	1.6	1950
	1300			2100

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ แรงดันช่วงที่ 1 [1]

ฉนวน	SDW	LIW
ฉนวนภายนอก		
- ช่องว่างอากาศ และฉนวนสะอาด ในสภาวะแห้ง		
ระหว่างเฟสกับดิน	$0.6+U_{rw}/8500$	$1.05+U_{rw}/6000$
ระหว่างเฟสกับเฟส	$0.6+U_{rw}/12700$	$1.05+U_{rw}/9000$
- ฉนวนสะอาด ในสภาวะเปียก	0.6	1.3
ฉนวนภายใน		
GIS	0.7	1.25
ฉนวนแช่อยู่ในของเหลว	0.5	1.10
ฉนวนแข็ง	0.5	1.00
ข้อสังเกต : U_{rw} คือ ความคงทนแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการ (kV)		
[1)] ตัวแปรการเปลี่ยนรูปสำหรับการทดสอบในสมการเป็นค่าประสิทธิผล (rms)		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 ตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ แรงดันช่วงที่ 2 [1]

ฉนวน	ความคงทนแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ (SIW)
ฉนวนภายนอก	
- air clearance และฉนวนที่สะอาด หรือ แห้ง	1.4
-ฉนวนที่สะอาด หรือเปียก	1.7
ฉนวนภายใน	
- GIS	1.6
- ฉนวนจุ่มของเหลว	2.3
- ฉนวนแข็ง	2.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การประยุกต์ใช้งานการประสานสัมพันธ์ฉนวน

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

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

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

3.1 ตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp})

3.1.1 แรงดันเกินความถี่กำลัง

แรงดันเกินต่อเนื่องความถี่กำลังมีค่าเท่ากับแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m)

$$U_{rp} = U_m \tag{3.1}$$

$$1\ pu = \sqrt{2}\frac{U_m}{\sqrt{3}} \tag{3.2}$$

3.1.2 แรงดันเกินชั่วคราว

แหล่งกำเนิดแรงดันเกินชั่วคราวที่เป็นไปได้ คือ ความผิดพร่องลงดิน (Earth Fault), การปลดโหลด (Load Reject), สภาวะแรโซแนน (Resonance) หรือ ผลรวมจากทุกแหล่งกำเนิด (Combine) โดยตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ คือ

U_{e2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับดินซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 %

U_{p2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟสซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 %

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

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

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

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

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

การคำนวณตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราว สำหรับกรณีความผิดพร่องลงดิน (Earth Fault) พิจารณาจากสมการ

k คือ ตัวแปรความผิดพร่องลงดิน

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

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

ตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราวที่ใช้แทนค่า เลือกจากค่าสูงสุดจากทุกแหล่งกำเนิดแรงดันเกินที่เป็นไปได้

ตารางที่ 3.1 กระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ [5]

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

ตารางที่ 3.2 ระดับการถ่ายเทประจุในสาย [5]

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

ตารางที่ 3.3 ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ [6]

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

3.1.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

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

แหล่งกำเนิดแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าที่เป็นไปได้ คือ การจ่ายพลังงาน และการจ่ายพลังงานกลับอีกครั้ง(Energization and Re-Energization), การปลดโหลด(Load Reject), ความผิดพร่อง และการทำให้ความผิดพร่องหายไป(Fault and Fault Clearing) และ การสวิตชิงในระบบที่มีตัวเก็บประจุ (Switching Capacitive Current) คือ

U_{et} คือ ค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับดิน

U_{pt} คือ ค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับเฟส

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

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

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

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

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

การคำนวณค่าสูงสุดของตัวแทนแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าจากความผิดพร่อง และการทำให้ความผิดพร่องหายไป(Fault and Fault Clearing) พิจารณาได้ตามสมการ

k คือตัวแปรความผิดพร่องลงดิน

- การเริ่มเกิดความผิดพร่อง

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

- การทำให้ความผิดพร่องหายไป

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

พิจารณาเลือกค่า U_{et} และ U_{pt} ค่ามากที่สุดจากทุกแหล่งกำเนิด สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m <$ 52 kV) พิจารณาตัวแทนแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าจากสมการ

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

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

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

การคำนวณแหล่งกำเนิดแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าที่เป็นไปได้ พิจารณาเช่นเดียวกับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ตั้งแต่ 3.6 kV ถึง 36 kV ส่วนที่แตกต่าง คือการพิจารณาแหล่งกำเนิดแรงดันเกิน แยกระหว่าง

- แหล่งกำเนิดแรงดันเกินที่เกิดจากสถานีไฟฟ้าระยะไกล (Remote Station) โดยพิจารณา ณ สถานีไฟฟ้าที่ทำการประสานสัมพันธ์ฉนวน เพื่อการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับอุปกรณ์สายส่งทางด้านเข้า (Line Entrance Equipment)

- แหล่งกำเนิดแรงดันเกิน ที่เกิด ณ สถานีไฟฟ้าที่ทำการประสานสัมพันธ์ฉนวน เพื่อการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับอุปกรณ์อื่นๆ (Other Equipment)

ส่วนที่แตกต่างจากการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ตั้งแต่ 3.6 kV ถึง 36 kV คือ หลังจากพิจารณาเลือกค่า U_{et} และ U_{pt} ค่ามากที่สุดจากทุกแหล่งกำเนิด การพิจารณาตัวแทนแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าจะพิจารณาจากสมการ

$$U_{rp}(p-e) = U_{ps} \quad When\ U_{et} > U_{ps}$$
$$= U_{et} \quad When\ U_{et} < U_{ps} \tag{3.12}$$

$$U_{rp}(p-p) = 2U_{ps} \quad When\ U_{et} > 2U_{ps}$$
$$= U_{pt} \quad When\ U_{pt} < 2U_{ps} \tag{3.13}$$

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

3.1.3.2.1 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดิน

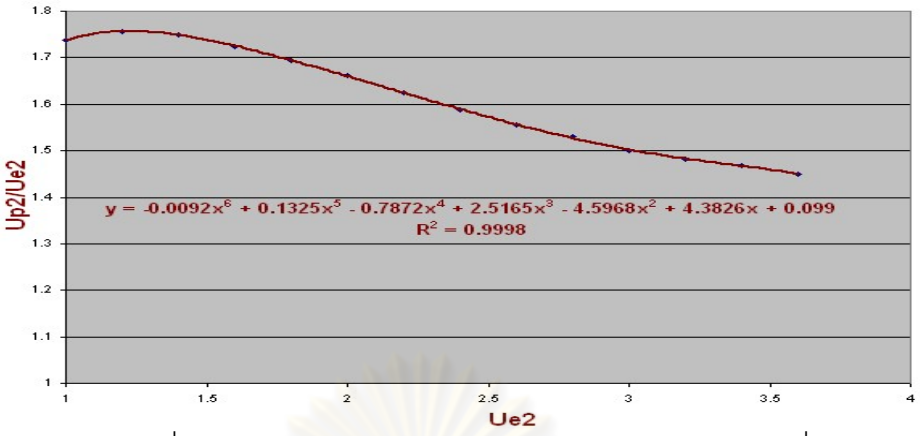
พิจารณาเช่นเดียวกับ การประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ตั้งแต่ 52 kV ถึง 245 kV

3.1.3.2.2 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

ตัวแทนแรงดันเกินของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า ระหว่างเฟสกับเฟส สำหรับแรงดันช่วงที่ 2 ($U_{p2\text{-}re}$) การคำนวณค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าจาก การปลดโหลด (Load Reject) , การสวิตชิงในระบบที่มีตัวเก็บประจุ(Switching Capacitive Current) ,ผลจากความผิดพร่อง และการทำให้ความผิดพร่องหายไป พิจารณาเช่นเดียวกับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ตั้งแต่ 3 kV ถึง 36 kV

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

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



รูปที่ 3.1 อัตราส่วนค่า U_{e2} และ U_{p2} ของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้า
จากผลของการจ่ายพลังงานกลับอีกครั้ง(Re-Energization)

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าตัวแทนแรงดันเกินของแรงดันเกินหน้าคลื่นซ้าระหว่างเฟสกับเฟส ($U_{p2\text{-}re}$) ประกอบด้วย ความสูงเหนือพื้นดิน (Ht) และระยะระหว่างเฟสกับเฟส (D)

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

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

B คือ ตัวแปรอธิบายคุณลักษณะการคายประจุ(Discharge) ระหว่างเฟสกับเฟส

เมื่อทราบค่า Φ ทำให้ทราบค่า B พิจารณาจากสมการ

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

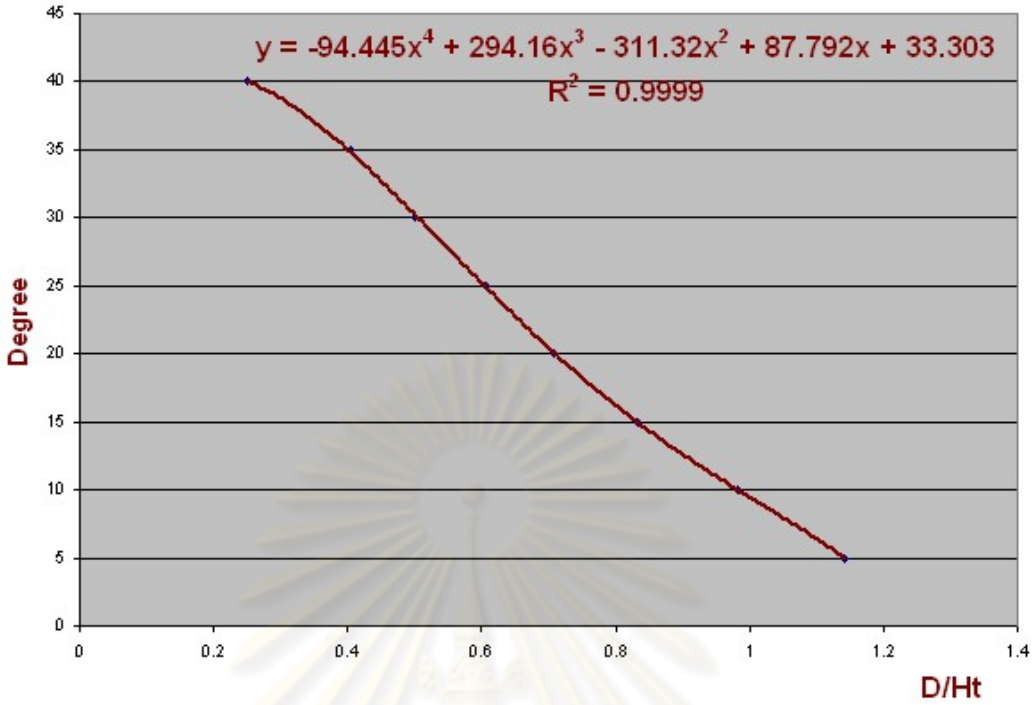
เมื่อทราบค่า B ทำให้ทราบค่า F_1 และ F_2 ซึ่งคำนวนได้จากสมการ

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

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

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

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



รูปที่ 3.2 Inclination angle (Φ) สำหรับฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส ซึ่งจะขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง ระยะระหว่างเฟสกับเฟส (D) ต่อความสูงเหนือพื้นดิน (Ht)

3.1.4 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วคำนวณในขั้นตอนการหาค่าความคงทนแรงดันเกินในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw})

3.2 ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw})

ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนหาค่าโดยตัวแทนแรงดันเกิน(U_{rp}) คูณด้วยตัวแปรในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (K_c)

3.2.1 แรงดันเกินชั่วคราว

ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน มีค่าเท่ากับตัวแทนแรงดันเกินชั่วคราว กล่าวอีกอย่างหนึ่ง คือ ตัวแปรในการประสานฉนวน (K_c) เท่ากับ 1

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

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

พิจารณาความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันเกินชั่วคราวจากสมการ

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

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

3.2.2 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

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

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

$U_{cw}(p\text{-}e)$ คือ ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดินสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

$U_{cw}(p\text{-}p)$ คือ ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดินสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

พิจารณาความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าจากสมการ

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

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

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

กาหาค่า Deterministic co-ordination factor (K_{cd}) ขึ้นกับความสัมพันธ์ ระดับการป้องกันสวิตชิงอิมพัลส์ของกับดักเสริจ U_{ps} และ U_{e2} พิจารณาจากรูปที่ 3.3

พิจารณาความสัมพันธ์ U_{ps} และ U_{e2} สำหรับระหว่างเฟสกับดินจากสมการ

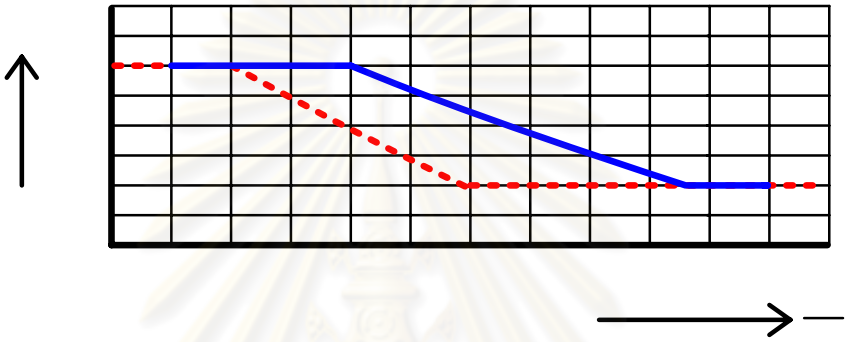
$$K_{cd} = \begin{cases} 1.1 & When\ \dfrac{U_{ps}}{U_{e2}} \leq 0.7 \\ 1.1 - \dfrac{\left[(0.7 - \dfrac{U_{ps}}{U_{e2}}) \times (1.1\text{-}1)\right]}{(0.7 - 1.243)} & When\ 0.7 < \dfrac{U_{ps}}{U_{e2}} < 1.243 \\ 1 & When\ \dfrac{U_{ps}}{U_{e2}} \geq 1.243 \end{cases} \tag{3.24}$$

พิจารณาความสัมพันธ์ U_{ps} และ U_{p2} สำหรับระหว่างเฟสกับเฟสจากสมการ

$$K_{cd} = 1.1 \qquad When \ \frac{2U_{ps}}{U_{p2}} \le 0.5$$

$$= 1.1 - \frac{\left[(0.5 - \frac{2U_{ps}}{U_{p2}}) \times (1.1 - 1)\right]}{(0.5 - 0.9)} \qquad When \ 0.5 < \frac{2U_{ps}}{U_{p2}} < 0.9 \qquad (3.25)$$

$$= 1 \qquad When \ \frac{2U_{ps}}{U_{p2}} \ge 0.9$$



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

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

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

1.15

Kcd

1.10

พิจารณาความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าจากสมการ

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

1.05

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

(b)

1.00

0.95

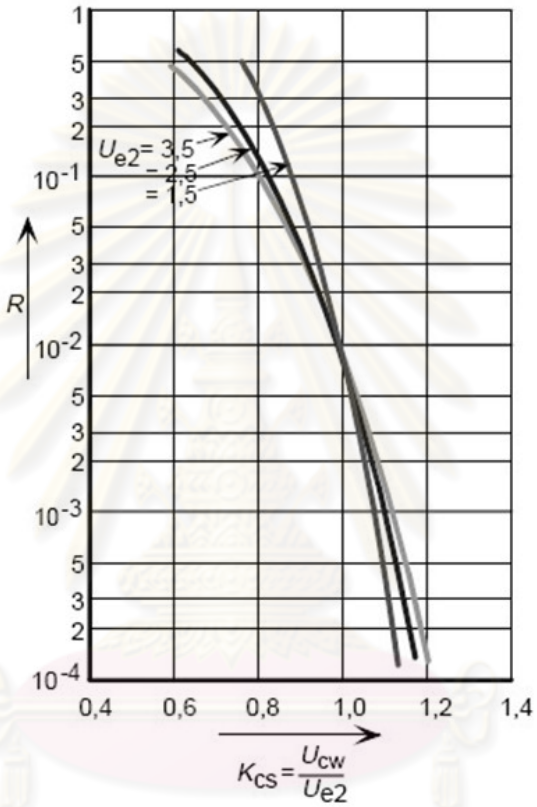
0.3 0.5 0.7

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

3.2.2.3.1 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดิน

U_{cw} สำหรับฉนวนภายใน พิจารณาเช่นเดียวกับ แรงดันช่วงที่ 1 (52 kV$\leq U_m \leq$245 kV)

U_{cw} สำหรับฉนวนภายนอก พิจารณาดังนี้



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของฉนวนภายนอกสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า(R) เทียบกับตัวแปรในการประสานสัมพันธ์ฉนวนทางสถิติ (K_{cs})

จากรูปที่ 3.4 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของตัวแปรในการประสานฉนวนทางสถิติ (K_{cs}) และความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของฉนวน (R) โดยค่าที่ยอมรับได้โดยทั่วไปของ R มาตรฐานแนะนำให้ใช้ค่า 0.0001 แต่ผู้ศึกษาสามารถเลือกค่า R ค่าอื่นๆ ได้ เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น พิจารณาความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับดินจากสมการ

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

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

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

3.2.2.3.2 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

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

$$U_{p-cw} = K_{cs}U_{p2-re} \tag{3.29}$$

3.2.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

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

ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ คือ

L_a คือ ผลลัพธ์ของสายเหนือศีรษะต่ออัตราการขัดข้องที่ยอมรับได้ (m)

R_a คือ อัตราการล้มเหลวที่ยอมรับได้ของอุปกรณ์ เมื่อพิจารณาสำหรับสายส่ง ตัวแปรเขียนในรูป (1/years)

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

L คือ ระยะห่างระหว่างกับดักเสิร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน(m)

n คือ จำนวนของสายส่งเหนือศีรษะต่อไปยังสถานีไฟฟ้า ในการหาค่าขนาดเสิร์จที่มาปะทะ

L_{sp} คือ ความยาวช่วง (m)

การคำนวณความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วพิจารณาจากสมการ

$$L_a = \frac{R_a}{R_{km}} \tag{3.30}$$

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

ระยะห่างระหว่างกับดักเสิร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน (L) พิจารณาแยกกันระหว่างฉนวนภายใน และฉนวนภายนอก

ตัวแปร A ขึ้นกับคุณลักษณะของสายส่ง พิจารณาตามตารางที่ 3.5 เช่น สายในระบบจำหน่าย หรือสายในระบบส่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 ตัวแปร A เปลี่ยนแปลงตามชนิดของสายส่ง [1]

ชนิดของสายส่ง	A (kV)
สายในระบบจำหน่าย (การวาบไฟตามผิวระหว่างเฟสกับเฟส):	
- คอนสายระหว่างเฟสกับดิน (การวาบไฟตามผิวไปยังดินที่ด้านแรงดันต่ำ)	900
- สายที่มีขั้วต่อเป็นไม้ (การวาบไฟตามผิวไปยังดินที่ด้านแรงดันสูง)	2700
สายส่ง (การวาบไฟตามผิวระห่างเฟสกับดินดิน)	
- ตัวนำเส้นเดียว	4500
- ตัวนำสองเส้นตีเกลียว	7000
- ตัวนำสี่เส้นตีเกลียว	11000
- ตัวนำสี่เส้น และหกเส้น ตีเกลียว	17000

3.2.3.2 **การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่** 2 (300 kV$\leq U_m \leq$800 kV)

การพิจารณา U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วพิจารณาเฉพาะการประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดิน โดยพิจารณาดังนี้

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

U_{cw} สำหรับฉนวนภายนอก มาตรฐานแนะนำว่า การหาค่าความคงทนแรงดันในการประสานฉนวน สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว นั้นไม่จำเป็น

3.3 ความคงทนแรงดันเกินที่ต้องการ (U_{rw})

3.3.1 การคำนวณสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (1 kV$\leq U_m \leq$245 kV)

ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ คือ

K_s คือ ตัวแปรความปลอดภัย

K_a คือ ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ

m คือ ตัวแปรยกกำลังใช้เพื่อคำนวณ K_a สำหรับฉนวนภายนอก

H คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล

3.3.1.1 ตัวแปรความปลอดภัย (K_s)

สำหรับฉนวนภายในมีค่าคงที่ คือ $K_s = 1.15$

สำหรับฉนวนภายนอกมีค่าคงที่ คือ $K_s = 1.05$

3.3.3.2 **ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ(K_a)**

ตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศ (K_a) ใช้งานสำหรับฉนวนภายนอกเท่านั้นโดยพิจารณาจากสมการ

$$K_a = e^{m\frac{H}{8150}} \tag{3.32}$$

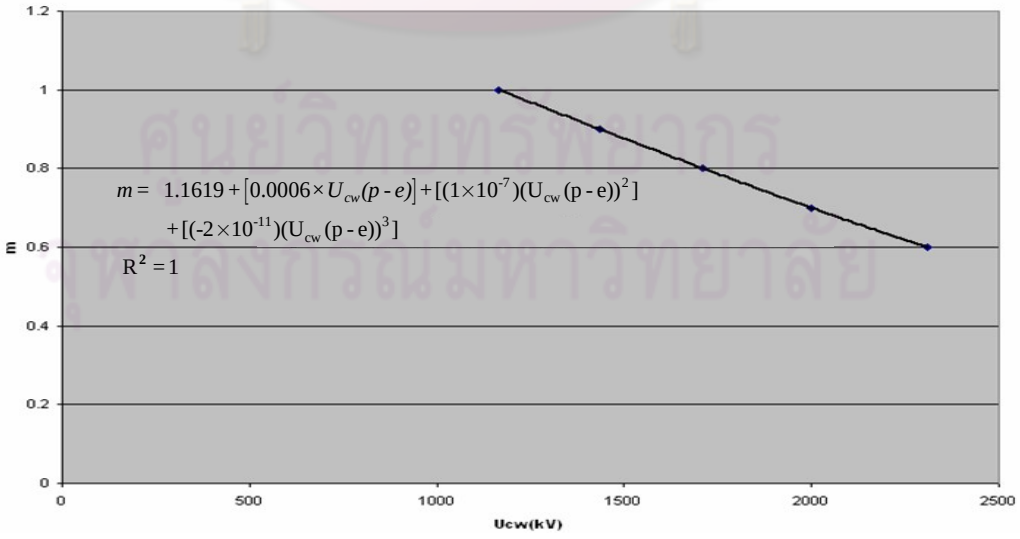
สำหรับแรงดันเกินชั่วคราว m พิจารณาจากระดับมลภาวะของฉนวน ถ้าฉนวนมีสภาพสะอาด ใช้ค่า m = 1 ถ้าฉนวนมีสภาพสกปรก ใช้ค่า m = 0.5

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

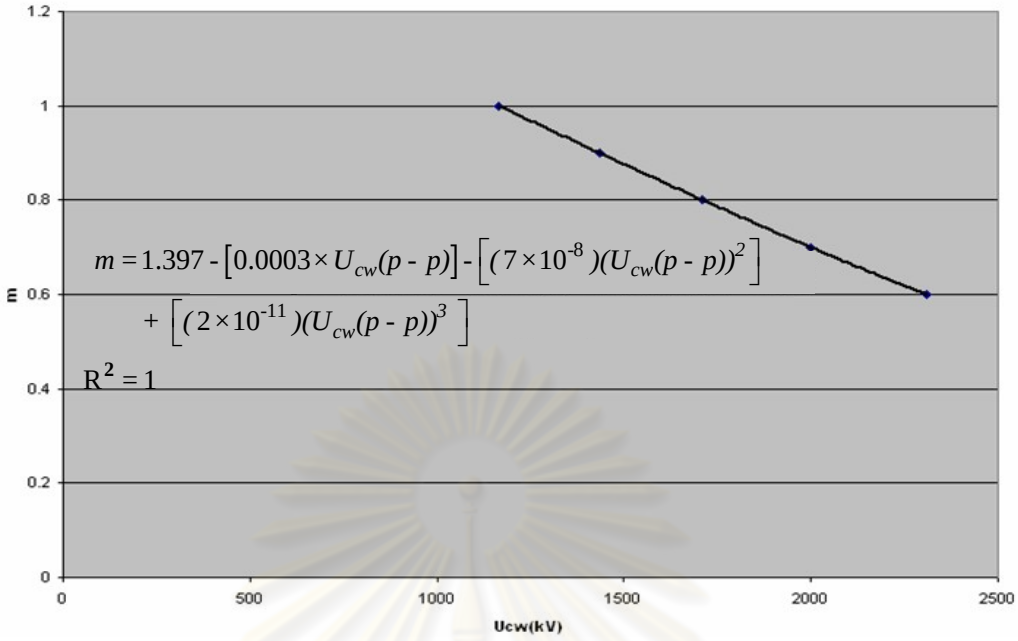
$$\begin{aligned} m &= 1 && when\ U_{cw}(p-e) \geq 309.091kV \\ &= 1.1619 + \left[0.0006 \times U_{cw}(p-e)\right] + \left[(1\times10^{-7})(U_{cw}(p-e))^2\right] \\ &\quad + \left[(-2\times10^{-11})(U_{cw}(p-e))^3\right] && when\ U_{cw}(p-e) \geq 309.091kV \end{aligned} \tag{3.33}$$

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

$$\begin{aligned} m &= 1 && when\ U_{cw}(p-p) < 1163.636kV \\ &= 1.397 - \left[0.0003 \times U_{cw}(p-p)\right] - \left[(7\times10^{-8})(U_{cw}(p-p))^2\right] \\ &\quad + \left[(2\times10^{-11})(U_{cw}(p-p))^3\right] && when\ U_{cw}(p-e) \geq 1163.636kV \end{aligned} \tag{3.34}$$



รูปที่ 3.5 เลขยกกำลังของตัวแปรชดเชยสภาพบรรยากาศสำหรับฉนวนภายนอก m ขึ้นกับค่า $U_{cw}(p-e)$



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

3.3.3.3 ความคงทนแรงดันเกินที่ต้องการ (U_{rw}) สำหรับฉนวนภายใน

พิจารณาจากสมการ

$$U_{rw} = K_s \times U_{cw} = 1.15 \times U_{cw} \tag{3.35}$$

3.3.3.4 ความคงทนแรงดันเกินที่ต้องการ (U_{rw}) สำหรับฉนวนภายนอก

พิจารณาจากสมการ

$$U_{rw} = K_s \times K_a \times U_{cw} = 1.05 \times K_a \times U_{cw} \tag{3.36}$$

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

3.3.2.1 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับดิน

พิจารณาเช่นเดียวกับการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV $\leq U_m \leq$ 245 kV)

3.3.2.1 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

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

$$U_{p\text{-}rw} = K_a K_s U_{p2\text{-}cw} \tag{3.37}$$

พิจารณาแรงดันที่ใช้ในการทดสอบจากสมการ

$$Test\ Value = \pm \frac{U_{p\text{-}rw}}{2} \tag{3.38}$$

3.4 การเปลี่ยนรูปของ U_{rw}

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

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

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

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

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

3.5 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w)

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

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

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

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

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

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Standard lightning impulse withstand voltage (kV)	Minimum clearance (mm)	
	Rod-structure	Conductor-structure
1550	3.10	2.9
1675	3.35	3.1
1800	3.60	3.3
1950	3.90	3.6
2100	4.20	3.9
NOTE – The standard lightning impulse is applicable phase-to-phase and phase-to-earth. For phase-to-earth, the minimum clearance for conductor-structure and rodstructure is applicable. For phase-to-phase, the minimum clearance for rod-structure is applicable.		

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

พิจารณาเช่นเดียวกับ การประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ตั้งแต่ 3.6 kV ถึง 36 kV แตกต่างกันเฉพาะการพิจารณาระยะห่างสำหรับระหว่างเฟสกับเฟสของฉนวนภายนอก (minimum air clearance) จะพิจารณาแยกระหว่างอุปกรณ์ส่ายส่งทางด้านเข้า (Line Entrance Equipment) และอุปกรณ์อื่นๆ (Other Equipment) โดยความแตกต่างดังกล่าวจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อศึกษาตัวอย่างการคำนวณสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนในภาคผนวก ก

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

การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน พิจารณาเลือกจากความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw}) โดยพิจารณาจากตารางที่ 2.3 โดยเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันมากกว่าหรือเท่ากับความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw}) โดยพิจารณาแยกระหว่างฉนวนภายนอก และฉนวนภายใน

3.5.1.1 ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับดิน (Phase-to-earth clearances)

เมื่อทราบค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงฟ้าผ่า (kV) หลังจากนั้นพิจารณาค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างเฟสกับดิน จากตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างอากาศระหว่างเฟสกับดิน [1]

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

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

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

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

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

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

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

พิจารณา Rod-structure มี K น้อยกว่า 1.15 และมีระยะห่างน้องที่สุด (d) และพิจารณาค่า K_{ff}^{+} จากสมการที่ 3.39

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

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

Conventional deviation มีค่าประมาณ 3% ของ U_{50} สำหรับอิมพัลส์ขั้วบวก นั้นคือ z มีค่า 0.03 เพื่อคำนวณค่าความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของระบบ จากสมการ

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

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

3.5.1.2 **ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเฟสกับเฟส** (Phase-to-phase clearances)

U^+ คือ แรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ขั้วบวกที่ใช้ทดสอบฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

U^- คือ แรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ขั้วลบที่ใช้ทดสอบฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

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

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

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

$$U_0^+ = U^+(1+B) \tag{3.42}$$

คำนวณค่า U_{50} จากสมการ

$$U_{50} = \frac{U_0^+}{0.922} \tag{3.43}$$

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

$$d = \frac{e^{\frac{U_{50}}{K\times 1080}} - 1}{0.46} \tag{3.44}$$

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

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

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

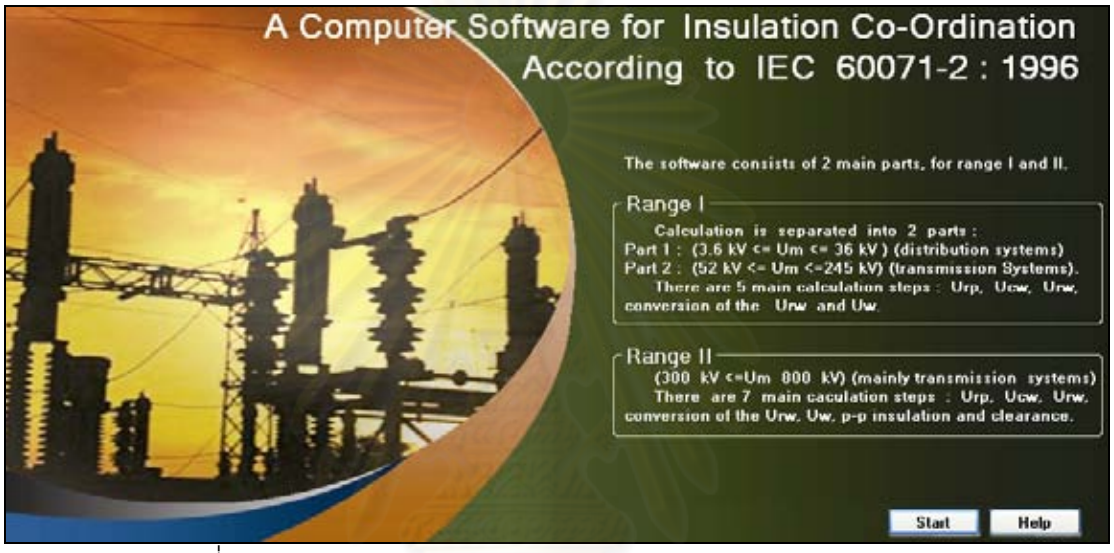
ตารางที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง และค่าน้อยที่สุดของระยะห่างระหว่างอากาศระหว่างเฟสกับเฟส [1]

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

บทที่ 4

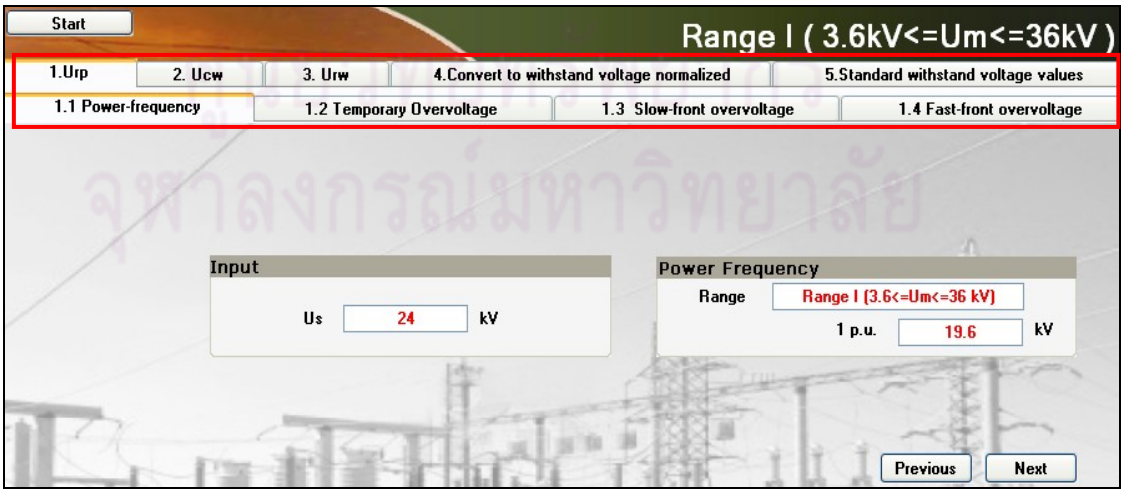
การออกแบบ และการใช้งานโปรแกรมการสำหรับประสานสัมพันธ์ฉนวน

การออกแบบโปรแกรมสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ตามระดับแรงดัน พิจารณาจากรูปที่ 4.1 หน้าแรกของโปรแกรม อธิบายถึงขอบเขตในการการประสานสัมพันธ์ฉนวน ดังนี้



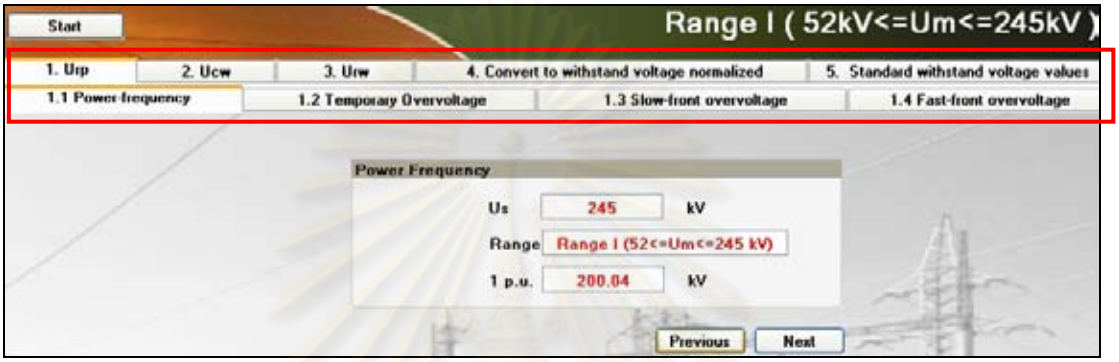
รูปที่ 4.1 หน้าแรกของตัวโปรแกรมสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวน

1. สำหรับระดับแรงดันในช่วงที่ 1 แบ่งออกเป็นสองส่วนย่อย คือ



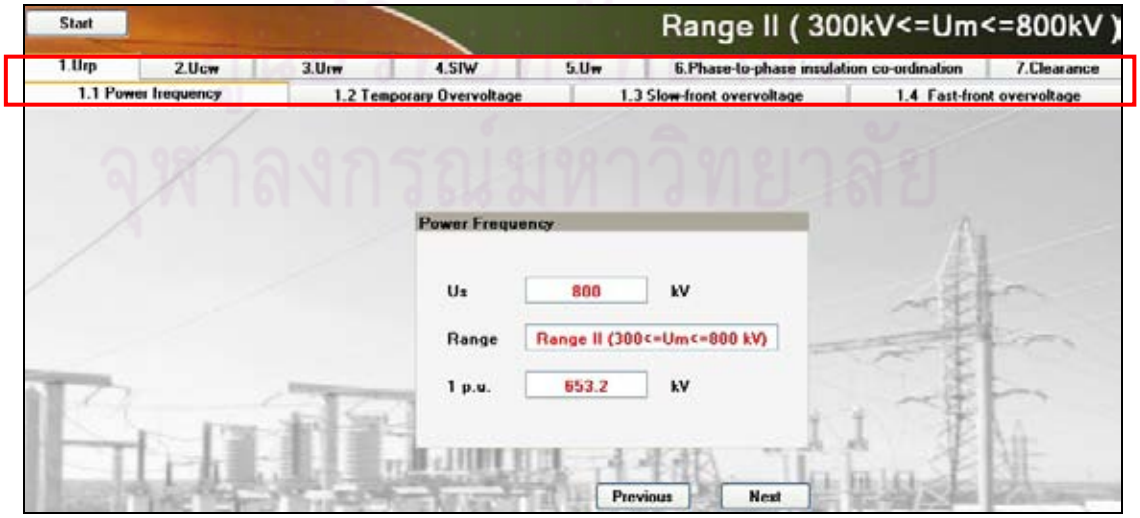
รูปที่ 4.2 การประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับระดับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV $\leq U_m \leq$ 36 kV)

ส่วนที่ 1 จากรูปที่ 4.2 แสดงถึงหน้าโปรแกรมหลักของการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับระดับแรงดัน 3.6 kV $\leq U_m \leq$ 36 kV ซึ่งใช้งานสำหรับระบบจำหน่าย โดยขั้นตอนในการประสานสัมพันธ์ฉนวน พิจารณาจากกรอบสีแดง ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ ตัวแทนแรงดันเกิน(U_{rp}), ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw}), ความคงทนแรงดันที่ต้องการ(U_{rw}), การเปลี่ยนรูปของ U_{rw} (conversion of the U_{rw}) และมาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w)



รูปที่ 4.3 การประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับระดับแรงดันช่วงที่ 1 (52 kV $\leq U_m \leq$ 245 kV)

ส่วนที่ 2 จากรูปที่ 4.3 แสดงถึงหน้าโปรแกรมหลักของการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับระดับแรงดัน 52 kV $\leq U_m \leq$ 245 kV ซึ่งใช้งานสำหรับระบบส่ง โดยขั้นตอนในการประสานสัมพันธ์ฉนวน พิจารณาจากกรอบสีแดง ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ ตัวแทนแรงดันเกิน(U_{rp}), ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw}), ความคงทนแรงดันที่ต้องการ(U_{rw}), การเปลี่ยนรูปของ U_{rw} (conversion of the U_{rw}) และมาตรฐานความคงทนแรงดัน (U_w)



รูปที่ 4.4 การประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับระดับแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV $\leq U_m \leq$ 800 kV)

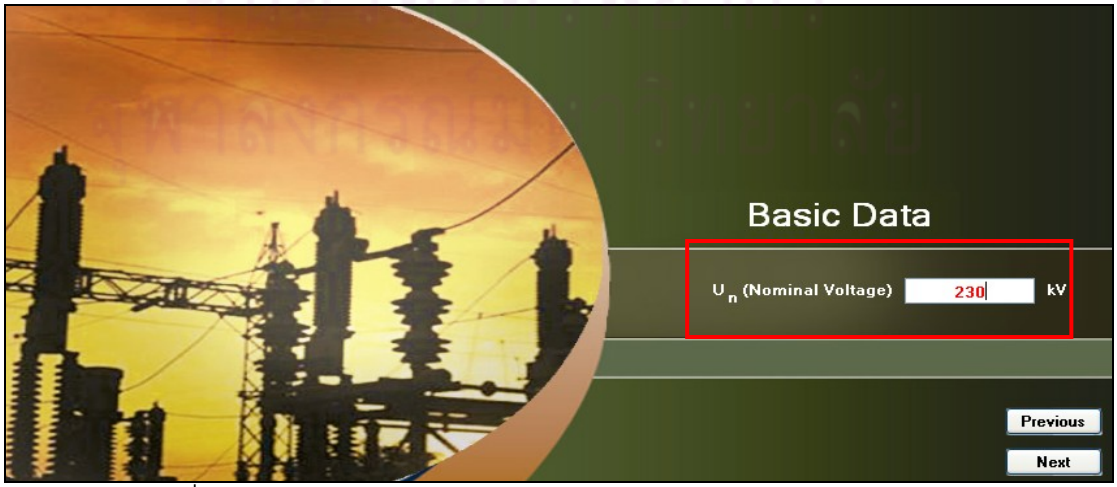
2. ระดับแรงดันในช่วงที่ 2 จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงหน้าหลักของโปรแกรมการประสานสัมพันธ์ฉนวนที่ระดับแรงดัน 300 kV $\leq U_m \leq$ 800 kV ซึ่งใช้งานสำหรับระบบส่ง โดยขั้นตอนในการประสานสัมพันธ์ฉนวน พิจารณาจากกรอบสีแดง ประกอบด้วย 7 ขั้นตอน คือ ตัวแทนแรงดันเกิน(U_{rp}), ความคงทนแรงดันในการประสานสัมพันธ์ฉนวน (U_{cw}), ความคงทนแรงดันที่ต้องการ (U_{rw}), การเปลี่ยนรูปของ U_{rw} (conversion of the U_{rw}), การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส และ ระยะห่างน้อยที่สุด (clearance)

การใช้งานโปรแกรมสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวน เริ่มต้นจากการติดตั้งโปรแกรม พิจารณาจากภาคผนวก ข โดยในบทนี้จะนำเสนอตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนที่ระดับแรงดันในช่วงที่ 1 ส่วนที่ 2 ระดับแรงดันสูงสุดของอุปกรณ์ 52 kV $\leq U_m \leq$ 245 kV เพื่อให้เห็นถึงภาพรวมการใช้งานโปรแกรมแต่ละขั้นตอนอย่างละเอียด นอกจากนี้กรณีตัวอย่างการใช้งานโปรแกรมสำหรับประสานสัมพันธ์ฉนวน ที่ระดับแรงดันในช่วงที่ 1 ส่วนที่ 1 ระดับแรงดันสูงสุดของอุปกรณ์ 3.6 kV $\leq U_m \leq$ 36 kV และ แรงดันในช่วงที่ 2 ระดับแรงดันสูงสุดของอุปกรณ์ 300 kV $\leq U_m \leq$ 800 kV พิจารณาจากภาคผนวก ค

4.1 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม ประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าในระบบ 230 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1 (52 kV$\leq \boldsymbol{U_m} \leq$245 kV)

จากรูปที่ 4.1 หน้าแรกของโปรแกรม แสดงถึงขอบเขตการประสานสัมพันธ์ฉนวน จากนั้นผู้ใช้งานกดปุ่ม Next เพื่อสู่ขั้นตอนถัดไป

4.1.1 ข้อมูลเบื้องต้น



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันระบบ 230 kV

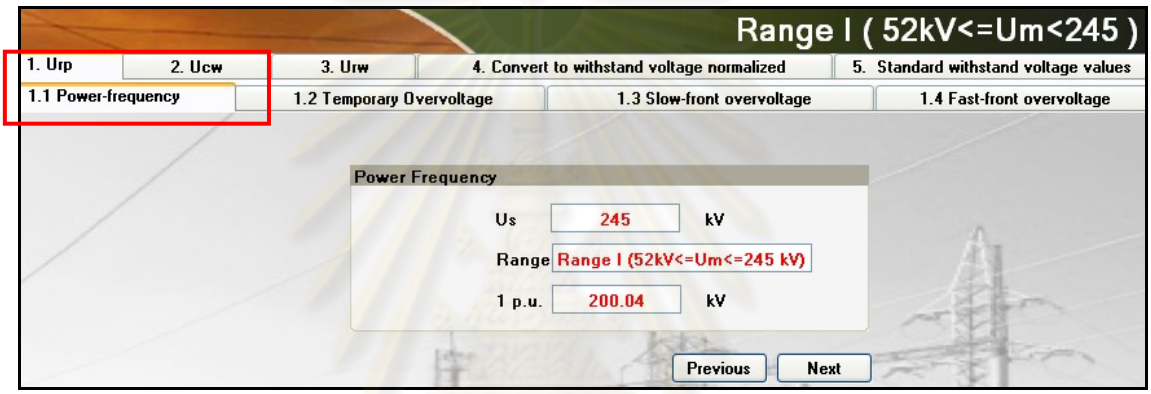
ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

U_n คือ แรงดันระบุของระบบ

จากรูปที่ 4.5 ในส่วนกรอบสีแดง ผู้ใช้งานป้อนค่าแรงดันของระบบที่พิจารณา (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 230 kV จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

4.1.2 ตัวแทนแรงดันเกิน (U_{rp})

4.1.2.1 แรงดันเกินความถี่กำลัง



รูปที่ 4.6 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.1 Power-frequency

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

U_s คือ แรงดันสูงสุดของระบบ

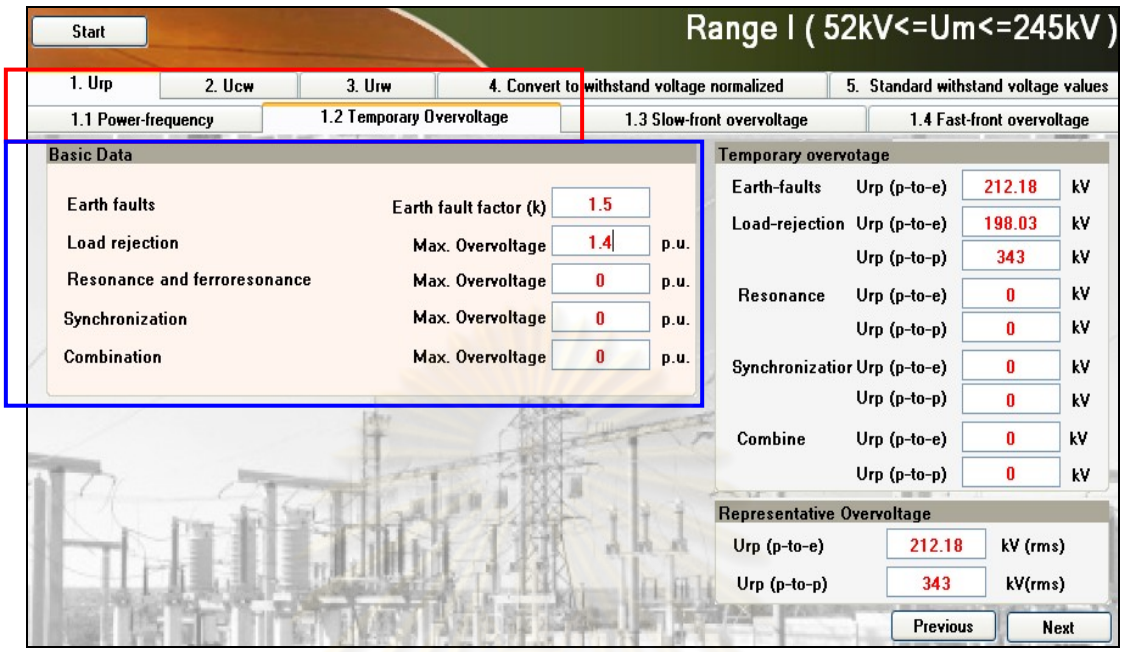
Range คือ ช่วงของแรงดันที่พิจารณา ซึ่งจะขึ้นกับ U_n ที่ผู้ใช้งานป้อน ซึ่งประกอบด้วย แรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$36 kV), แรงดันช่วงที่ 1 (52 kV$\leq U_m \leq$245 kV) และแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV$\leq U_m \leq$800 kV)

1 pu คือ ค่าต่อหน่วย

จากรูปที่ 4.6 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 หัวข้อย่อย 1.1 Power Frequency เมื่อทราบค่า U_n จากหัวข้อ 4.1.1 โปรแกรมแสดงผล ดังนี้

- U_s คือ 245 kV พิจารณาจากตารางที่ 2.2
- แสดงว่าเป็นการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับส่วนที่ 1(52 kV$\leq U_m \leq$245 kV)
- ผลการคำนวณ 1 pu มีค่า 200.04 kV พิจารณาจากสมการที่ 3.2

4.1.2.2 แรงดันเกินชั่วคราว



รูปที่ 4.7 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 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 4.7 ในกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1U_{rp} หัวข้อย่อย 1.2 Temporary Overvoltage โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. ผู้ใช้ป้อนข้อมูล :

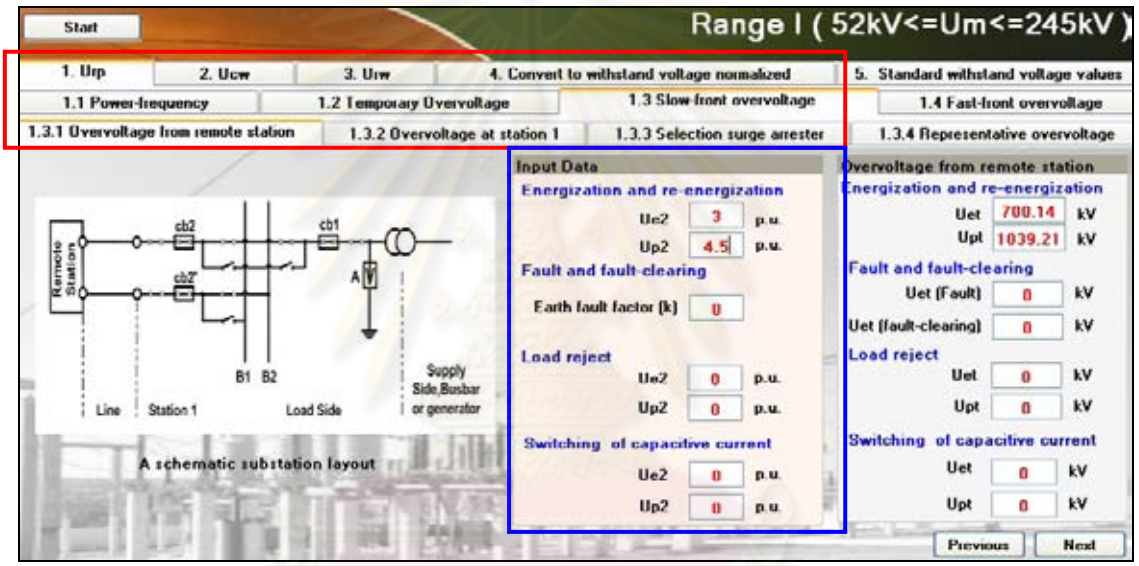
ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน พื้นที่สีชมพู คือ แหล่งกำเนิดแรงดันเกินที่เป็นไปได้ (U_{e2}) เช่น ความผิดพร่องลงดิน การปลดโหลด แรโซแนน หรือ ผลรวมจากการเกิดหลายแหล่งกำเนิด ในตัวอย่างนี้เกิดความผิดพร่องลงดิน มีค่า k (ตัวแปรความผิดพร่องลงดิน) ค่า1.5 และ เกิดการปลดโหลดเกิดแรงดันเกิน U_{e2} ขนาด 1.4 pu

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 212.18 kV และ $U_{rp}(p-p)$ มีค่า 343 kV จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

4.1.2.3 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า



รูปที่ 4.8 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.3.1 Overvoltage from remote station

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

U_{e2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับดินซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 %

U_{p2} คือ ค่าของแรงดันเกินระหว่างเฟสกับเฟสซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันเกินค่านี้ 2 %

k คือ ตัวแปรความผิดพร่องลงดิน

U_{et} คือ ค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับดิน

U_{pt} คือ ค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับเฟส

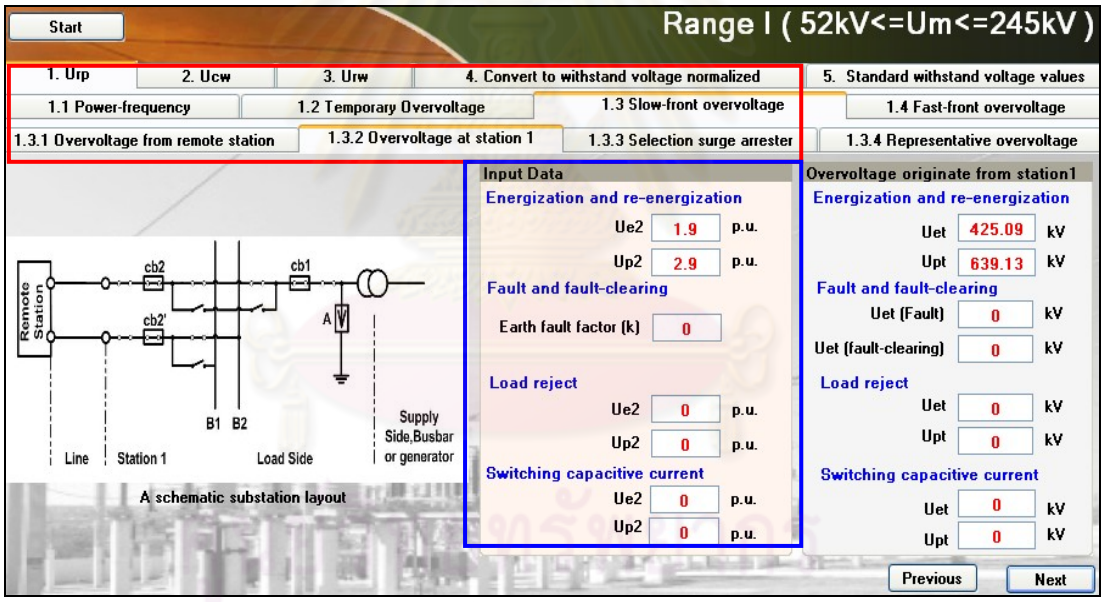
จากรูปที่ 4.8 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.1 Overvoltage originate from remote station โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

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 3 pu และ U_{p2} มีค่า 3.86 pu

2. ผลการคำนวณจากโปรแกรม :

โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณค่า U_{et} และU_{pt} จากผลของ Energization and Re-Energization คือ U_{et} มีค่า 700.14 kV และค่า U_{pt} มีค่า 1039.21 kV จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.9 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.3.2 Overvoltage at station 1

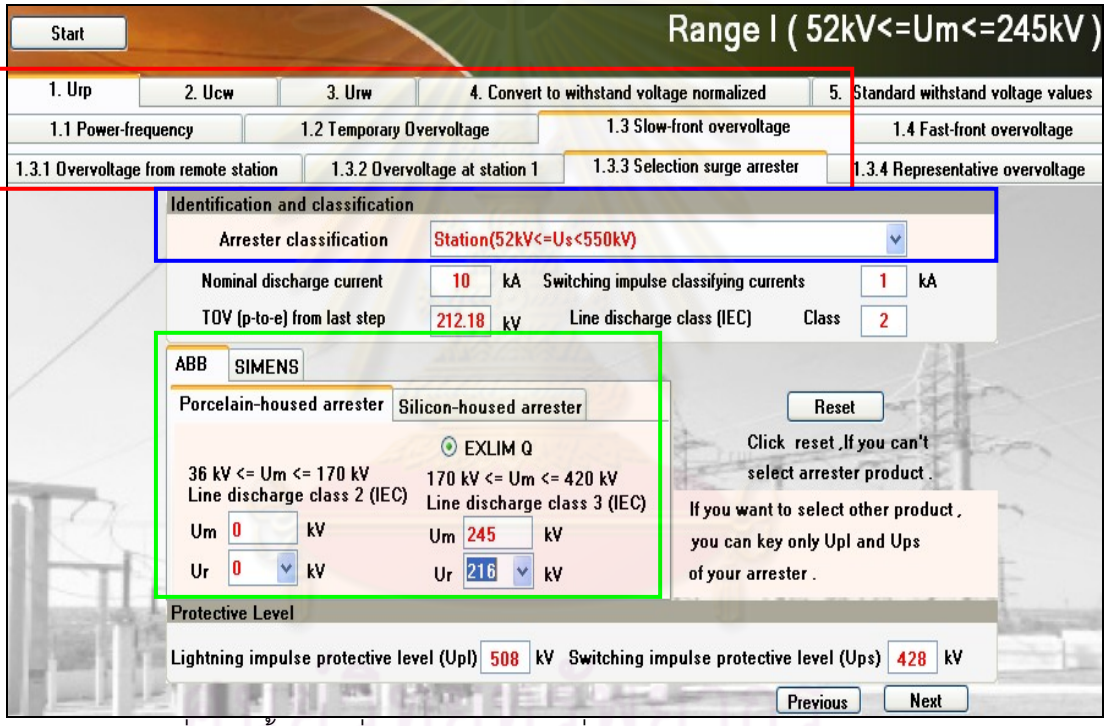
จากรูปที่ 4.9 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.2 Overvoltage at station 1 โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. ผู้ใช้ป้อนข้อมูล :

ในส่วนกรอบสีน้ำเงินพื้นสีชมพู ผู้ใช้งานป้อนค่าแหล่งกำเนิดแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าที่เป็นไปได้ คือ Energization and Re-Energization, Load Reject, Fault and Fault Clearing และ Switching Capacitive Current ตัวอย่างนี้สมมุติเกิด Energization and Re-Energization คือ U_{e2} มีค่า 1.9 pu และ U_{p2} มีค่า 2.9 pu

2. ผลการคำนวณจากโปรแกรม :

โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณค่าU_{et} และU_{pt} จากผลของ Energization and Re-Energization คือ U_{et} มีค่า 425.09 kV และค่า U_{pt} มีค่า 639.13 kV จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.10 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.3.3 Selection Surge Arrester

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

กระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (nominal discharge current) 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

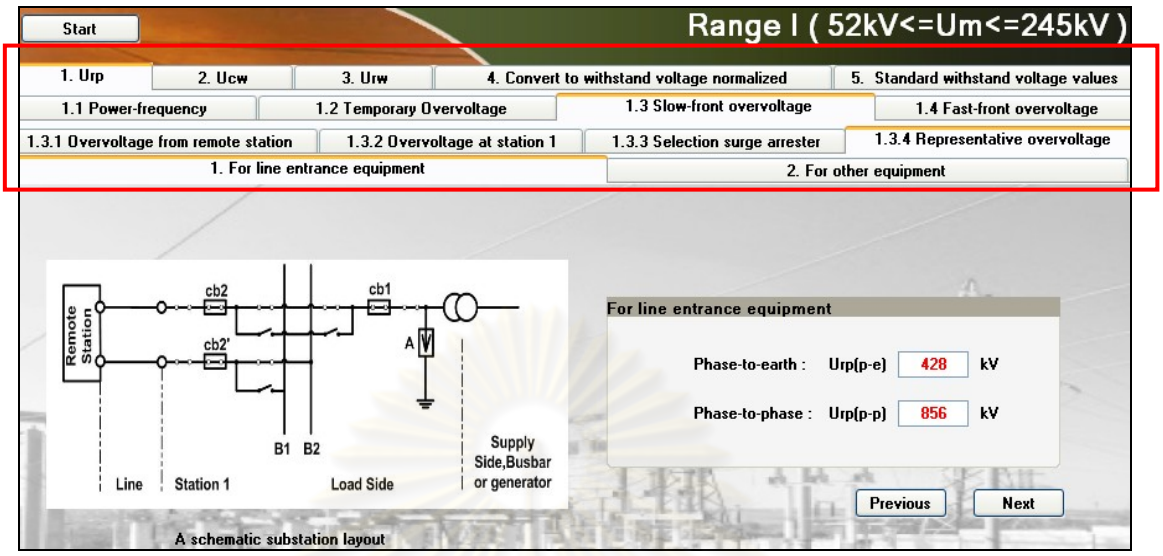
จากรูปที่ 4.10 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.3 Selection surge arrester มีรายละเอียดดังนี้

- ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน พื้นสีชมพู หัวข้อ Identificaiton and Classification เมื่อผู้ใช้งานเลือก Arrester Classification โปรแกรมจะแสดงค่ากระแสถ่ายเทประจุที่ระบุ (nominal discharge current), ระดับกระแสสวิตชิงอิมพัลส์ (switching impulse classifying current), ระดับการถ่ายเทประจุในสาย(line discharge class) และแสดงค่าแรงดันเกินชั่วคราวระหว่างเฟสกับดินจากขั้นตอนที่ 1.2 (หัวข้อ 4.1.2.2)

- ตัวอย่างนี้ได้ทำการเลือก Arrester Classification คือ Station ($52\text{kV} \leq U_s \leq 550\text{kV}$) โปรแกรมจะทำการเลือกค่า Nominal discharge current มีค่า 10 kA, Switching Impulse Classify Current มีค่า 1 kA, line discharge class 2 และ $TOV(p-e)$ มีค่า 212.18 kV ซึ่งเป็นค่าแรงดันกันชั่วคราวระหว่างเฟสกับดินจากขั้นตอนที่ 1.2 (หัวข้อ 4.1.2.2)

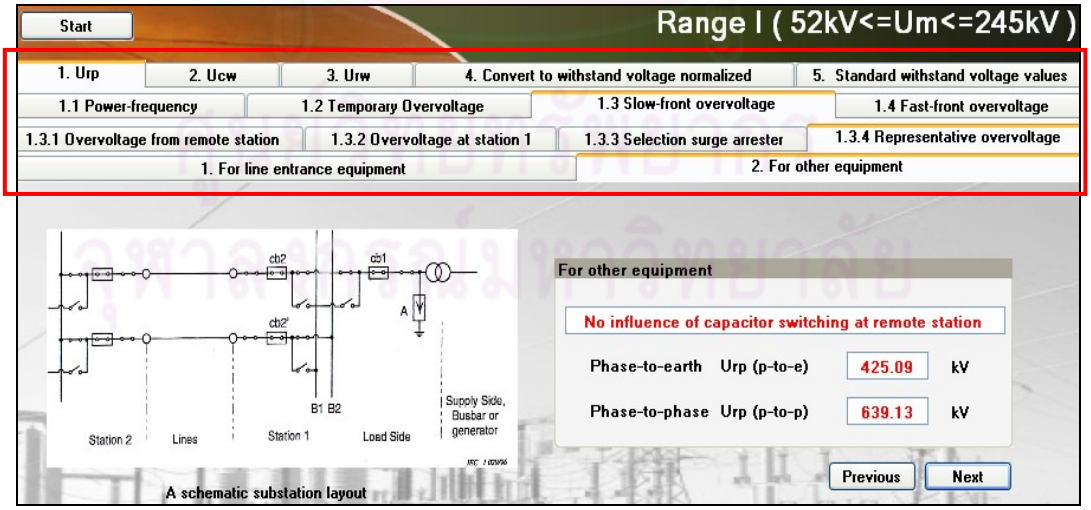
- ในส่วนกรอบสีเขียว พื้นสีชมพู หัวข้อการเลือกใช้งานผลิตภัณฑ์กับดักเสิร์จในโปรแกรมนี้ผู้ใช้งานสามารถเลือกบริษัท ABB หรือ SIMENS ซึ่งทั้งสองบริษัทจะครอบคลุมการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 จากนั้นผู้ใช้งานสามารถเลือกชนิดของกับดักเสิร์จได้ว่าเป็นชนิด Porcelain-Housing Arrester หรือ Silicon-Housing Arrester เมื่อผู้ใช้งานเลือกรุ่นของกับดักเสิร์จ โปรแกรมจะทำการเลือก U_m ของกับดักเสิร์จที่สามารถใช้งานได้ หลังจากนั้นโปรแกรมจะแสดงค่า U_r ที่สามารถเลือกใช้งานได้ ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันเกินชั่วคราวระหว่างเฟสกับดิน โดยผู้ใช้งานจะต้องทำการเลือกค่า U_r ซึ่งมีหลายค่าให้เลือกขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน จากนั้นโปรแกรมจะแสดงผลการเลือกค่าU_{pl} และU_{ps} ในหัวข้อ Protective Level

- ตัวอย่างนี้เลือกกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ ABB ชนิด Porcelain-Housing Arrester รุ่น EXLIM-Q โปรแกรมจะแสดงผลการเลือกค่า U_m ของกับดักเสิร์จ มีค่า 245 kV ตัวอย่างนี้เลือก U_r ค่า 216 kV โปรแกรมจะแสดงผลค่า U_{pl} มีค่า 508 kV และ U_{ps} มีค่า 428 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 4.11 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.3.4.1 For line entrance equipment

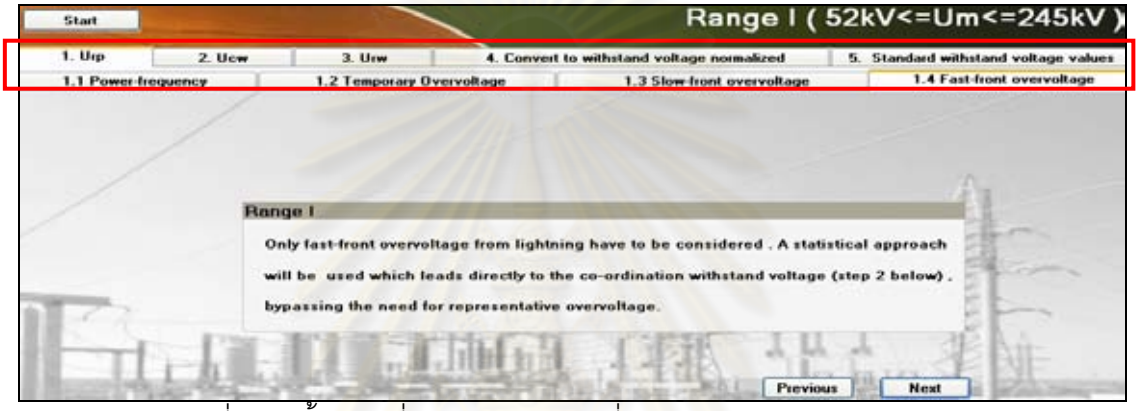
จากรูปที่ 4.11 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.4.1 For line entrance equipment แสดงผลการคำนวณค่า Representative Slow-Front Overvoltage สำหรับ line entrance equipment คือ $U_{rp}(p-e)$ มีค่า 428 kV และ $U_{rp}(p-p)$ มีค่า 856 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 4.12 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.3.4.2 For other equipment

จากรูปที่ 4.12 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.4.2 For line entrance equipment แสดงผลการคำนวณค่า Representative Slow-Front Overvoltage สำหรับ line entrance equipment คือ $U_{rp}(p-e)$ มีค่า 425.09 kV และ $U_{rp}(p-p)$ มีค่า 639.13 kV โดยจะมีข้อความแสดงว่ากรณีนี้คือ No influence of capacitor switching at remote station จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

4.1.2.4 แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็ว

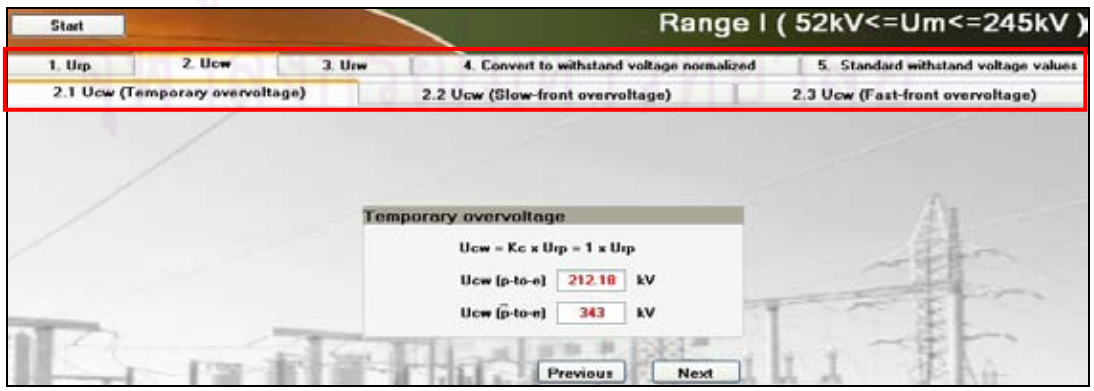


รูปที่ 4.13 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อยที่ 1.4 Fast - front overvoltage

จากรูปที่ 4.13 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.4 Fast-front overvoltage แสดงข้อความอธิบายว่า แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วจะพิจารณาในขั้นตอนที่ 2 U_{cw} ของการประสานสัมพันธ์ฉนวน จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

4.1.3 ความคงทนแรงดันในการประสานฉนวน (U_{cw})

4.1.3.1 แรงดันเกินชั่วคราว



รูปที่ 4.14 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อยที่ 2.1 U_{cw} (Temporary overvoltage)

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

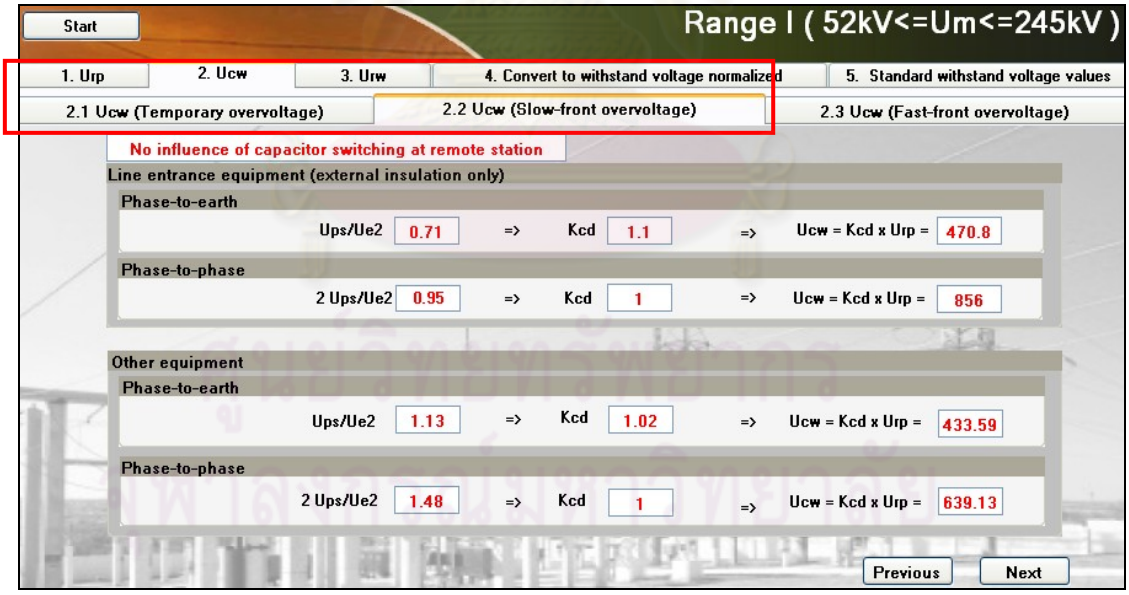
K_c คือ ตัวแปรในการประสานสัมพันธ์ฉนวน

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

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

จากรูปที่ 4.14 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1 U_{cw} (Temporary Overvoltage) โปรแกรมแสดงผลการคำนวณค่า U_{cw} จากสมการที่แสดงเมื่อทราบค่า U_{rp} จากหัวข้อ 4.1.2.2 จากตัวอย่างนี้ $U_{cw}(p-e)$ มีค่า 212.18 kV และ $U_{cw}(p-p)$ มีค่า 343 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

4.1.3.2 แรงดันดันเกินหน้าคลื่นช้า



รูปที่ 4.15 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อยที่ 2.2 U_{cw} (Slow-front overvoltage)

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

K_{cd} คือ Deterministic co-ordination factor

จากรูปที่ 4.15 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2 U_{cw} (Slow-Front Overvoltage) โปรแกรมแสดงผลการคำนวณค่า K_{cd} จากสมการที่แสดง เมื่อทราบค่า U_{ps}, U_{e2} และ U_{p2} จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ และโปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณ U_{cw} จากสมการที่แสดง โดยพิจารณาแยกระหว่าง Line entrance equipment และ Other equipment ดังนี้

Line entrance equipment :

$U_{cw}(p-e)$ = 470.8 kV

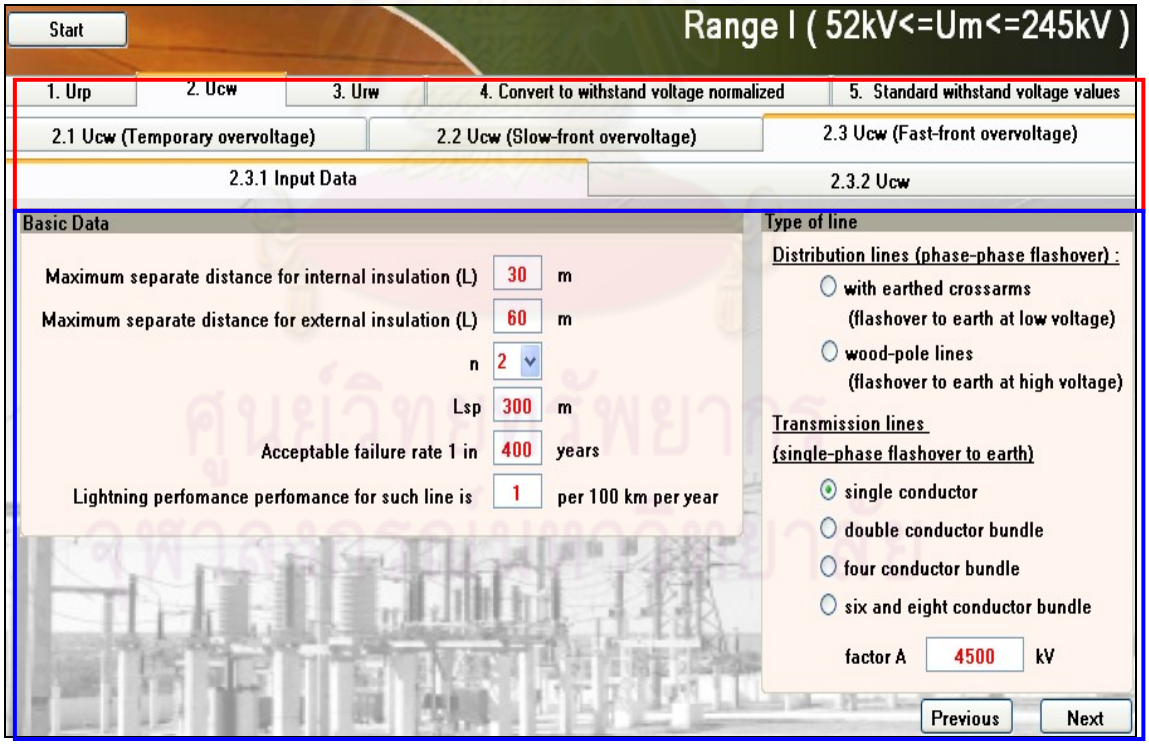
$U_{cw}(p-p)$ = 856 kV

Other equipment :

$U_{cw}(p-e)$ = 433.59 kV

$U_{cw}(p-p)$ = 639.13 kV

4.1.3.3 แรงดันดันเกินหน้าคลื่นเร็ว



รูปที่ 4.16 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อยที่ 2.3.1 ข้อมูลที่ผู้ใช้งานต้องป้อน สำหรับ U_{cw} (Fast-front overvoltage)

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

L คือ ระยะห่างระหว่างกับดักเสิร์จ และอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน สำหรับฉนวนภายใน และฉนวนภายนอก (m)

n คือ จำนวนของสายส่งเหนือศีรษะต่อไปยังสถานีไฟฟ้า ในการหาค่าของขนาดเสิร์จที่มาปะทะ

L_{sp} คือ ความยาวช่วง (m)

R_a คือ อัตราการล้มเหลวที่ยอมรับได้สำหรับอุปกรณ์สำหรับสายส่ง โดยตัวแปรโดยปกติจะเขียนในรูป (1/year)

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

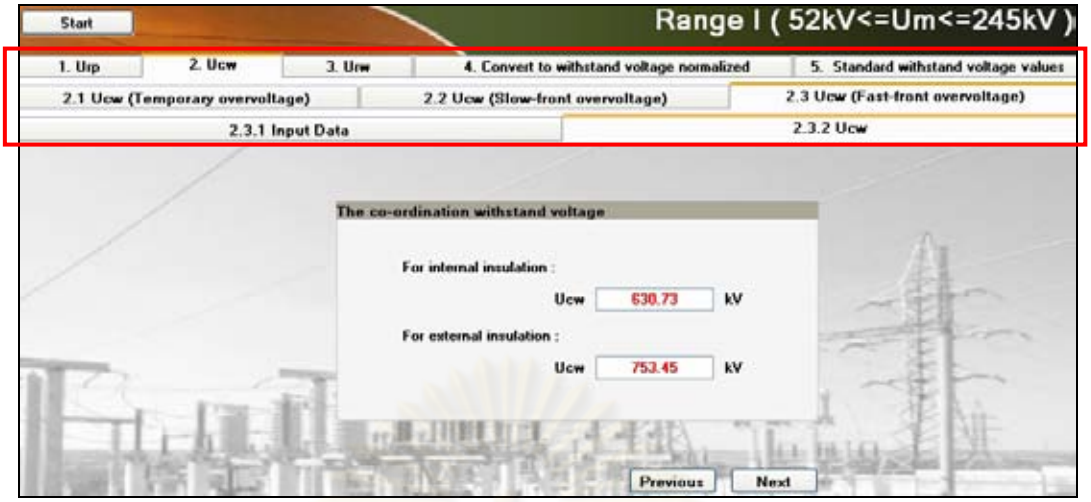
A คือ ตัวแปรแสดงคุณลักษณะของสายส่งพิจารณาตามตารางที่ 3.5

จากรูปที่ 4.16 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.3.1 ผู้ใช้งานป้อนข้อมูล สำหรับ คำนวณค่าU_{cw} (Fast-Front Overvoltage) พิจารณาในส่วนกรอบสีน้ำเงิน ตัวอย่างนี้สมมุติ

- L สำหรับฉนวนภายใน มีค่า 30 m
- L สำหรับฉนวนภายนอก มีค่า 60 m
- n มีค่า 2
- L_{sp} มีค่า 300m
- R_a มีค่า 1 in 400 year
- R_{km} มีค่า 1 per 100 km. year
- เลือกชนิดของสายส่งจากตารางที่ 3.5 ตัวอย่างนี้สมมุติเลือก Single conductor

ตัวแปร A มีค่า 4500

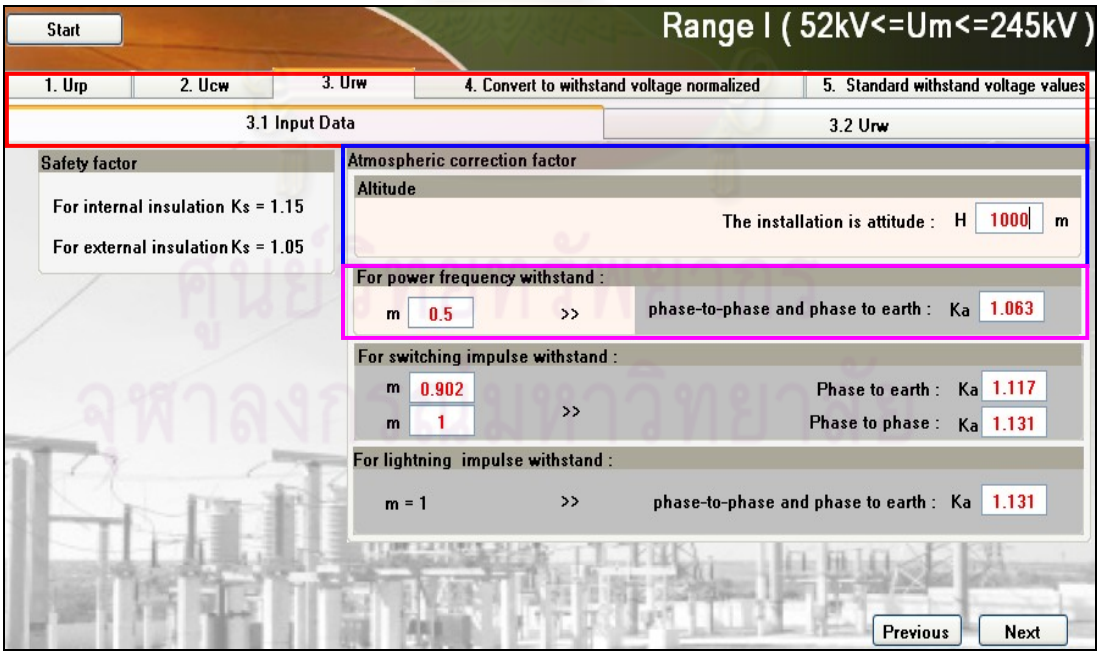
เมื่อผู้ใช้ป้อนข้อมูลอินพุตเสร็จสิ้น กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.17 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อยที่ 2.3.2 ผลการคำนวณ U_{cw} (Fast-front overvoltage)

จากรูปที่ 4.17 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อยที่ 2.3.2 ผลการคำนวณ U_{cw}(Fast-front overvoltage) แสดงค่า U_{cw} สำหรับฉนวนภายใน คือ 630.73 kV และ ค่า U_{cw} สำหรับฉนวนภายนอก คือ 753.45 kV

4.1.4 ความคงทนที่ต้องการ (U_{rw})



รูปที่ 4.18 ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อยที่ 3.1 ข้อมูล Input สำหรับคำนวณ U_{rw}

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

H คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล

m คือ เลขยกกำลังของตัวแปรชดเชยระดับความสูงสำหรับฉนวนภายนอก

K_a คือ ตัวแปรชดเชยระดับความสูง

K_s คือ ตัวแปรความปลอดภัย

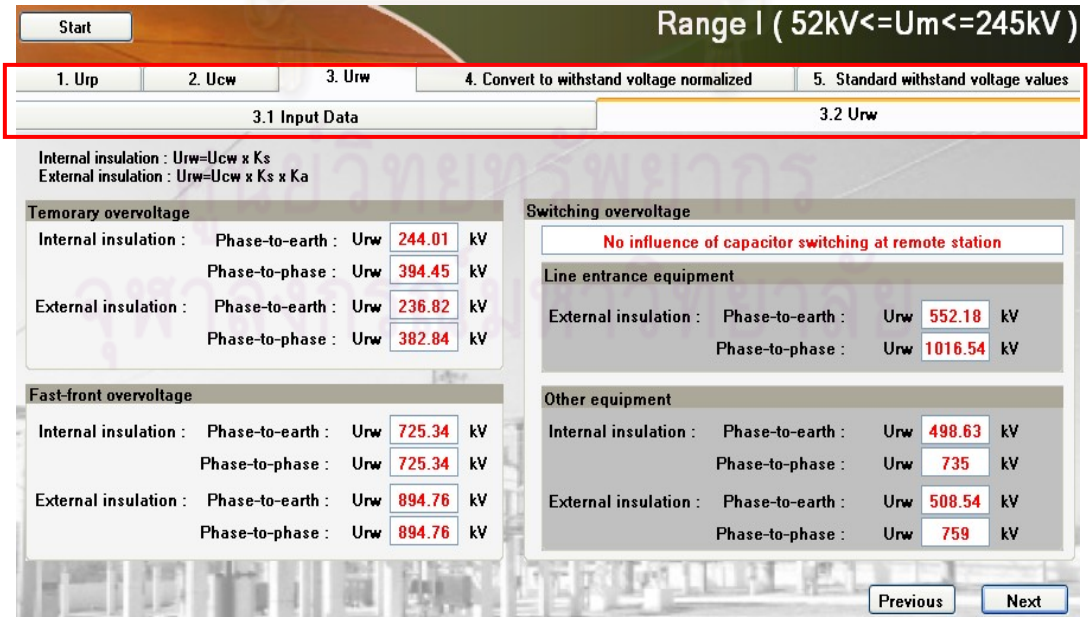
จากรูปที่ 4.18 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.1 ผู้ใช้งานป้อนข้อมูลสำหรับการคำนวณ U_{rw} ตัวอย่างนี้สมมุติ

- ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน พื้นสีชมพู ผู้ใช้งานป้อนค่า H ตัวอย่างนี้สมมุติ H มีค่า 1000 m

- ในส่วนกรอบสีชมพู ผู้ใช้งานต้องป้อนค่า m สำหรับ Power Frequency ซึ่งจะขึ้นกับสภาพมลภาวะของตัวฉนวน ถ้าฉนวนมีสภาพสกปรกค่า m มีค่า 0.5 ถ้าฉนวนมีสภาพสะอาด m มีค่า 1 ตัวอย่างนี้สมมุติ m มีค่า 0.5 พิจารณา m ของ Switching Impulse และ Lightning Impulse เป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ เมื่อทราบค่าตัวแปร m โปรแกรมจะคำนวณค่า K_a

- K_s เป็นค่าคงที่ สำหรับฉนวนภายใน K_s มีค่า 1.15 และสำหรับฉนวนภายนอก K_s มีค่า 1.05

เมื่อผู้ใช้ป้อนข้อมูลอินพุตเสร็จสิ้น กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.19 ขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อยที่ 3.2 ผลการคำนวณคำนวณ U_{rw}

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

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

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

จากรูปที่ 4.19 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 3 U_{rw} หัวข้อย่อย 3.2 โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณค่า U_{rw} จากสมการที่แสดง ดังนี้

Temporary Overvoltage :

-ฉนวนภายใน

$U_{rw}(p-e)$ = 244.01 kV

$U_{rw}(p-p)$ = 394.45 kV

-ฉนวนภายนอก

$U_{rw}(p-e)$ = 236.82 kV

$U_{rw}(p-p)$ = 382.84 kV

Fast-Front Overvoltage :

- ฉนวนภายใน

$U_{rw}(p-e)$ = 725.34 kV

$U_{rw}(p-p)$ = 725.34 kV

- ฉนวนภายนอก

$U_{rw}(p-e)$ = 894.76 kV

$U_{rw}(p-p)$ = 894.76 kV

Swiching Overvoltage :

สำหรับ Line entrance equipment :

- ฉนวนภายนอก

$U_{rw}(p-e)$ = 552.18 kV

$U_{rw}(p-p)$ = 1016.54 kV

สำหรับ Other equipment:

ฉนวนภายใน:

$U_{rw}(p-e)$ = 498.63 kV

$U_{rw}(p-p)$ = 735 kV

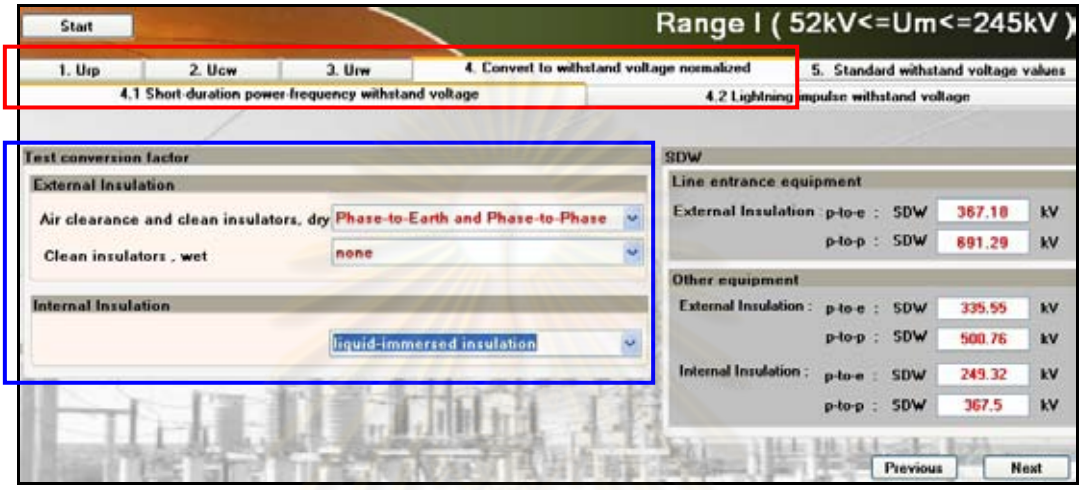
ฉนวนภายนอก:

$U_{rw}(p-e)$ = 508.54 kV

$U_{rw}(p-p)$ = 759 kV

จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

4.1.5 Convert to withstand voltage normalized



รูปที่ 4.20 ขั้นตอนที่ 4 Convert to withstand voltage normalized หัวข้อย่อยที่ 4.1 Short-duration power-frequency withstand voltage

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

SDW คือ มาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น

Test Conversion factor คือ ตัวแปรที่ใช้เปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ สำหรับฉนวนภายนอก และฉนวนภายใน

จากรูปที่ 4.20 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 4 Conversion to withstand voltage normalized หัวข้อย่อย 4.1 *SDW* ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. ผู้ใช้งานป้อนค่า :

- ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน ผู้ใช้งานเลือกค่า 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 Test Conversion Factor สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับระหว่างเฟสกับดิน และระหว่างเฟสกับเฟส คือ Air clearance and clean insulator ,dry และสำหรับฉนวนภายใน สำหรับระหว่างเฟสกับดิน เลือกเป็น Liquid immersed insulation

2. ผลการคำนวณจากโปรแกรม :

เมื่อผู้ใช้งานป้อนข้อมูลข้างต้นแล้วเสร็จ โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณ SDW โดยพิจารณาแยกระหว่าง Line entrance equipment และ Other equipment คือ

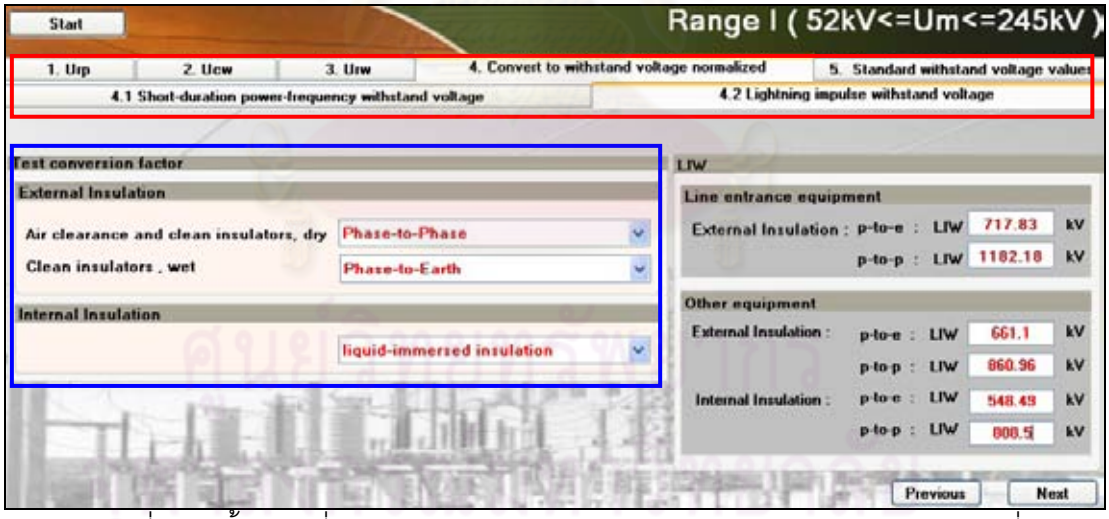
Line entrance equipment

- สำหรับฉนวนภายนอก: $SDW(p-e)$ มีค่า 367.18 kV และ $SDW(p-p)$ มีค่า 691.29 kV

Other equipment

- สำหรับฉนวนภายนอก: $SDW(p-e)$ มีค่า 335.55 และ $SDW(p-p)$ มีค่า 500.76 kV

- สำหรับฉนวนภายใน: $SDW(p-e)$ มีค่า 249.32 kV และ $SDW(p-p)$ มีค่า 367.5 kV



รูปที่ 4.21 ขั้นตอนที่ 4 Convert to withstand voltage normalized หัวข้อย่อยที่ 4.2 Lightning Impulse withstand voltage

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

LIW คือ มาตรฐานพิกัดความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.21 ขั้นตอนที่ 4 Conversion to withstand voltage normalized หัวข้อย่อย 4.2 LIW ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. ผู้ใช้งานป้อนค่า :

- ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน ผู้ใช้ทำการเลือกค่า 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 Test Conversion Factor สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับระหว่างเฟสกับดิน คือ Clean insulator, wet และสำหรับระหว่างเฟสกับเฟส คือ Air clearance and clean insulator ,dry และสำหรับฉนวนภายใน สำหรับระหว่างเฟสกับดิน เลือกเป็น Liquid immersed insulation

2. ผลการคำนวณจากโปรแกรม :

เมื่อผู้ใช้งานป้อนข้อมูลข้างต้นแล้วเสร็จ โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณ LIW โดยพิจารณาแยกระหว่าง Line entrance equipment และ Other equipment คือ

Line entrance equipment

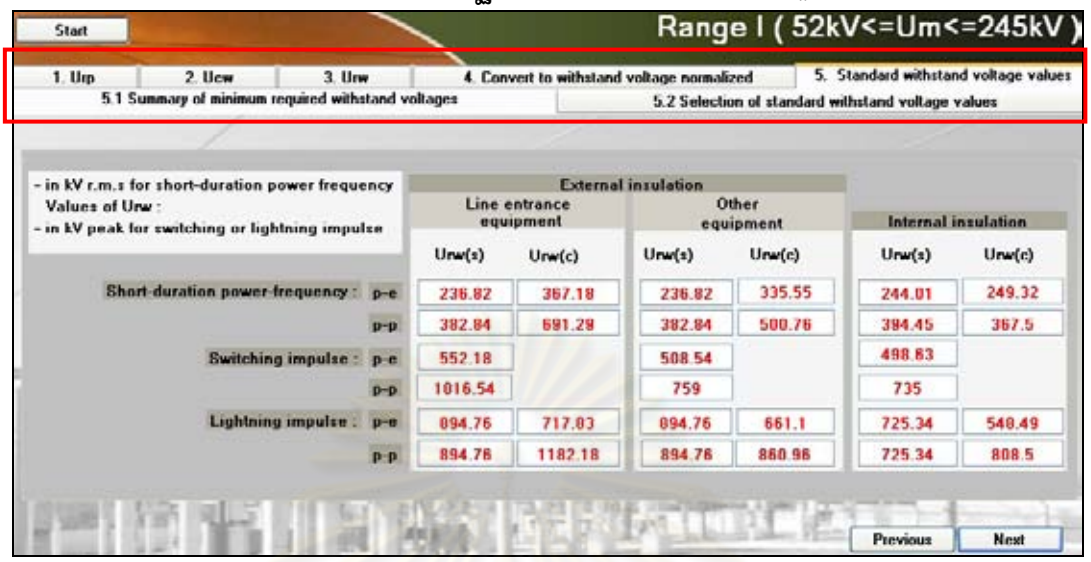
- สำหรับฉนวนภายนอก : $LIW(p-e)$ มีค่า 717.83 kV และ $LIW(p-p)$ มีค่า 1182.18 kV

Other equipment

- สำหรับฉนวนภายนอก : $LIW(p-e)$ มีค่า 661.1 kV และ $LIW(p-p)$ มีค่า 860.96 kV

- สำหรับฉนวนภายใน : $LIW(p-e)$ มีค่า 548.49 kV และ $LIW(p-p)$ มีค่า 808.5 kV

4.1.6 การเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน U_w

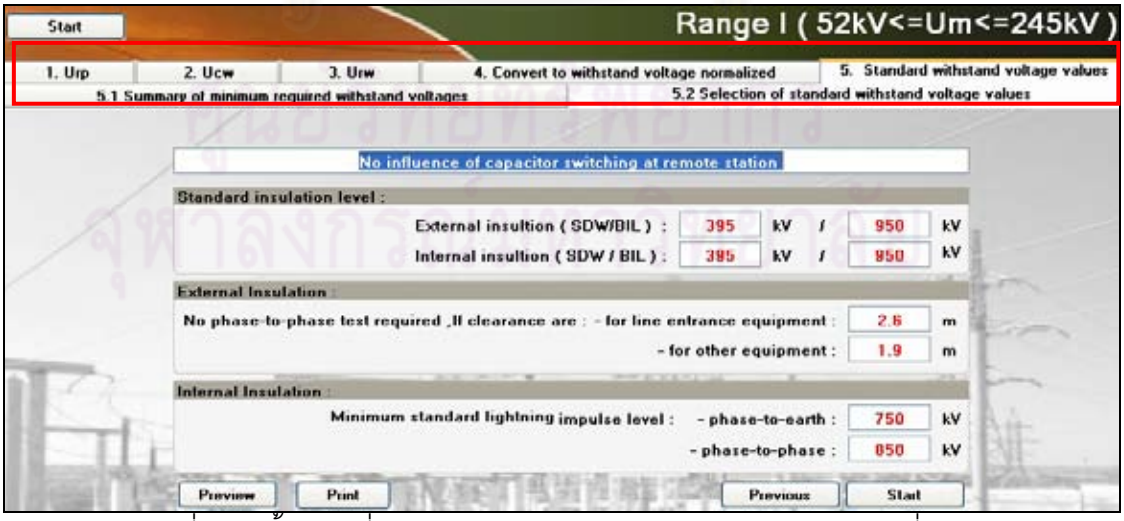


รูปที่ 4.22 ขั้นตอนที่ 5 Standard withstand volatage หัวข้อย่อยที่ 5.1 Summary of minimum required withstand voltage

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

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

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



รูปที่ 4.23 ขั้นตอนที่ 5 Standard withstand volatage หัวข้อย่อยที่ 5.2 Selection of standard withstand voltage values

หลักในการเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดัน สำหรับมาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (SDW) จะพิจารณาเลือกค่า $U_{rw(s)}$ ที่มีค่ามากที่สุดระหว่างเฟสกับเฟส และสำหรับ มาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW) จะพิจารณาเลือกค่า $U_{rw(s)}$ ที่มีค่ามากที่สุด

จากรูปที่ 4.23 หัวข้อ Standard insulation level

สำหรับ External insulation:

จากรูปที่ 4.22 หัวข้อ Short-duration power frequency ระหว่างเฟสกับเฟส โปรแกรมจะทำการเลือกค่า $U_{rw(s)}$ จาก Line entrance equipment หรือ Other equipment โดยพิจารณาเลือกค่าที่มากที่สุด จากตัวอย่างนี้มีค่าเท่ากัน คือ 282.82 kV

จากรูปที่ 4.22 หัวข้อ Lightning Impulse ระหว่างเฟสกับเฟส โปรแกรมจะเลือกค่า $U_{rw(s)}$ ที่มีค่ามากที่สุด โดยพิจารณาจาก Line entrance equipment และ Other equipment จากตัวอย่างนี้มีค่าเท่ากันคือ 894.76 kV

เมื่อนำค่า Short-duration power frequency ซึ่งมี $U_{rw(s)}$ ค่ามากที่สุด คือ 282.82 kV และค่า Lightning Impulse ซึ่งมี $U_{rw(s)}$ ค่ามากที่สุด คือ 894.76 kV มาเปิดตารางที่ 2.2 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ที่แรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) มีค่า 245 kV โดยพิจารณาเลือกค่ามาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (SDW) ค่า 395 kV และมาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW) ค่า 950 kV เนื่องจากเป็นค่าที่ทั้ง Short-duration power frequency และ Lightning Impulse ผ่านเกณฑ์ทั้งคู่ที่ระดับเดียวกัน นั้นคือค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าที่นำมาพิจารณา

สำหรับ Internal Insulation :

จากรูปที่ 4.22 หัวข้อ Short-duration power frequency ระหว่างเฟสกับเฟส มีค่า $U_{rw(s)}$ คือ 394.45 kV

จากรูปที่ 4.22 หัวข้อ Lightning Impulse ระหว่างเฟสกับเฟส พิจารณาค่ามากที่สุด ระหว่าง $U_{rw(s)}$ และ $U_{rw(c)}$ ในที่นี้ค่ามากที่สุด คือ $U_{rw(c)}$ = 808.5 kV

เมื่อนำค่า Short-duration power frequency ซึ่งมีค่า $U_{rw(s)}$ คือ 394.45 kV และค่า Lightning Impulse ซึ่งมี $U_{rw(s)}$ ค่ามากที่สุด คือ 808.5 kV มาเปิดตารางที่ 2.2 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ที่แรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) มีค่า 245 kV โดยพิจารณาเลือก ค่ามาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันความถี่กำลังช่วงเวลาสั้น (SDW) ค่า 395 kV และมาตรฐานพิกัดความคงทนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า(LIW) ค่า 950 kV เนื่องจากเป็นค่าที่ทั้ง Short-duration power frequency และ Lightning Impulse ผ่านเกณฑ์ทั้งคู่ที่ระดับเดียวกัน นั้นคือค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าที่นำมาพิจารณา

จากรูปที่ 4.23 หัวข้อ External Insulation พิจารณาระยะห่างระหว่างเฟสกับเฟส (p-p Clearance) โดยพิจารณาแยกระหว่าง Line entrance equipment และ Other equipment

Line entrance equipment :

จากรูปที่ 4.22 พิจารณา 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 (LIW) 1300 kV จะได้ค่า minimum p-p Clearance ค่า 2.6 m

Other equipment :

จากรูปที่ 4.22 พิจารณา 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) ที่มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW) 950 kV จะได้ค่า minimum p-p Clearance ค่า 1.9 m

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.23 หัวข้อ Internal Insulation พิจารณาเลือกค่า Minimum Standard Lightning Impulse ระหว่างเฟสกับเฟส และระหว่างเฟสกับดิน

ระหว่างเฟสกับดิน :

จากรูปที่ 4.22 พิจารณา Lightning Impulse ระหว่างเฟสกับดิน โดยเลือกค่าที่มากที่สุดระหว่าง $U_{rw(s)}$ และ $U_{rw(c)}$ ในที่นี้ค่ามากที่สุด คือ $U_{rw(c)}$ = 808.5 kV นำค่านี้เปิดตารางที่ 2.2 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับแรงดันช่วงที่ 1 ที่แรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) มีค่า 245 kV โดยเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW) คือ 850 kV

ระหว่างเฟสกับเฟส :

จากรูปที่ 4.22 พิจารณา Lightning Impulse ระหว่างเฟสกับเฟส โดยเลือกค่าที่มากที่สุดระหว่าง $U_{rw(s)}$ และ $U_{rw(c)}$ ในที่นี้ค่ามากที่สุด คือ $U_{rw(s)}$ = 725.34 kV จากนั้นนำค่านี้เปิดตารางที่ 2.2 มาตรฐานระดับการฉนวนสำหรับแรงดัน ช่วงที่ 1 ที่แรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ (U_m) มีค่า 245 kV โดยเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (LIW) คือ 750 kV

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษากระบวนการประสานสัมพันธ์ฉนวนอ้างอิง ตามมาตรฐาน IEC 60071-2 และออกแบบพัฒนาโปรแกรมสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวน เพื่อช่วยให้การประสานสัมพันธ์ฉนวนเป็นไปตามมาตรฐาน และมีความสะดวกรวดเร็วง่ายมากยิ่งขึ้น ตัวโปรแกรมแสดงถึงกระบวนการการประสานสัมพันธ์ฉนวนซึ่งมีจุดมุ่งหมาย คือ การเลือกค่าที่ต่ำที่สุดของความคงทนแรงดันของฉนวนให้เหมาะสมกับเงื่อนไขสมรรถภาพ (Performance Criterion) เมื่อฉนวนรับภาระแรงดันเกินที่ใช้แทนค่า (Representative Overvoltage) ภายใต้สภาวะการทำงานปกติ โดยโปรแกรมที่กล่าวถึงนี้ได้รับการพัฒนาจากภาษา Visual Basic.Net ซึ่งถือเป็นภาษาของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่มีระบบปฏิบัติการบน Windows ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญต่อไปในอนาคต

โปรแกรมสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก สำหรับระดับแรงดันในช่วงที่ 1 และ 2

1. สำหรับระดับแรงดันในช่วงที่ 1 แบ่งออกเป็นสองส่วนย่อย คือ

ส่วนที่ 1 ระดับแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ 3.6 kV $\leq U_m \leq$ 36 kV สำหรับระบบจำหน่าย

ส่วนที่ 2 ระดับแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ 52 kV $\leq U_m \leq$ 245 kV สำหรับระบบส่ง

สาเหตุที่มีการแบ่งเป็นสองส่วนย่อย เนื่องจากแต่ละส่วนย่อยมีความแตกต่างกันในส่วนของรายละเอียดในการประสานสัมพันธ์ฉนวน โดยขั้นตอนในการประสานสัมพันธ์ฉนวนประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ U_{rp}, U_{cw}, U_{rw}, conversion of the U_{rw} and U_w.

2. สำหรับระดับแรงดันในช่วงที่ 2 ระดับแรงดันสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ $U_m \leq$ 800 kV สำหรับระบบส่ง โดยขั้นตอนในการประสานสัมพันธ์ฉนวนประกอบด้วย 7 ขั้นตอน คือ U_{rp}, U_{cw}, U_{rw}, conversion of the U_{rw}, U_w, p-p insulation และ clearance

โดยโปรแกรมสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนมีความสามารถดังนี้

- สามารถประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบแรงดันในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2
- สามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลอินพุตในแต่ละขั้นตอนของการประสานสัมพันธ์ฉนวน
- สามารถเลือกใช้กับดักเสิร์จเพื่อป้องการแรงดันเกิน
- สามารถแสดงผลการประสานสัมพันธ์ฉนวนในรูปแบบตารางข้อมูลได้ และสามารถเก็บข้อมูลในรูป PDF File

อย่างไรก็ตามผลการศึกษาครั้งนี้ศึกษาภายใต้ขอบเขตที่จำกัด ดังนั้นการที่จะนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในทางปฏิบัติจำเป็นต้องปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสามารถสรุปเป็นข้อเสนอแนะได้ดังนี้

1. การออกแบบโปรแกรมสำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC-60071-2 โดยใช้ตัวอย่างตามมาตรฐาน ซึ่งครอบคลุมทั้งแรงดันในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 เพื่อใช้ในการทดสอบโปรแกรมว่าสามารถทำงานได้ถูกต้องตามมาตรฐานหรือไม่ โดยข้อมูลที่ป้อนในการทดสอบตัวโปรแกรมเป็นค่าที่มาตรฐานสมมุติขึ้นเท่านั้น ซึ่งผู้ใช้งานจะต้องศึกษาถึงข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการป้อนจากข้อมูลจริงของสถานีไฟฟ้าเมื่อนำโปรแกรมไปประยุกต์ใช้งาน และนำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างตามมาตรฐาน เพื่อเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนต่อไป

2. ขั้นตอนในการเลือกใช้งานกับดักเสิร์จ ในตัวโปรแกรมจะเลือกผลิตภัณฑ์กับดักเสิร์จมาเพียง 2 บริษัท เท่านั้น คือ ABB และ SIMENS ซึ่งจะครอบคลุมการใช้งานในระดับแรงดันในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 เพื่อประโยชน์ในการศึกษาการประสานสัมพันธ์ฉนวนเท่านั้น ซึ่งในการพัฒนาโปรกแกรมต่อไป อาจมีการเพิ่มผลิตภัณฑ์อื่นๆ ให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

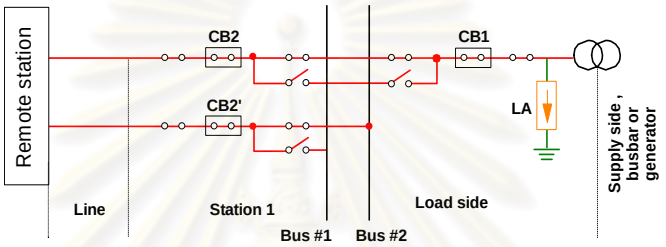
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณการประสานสัมพันธ์ฉนวน

ก.1 การประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV ในระดับแรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV $\leq U_s \leq$ 245 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 ในกรณีนี้ 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 $U_{e2} = 2.6\,pu$ 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 $U_{p2} = 3.86\,pu$ 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 = 245kV

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

ระดับการป้องกันอิมพัลส์ฟ้าผ่า U_{pl} = 66kV

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

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

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

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

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

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

- 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 จากสมการที่ 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 ค่ายอดสำหรับอิมพัลสวิตชิงหรืออิมพัลส์ฟ้าผ่า		**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 Equipment) :

- 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

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

คำนวณU_{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		**อุปกรณ์อื่น ๆ**			
		$U_{rw(s)}$	$U_{rw(c)}$	$U_{rw(s)}$	$U_{rw(c)}$	$U_{rw(s)}$	$U_{rw(c)}$
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
	อุปกรณ์อื่นๆ	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 ($\mathbf{300kV \le U_m < 800kV}$)

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 :

มีค่าเท่ากับU_{cw} สำหรับฉนวนภายนอก

U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า :

จากตารางที่ 3.4 สมมุติเลือก ความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของฉนวน (R) ค่า 0.0001 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งมาตรฐานแนะนำให้ใช้ค่านี้

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

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

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

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

คำนวณU_{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

$$m = 1.1619 + \left[0.0006 \times U_{cw}(p-e)\right] + \left[(1\times10^{-7})(U_{cw}(p-e))^2\right] + \left[(-2\times10^{-11})(U_{cw}(p-e))^3\right]$$

$$m = 1.1619 + \left[0.0006 \times 1458.82\right] + \left[(1\times10^{-7})(1458.82)^2\right] + \left[(-2\times10^{-11})(1458.82))^3\right]$$

$$m = 0.583$$

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

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

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

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

- สำหรับฉนวนภายนอก เลือก ระยะห่างระหว่างอากาศ(Air Clearance) และฉนวนที่สะอาด หรือ แห้ง

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

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} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า	1645.11
มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง	1550
มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน)	1950
มาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่ได้รับการป้องกัน)	2100

ก.3.7.1 U_w สำหรับฉนวนภายใน

จากตารางที่ ก.9 เมื่อทราบค่าU_{rw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า 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} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า 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 $U_{e2} = 1.92\,pu$ คำนวณค่า U_{p2} จากสมการที่ 3.14

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

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

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

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

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

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

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

$$U_{p2\text{-}re} = 2\left[((0.463\times 3.264) + (0.074\times 1.92))\right]\times(635.2) = 2159.89\text{kV}$$

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

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

$$U_{p\text{-}cw} = K_{cs}U_{p2\text{-}re} = 1.1632\times 2159.89 = 2152.38\text{kV}$$

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

$$m = 1.397 - \left[0.0003\times U_{cw}(p-p)\right] - \left[(7\times 10^{-8})(U_{cw}(p-p))^2\right]$$
$$+\left[(2\times 10^{-11})(U_{cw}(p-p))^3\right]$$
$$m = 1.397 - \left[0.0003\times 2152.38\right] - \left[(7\times 10^{-8})(2152.38)^2\right]$$
$$+\left[(2\times 10^{-11})(2152.38)^3\right]$$
$$m = 0.519$$

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

$$U_{p\text{-}rw} = K_aK_sU_{p2\text{-}cw} = 1.066\times 1.05\times 2512.38 = 2812.11\text{kV}$$

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

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

- สำหรับฉนวนภายนอก เลือก ฉนวนที่สะอาด หรือเปียก

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

ดังนั้นค่าที่ใช้ในการทดสอบสวิตชิงอิมพัลส์ U_{rw}=2812.11kV มากกว่า $SIW(p\text{-}p)$ สำหรับฉนวนภายใน และฉนวนภายนอก แสดงว่าการทดสอบดังกล่าวพอเพียงและครอบคลุมทั้งทั้งฉนวนภายในและฉนวนภายนอก แต่ถ้า $U_{p\text{-}rw}$ มีค่าน้อยกว่า $SIW(p\text{-}p)$ 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)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

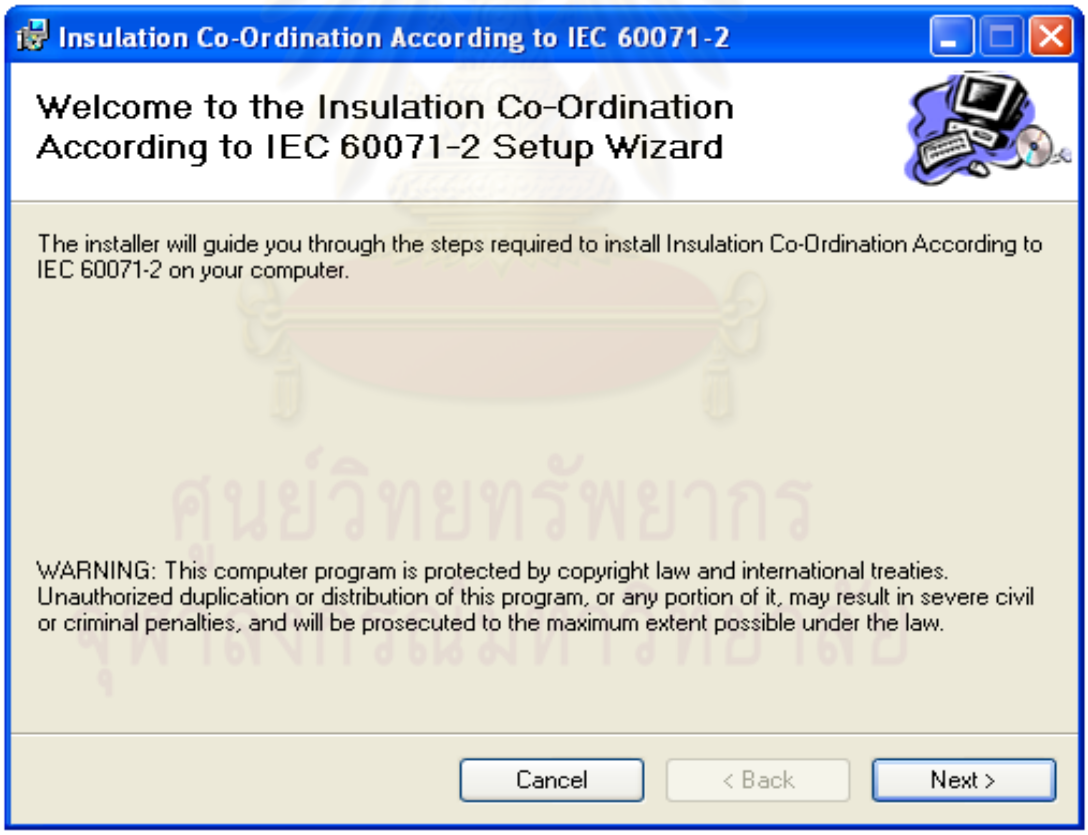
ภาคผนวก ข

การติดตั้งโปรแกรม

ขั้นตอนที่ 1 จากรูปที่ ข.1 คัดลอก Setup File ลงบน Desktop

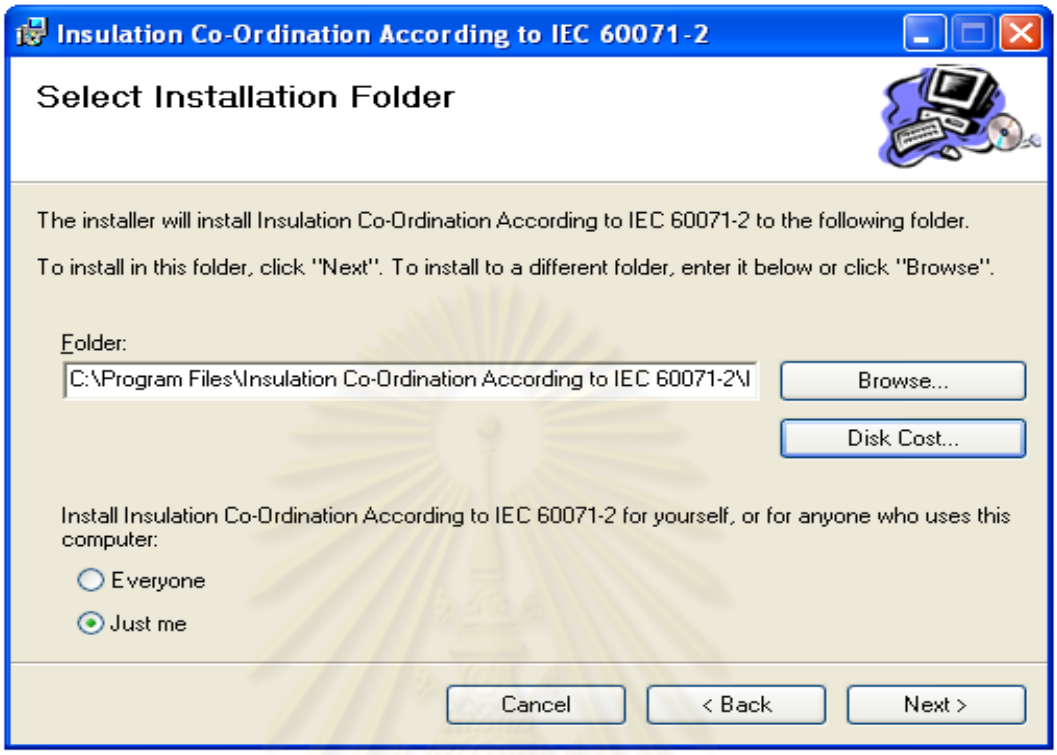
รูปที่ ข.1 Setup File

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

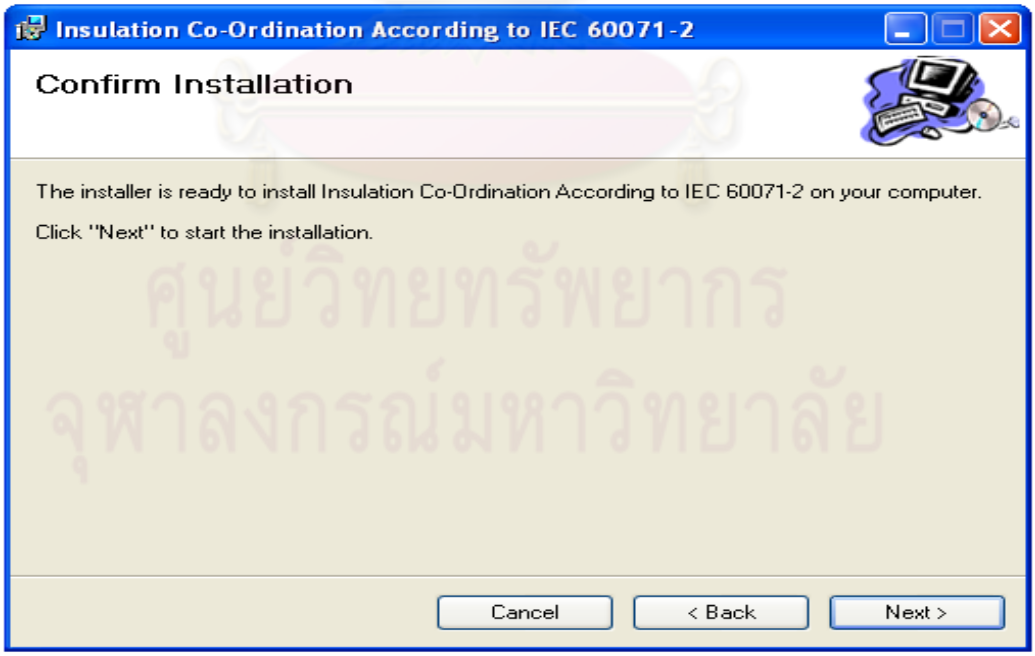


รูปที่ ข.2 Welcome to Insulation Co-Ordination According to IEC 60071-2 Setup Wizard

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



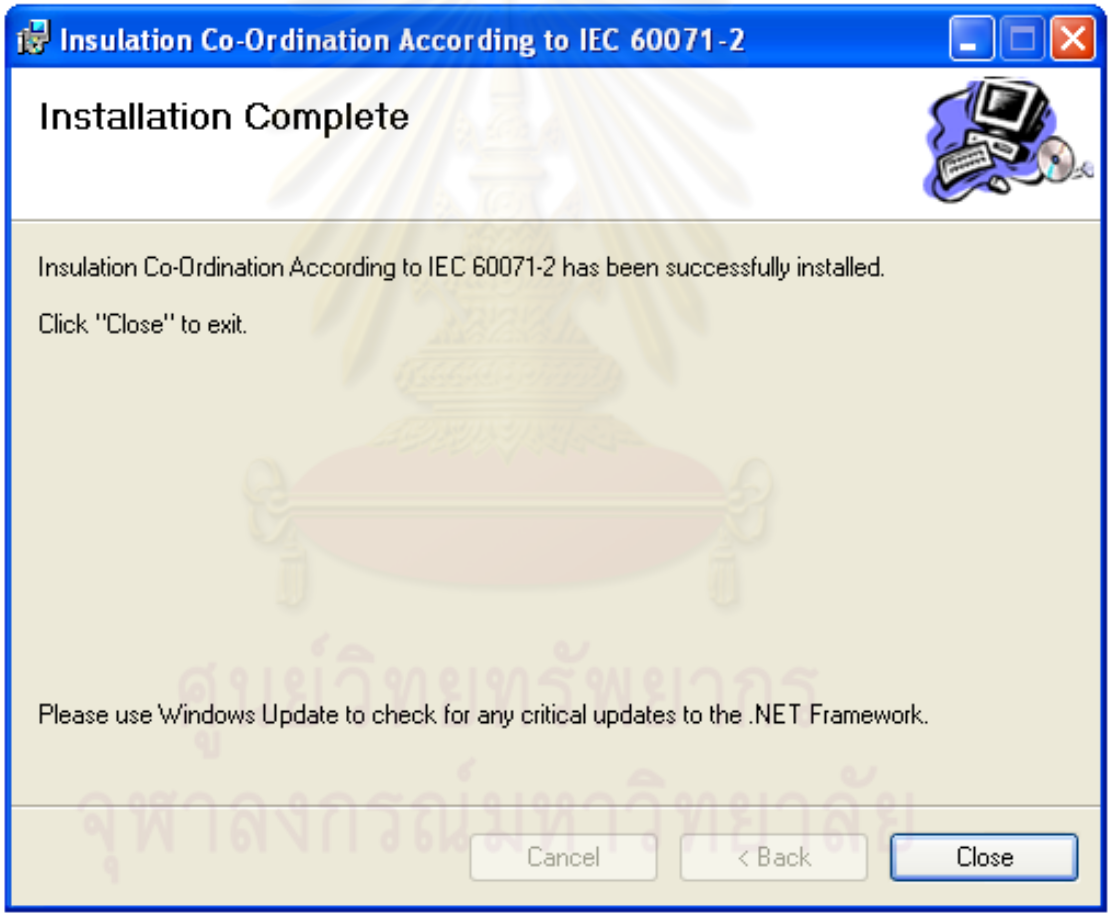
รูปที่ ข.3 Select Installation Folder



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

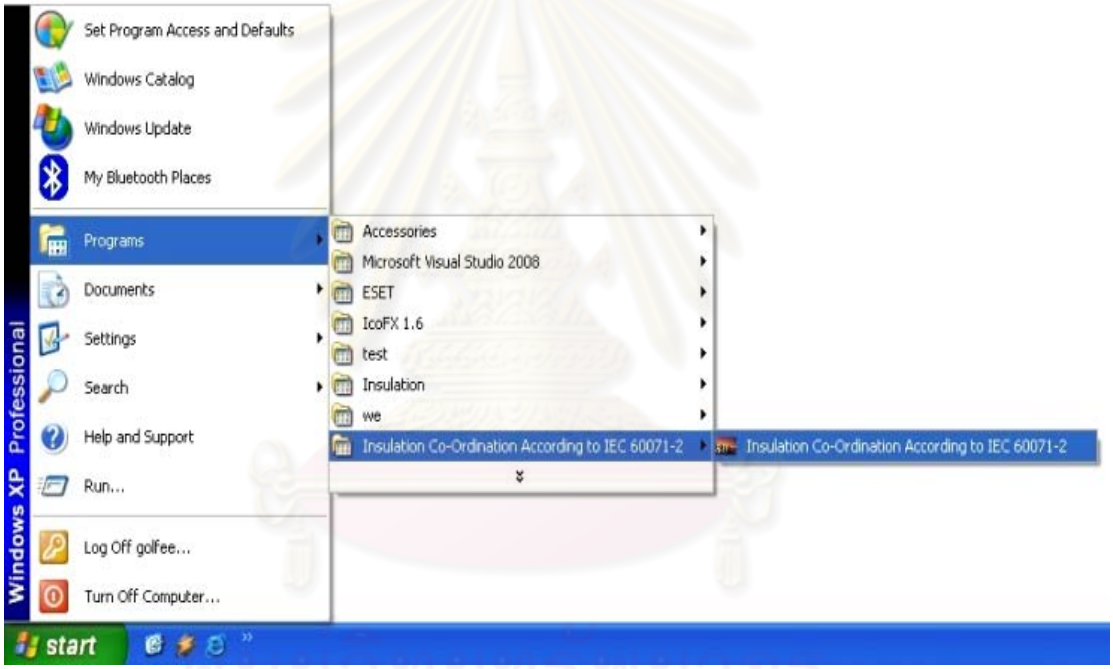


รูปที่ ข.5 Installation Complete

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

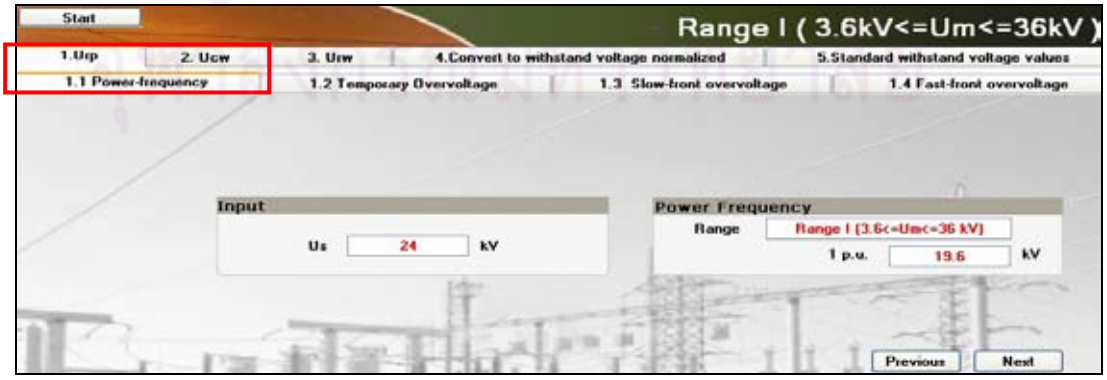
ตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวข้อง :

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

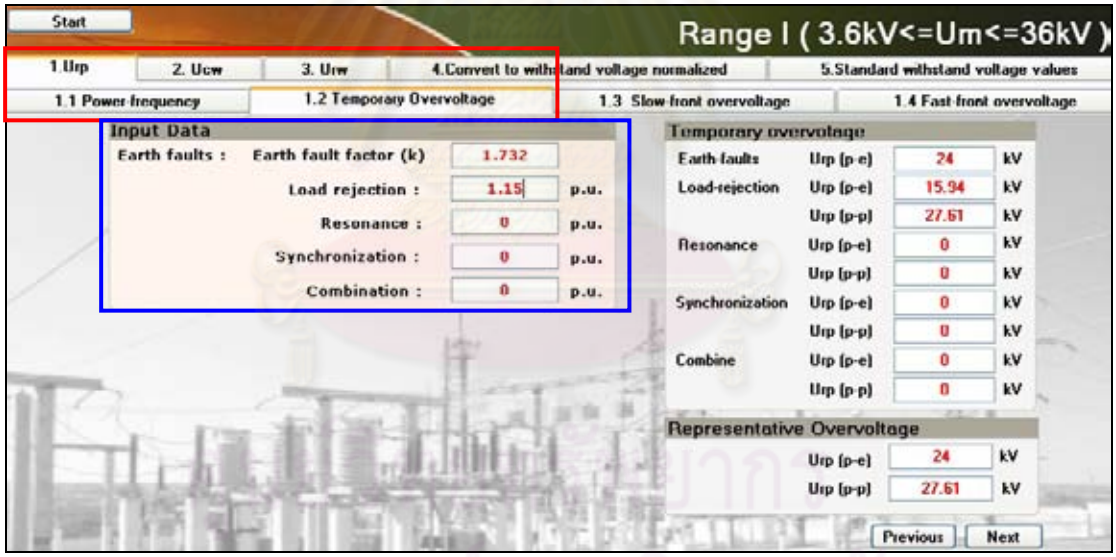
Range คือ ช่วงของแรงดันที่พิจารณา ซึ่งจะขึ้นกับ U_n ที่ผู้ใช้งานป้อน ซึ่งประกอบด้วย แรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$36 kV), แรงดันช่วงที่ 1 (52 kV$\leq U_m \leq$245 kV) และและแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV$\leq U_m \leq$800 kV)

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 :

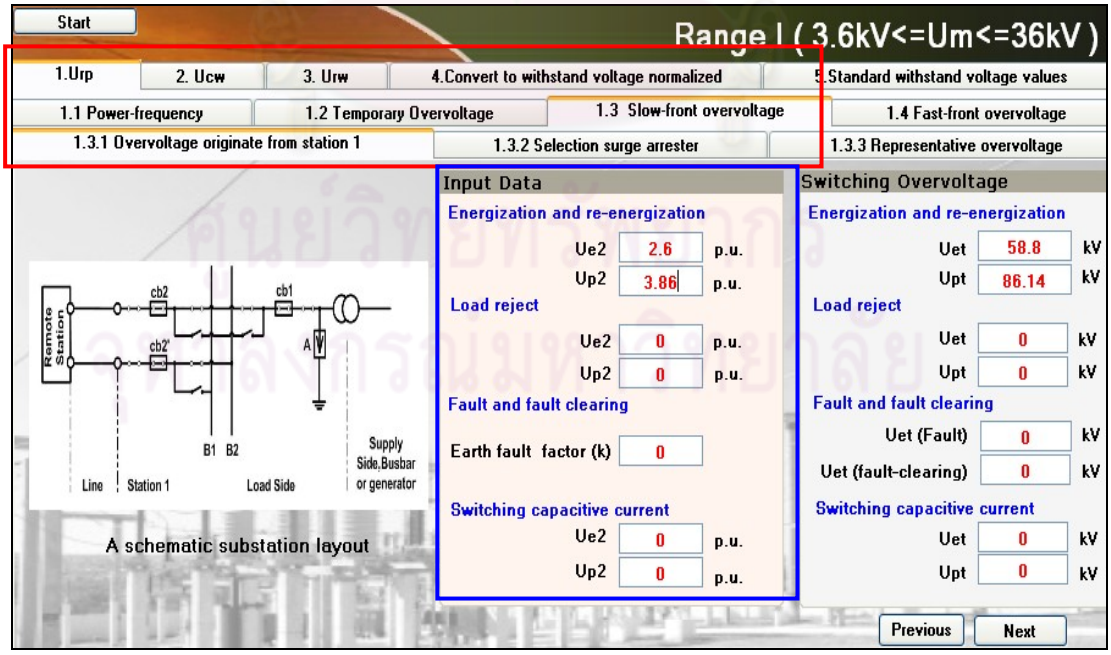
ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน พื้นที่สีชมพู คือ แหล่งกำเนิดแรงดันเกินที่สามารถเกิดขึ้นได้ (U_{e2}) เช่น ความผิดพร่องลงดิน การปลดโหลด แรโซแนน หรือ ผลรวมจากการเกิดหลายแหล่งกำเนิด ในตัวอย่างนี้เกิดความผิดพร่องลงดิน มีค่า k (ตัวแปรความผิดพร่องลงดิน) คือ 1.732 และเกิดการปลดโหลดเกิดแรงดันเกิน U_{e2} ขนาด 1.15 pu

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

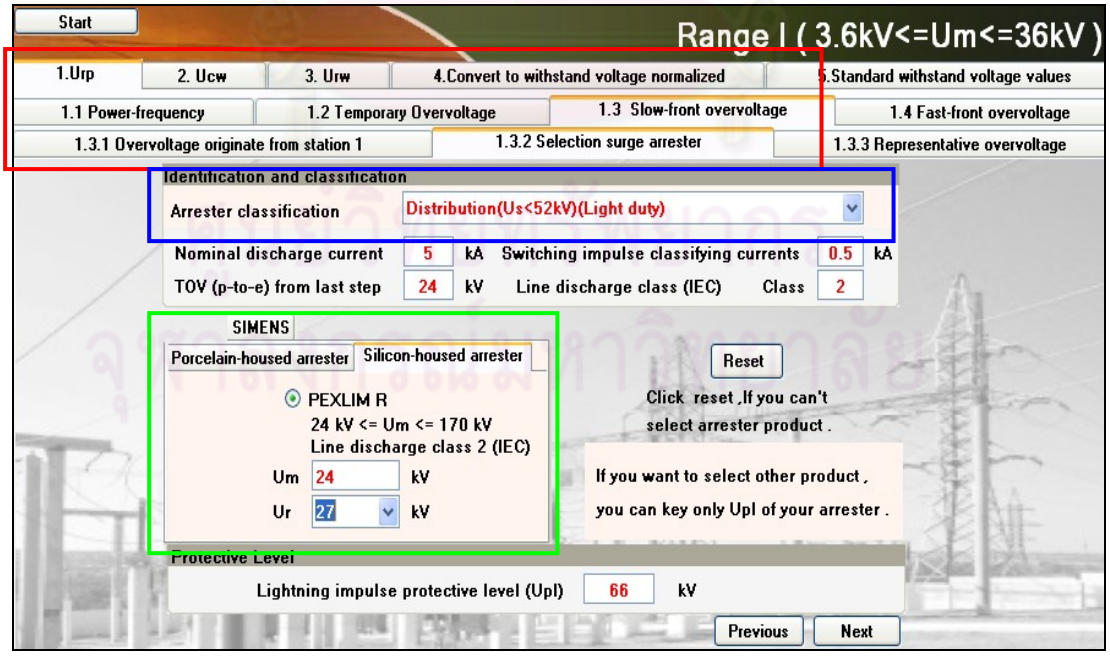
จากรูปที่ ค.4 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.1 Overvoltage originate station 1 โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

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

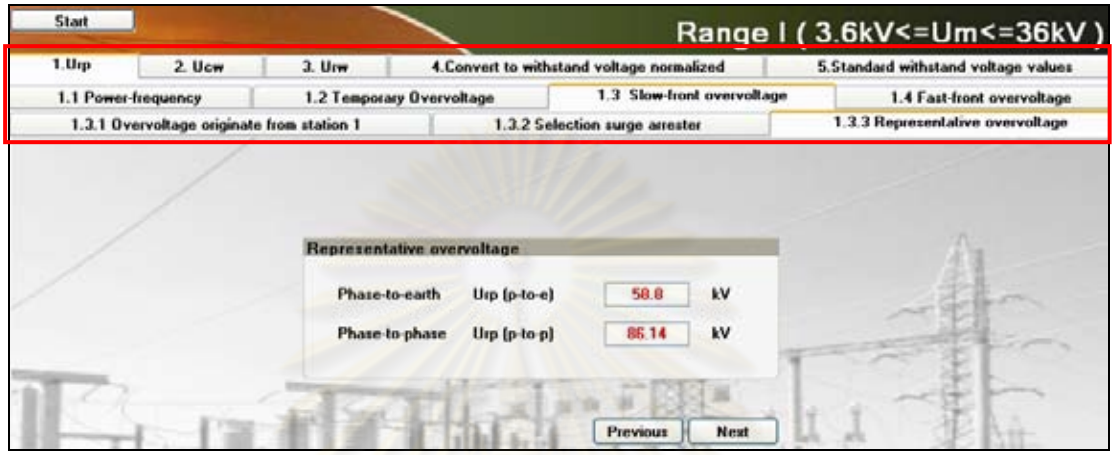
จากรูปที่ ค.5 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.2 Selection surge arrester มีรายละเอียดดังนี้

- 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}

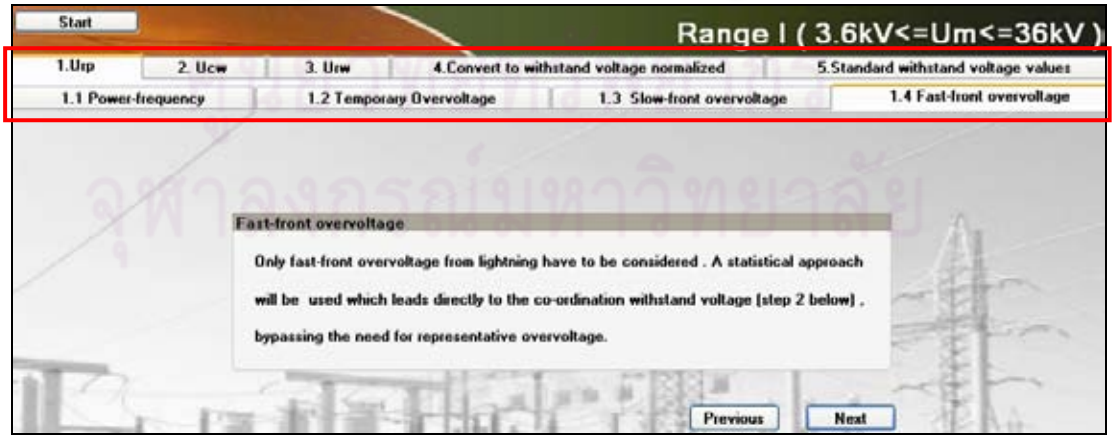
- ตัวอย่างนี้สมมุติเลือก กับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ ABB ชนิด Silicon-Housing Arrester รุ่น PEXLIM-R โปรแกรมจะแสดงผลการเลือกค่า U_m ของกับดักเสิร์จ มีค่า 24 kV ตัวอย่างนี้สมมุติเลือก U_r มีค่า 27 kV โปรแกรมจะแสดงผลค่า U_{pl} มีค่า 66 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป



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

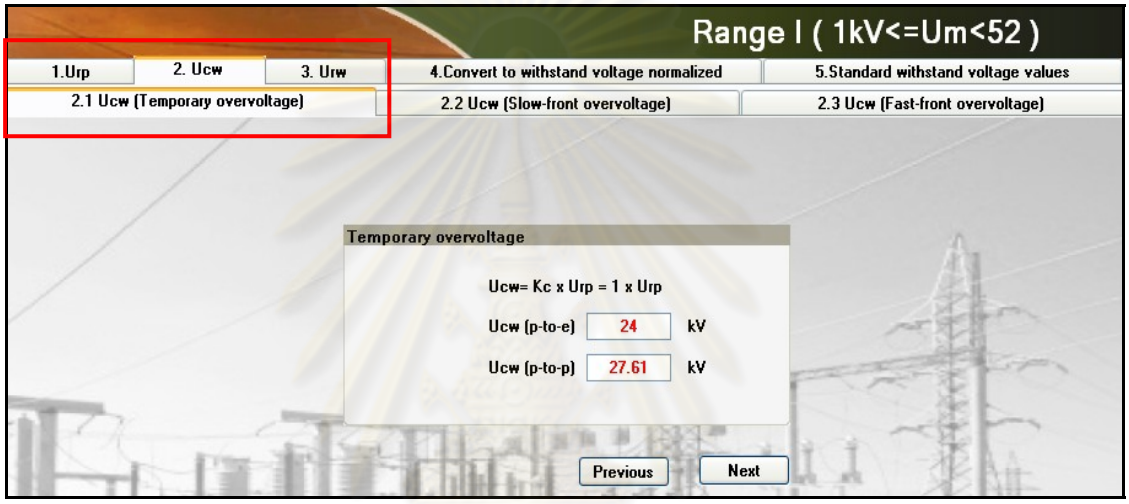


รูปที่ ค.7 ขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.4 Fast-front overvoltage

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 :

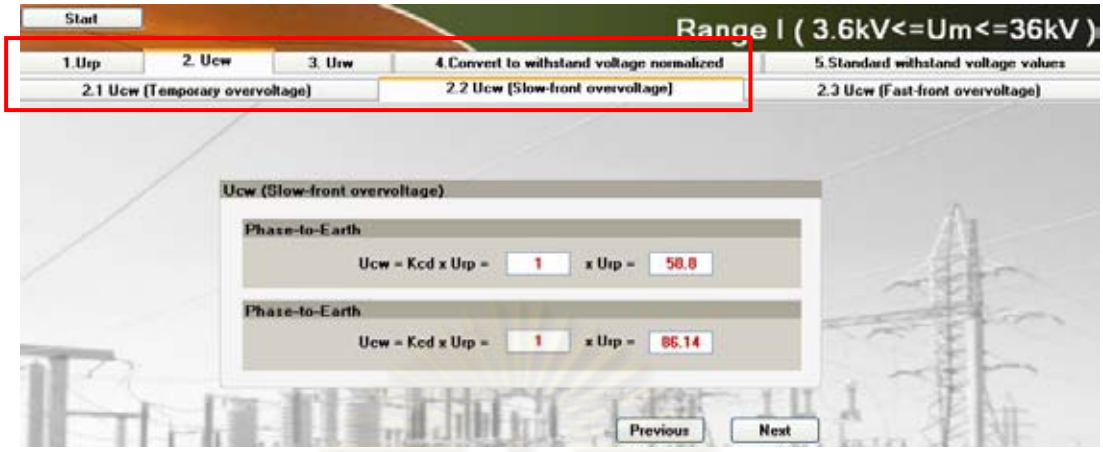
K_c คือ ตัวแปรในการประสานสัมพันธ์ฉนวน

$U_{cw}(p-e)$ 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



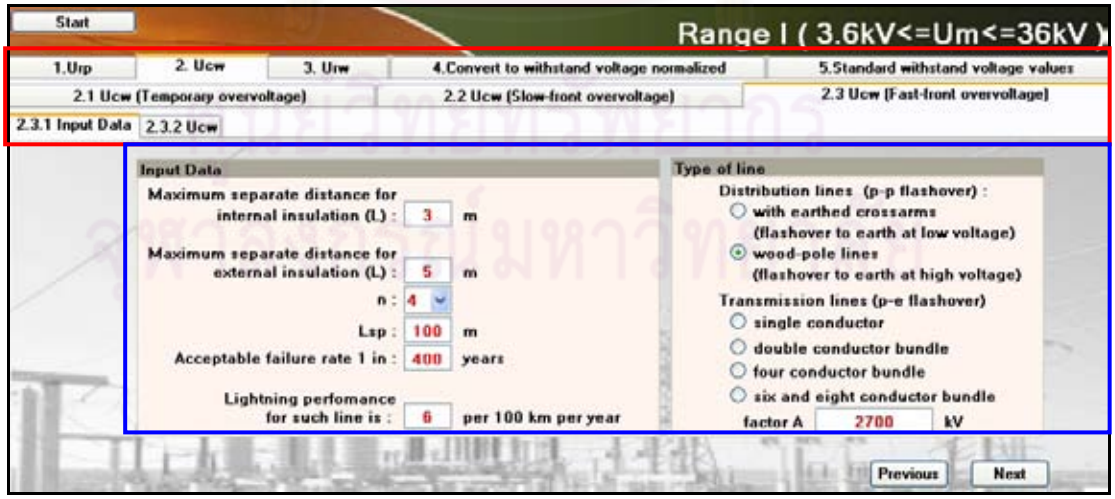
รูปที่ ค.9 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2 U_{cw} (Slow-Front Overvoltage)

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 เมื่อพิจารณาสำหรับสายส่งตัวแปรโดยปกติจะเขียนในรูป (1/years)

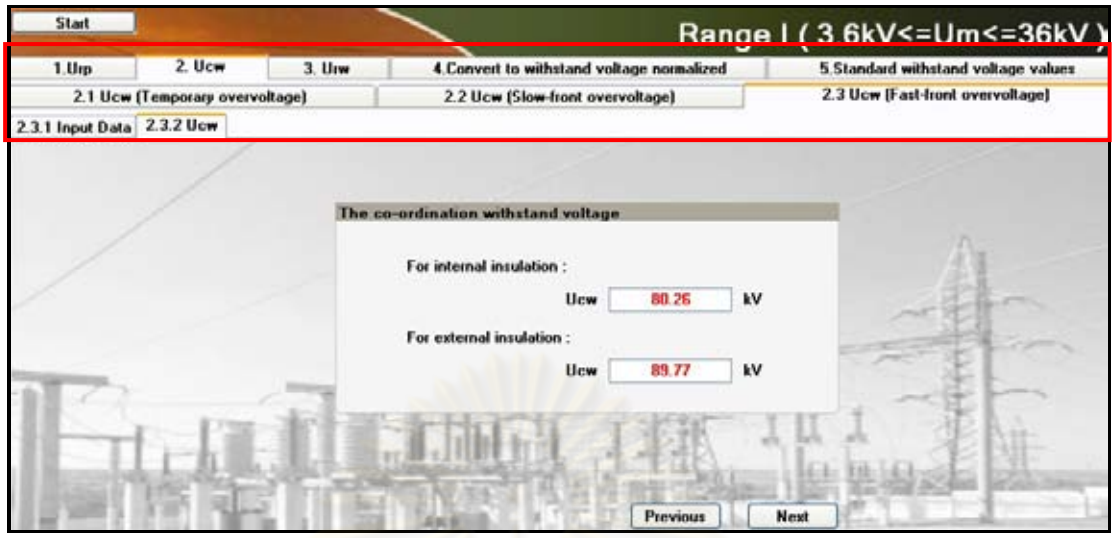
R_{km} คือ อัตราการขัดข้องของสายส่งเหนือศีรษะต่อปี สำหรับการออกแบบต่อหนึ่งกิโลเมตรแรก ในส่วนหน้าของสถานีไฟฟ้า โดยตัวแปรจะเขียนในรูป(1/km/year)

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

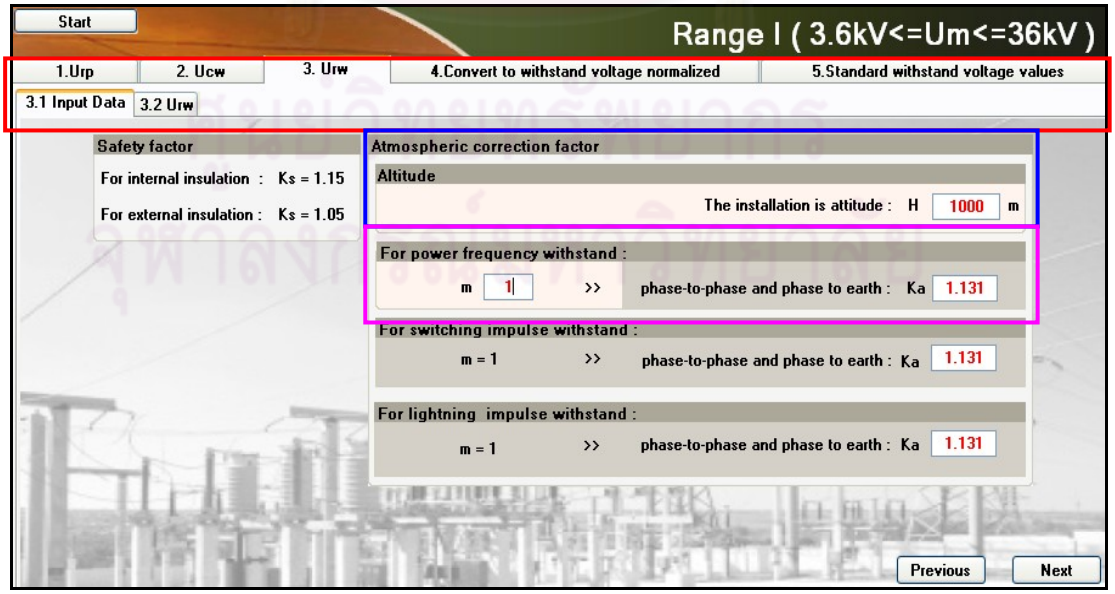


รูปที่ ค.11 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.3.2 ผลการคำนวณ U_{cw} (Slow-Front Overvoltage)

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

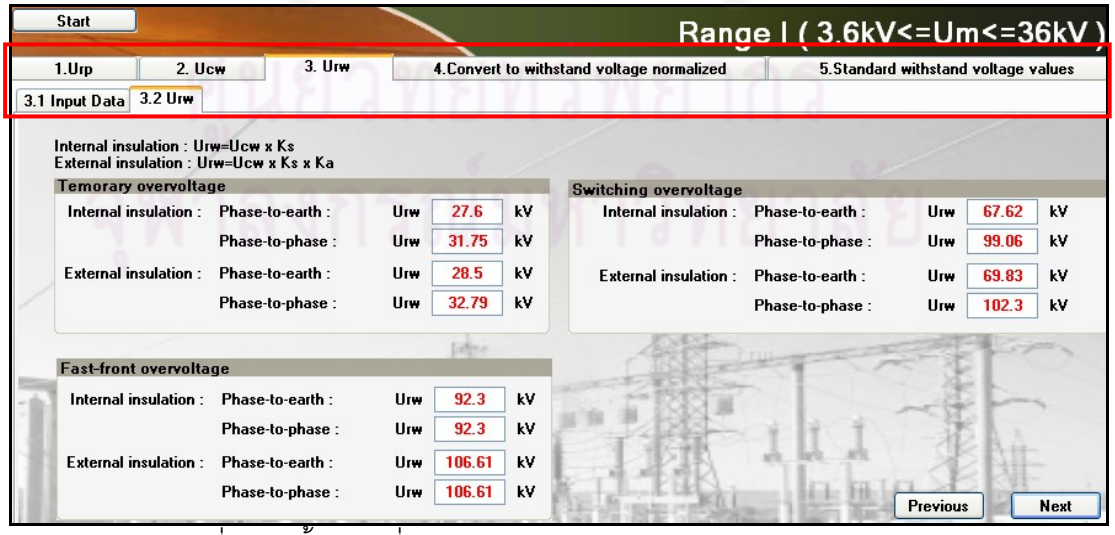
- ในส่วนกรอบสีน้ำเงินพื้นสีชมพู ผู้ใช้งานป้อนค่า H ตัวอย่างนี้สมมุติ H มีค่า 1000 m

- 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

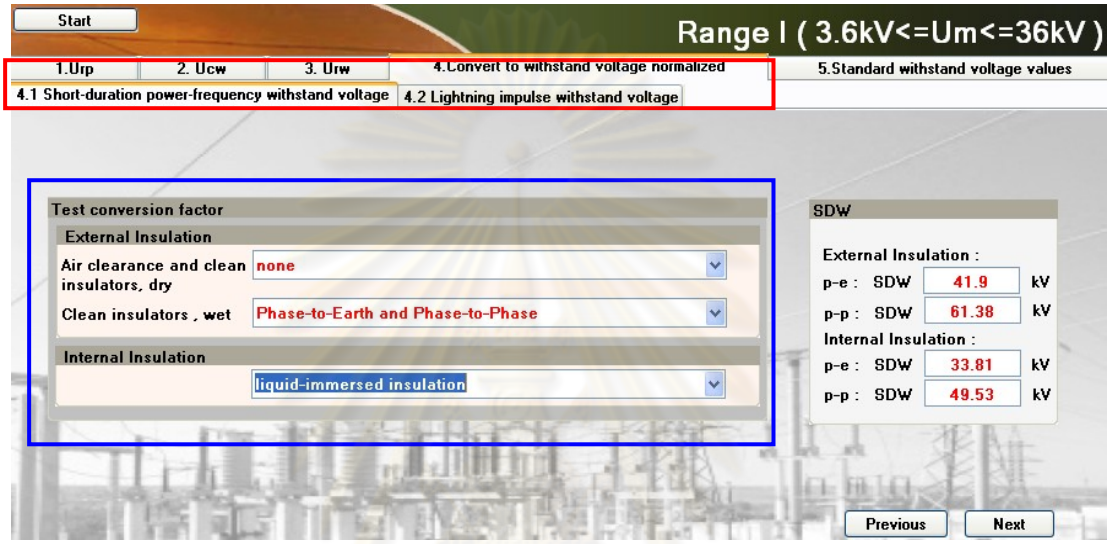
จากนั้นผู้ใช้กดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

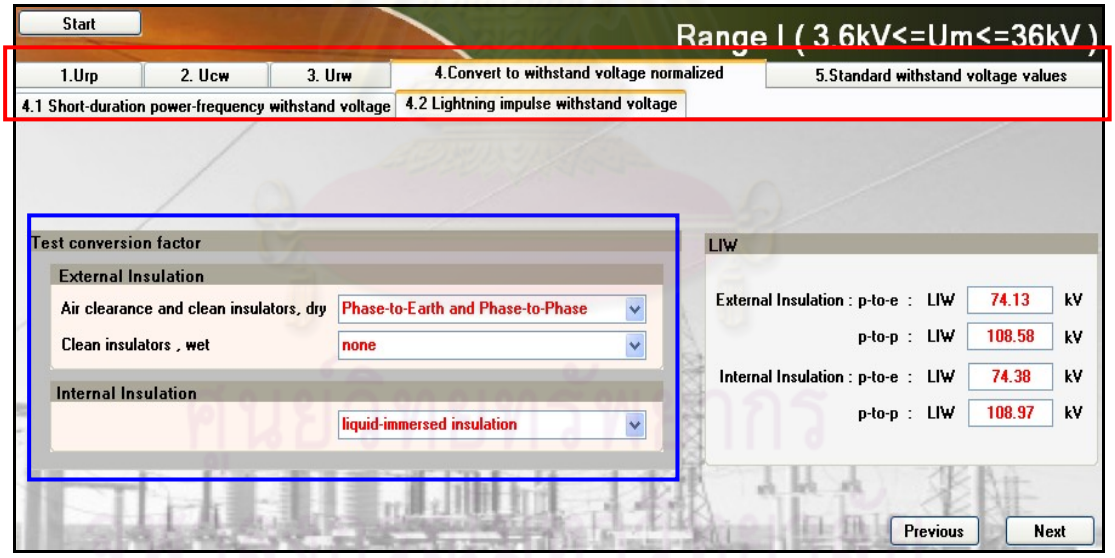
$SDW(p-p)$ มีค่า 59.44kV

- 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

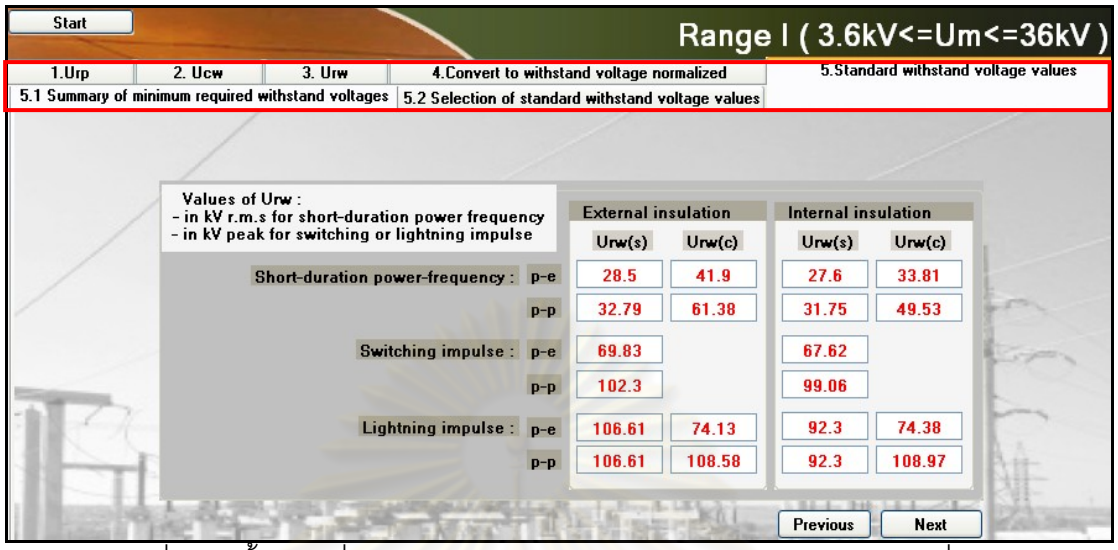
LIW(p - p) มีค่า 108.58kV

- สำหรับฉนวนภายใน

LIW(p - e) มีค่า 74.38 kV

LIW(p - p) มีค่า 108.97 kV

ค.1.6 การเลือกค่าความคงทนแรงดัน U_w

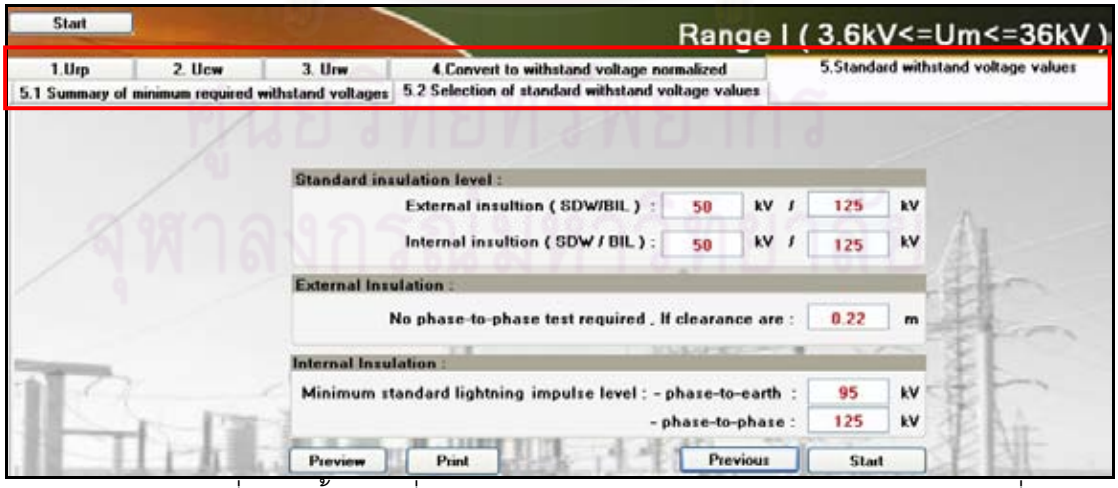


รูปที่ ค.16 ขั้นตอนที่ 5 Standard withstand voltage values หัวข้อย่อยที่ 5.1 Summary of minimum required withstand voltages

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

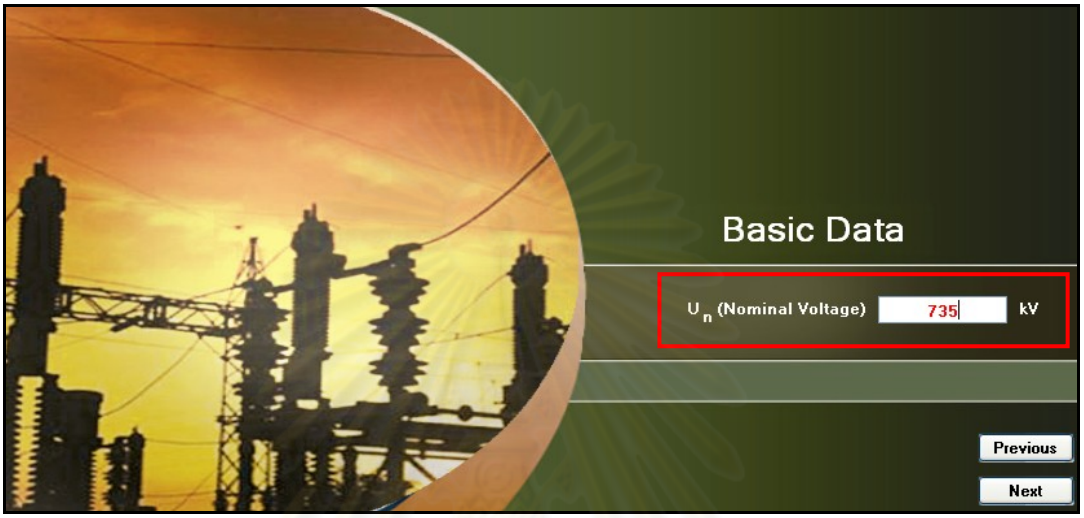
จากรูปที่ ค.16 พิจารณาอิมพัลส์ฟ้าผ่าระหว่างเฟสกับดินอยู่ระหว่าง $U_{rw(c)}$ = 74.38 kV และ $U_{rw(s)}$ = 92.3 kV เลือกค่าที่สูงสุด คือ $U_{rw(s)}$ พิจารณาจากตารางที่ 2.2 ที่ U_m = 24 kV เลือก BIL ค่าน้อยสุด คือ 95 kV

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 ($\mathbf{300kV \leq U_m \leq 800kV}$)

ค.2.1 ข้อมูลเบื้องต้น

จากรูปที่ ค.19 พิจารณาการประสานสัมพันธ์ฉนวนสำหรับแรงดันระบบ 735 kV



รูปที่ ค.18 พิจารณาแรงดันระบบ 735 kV

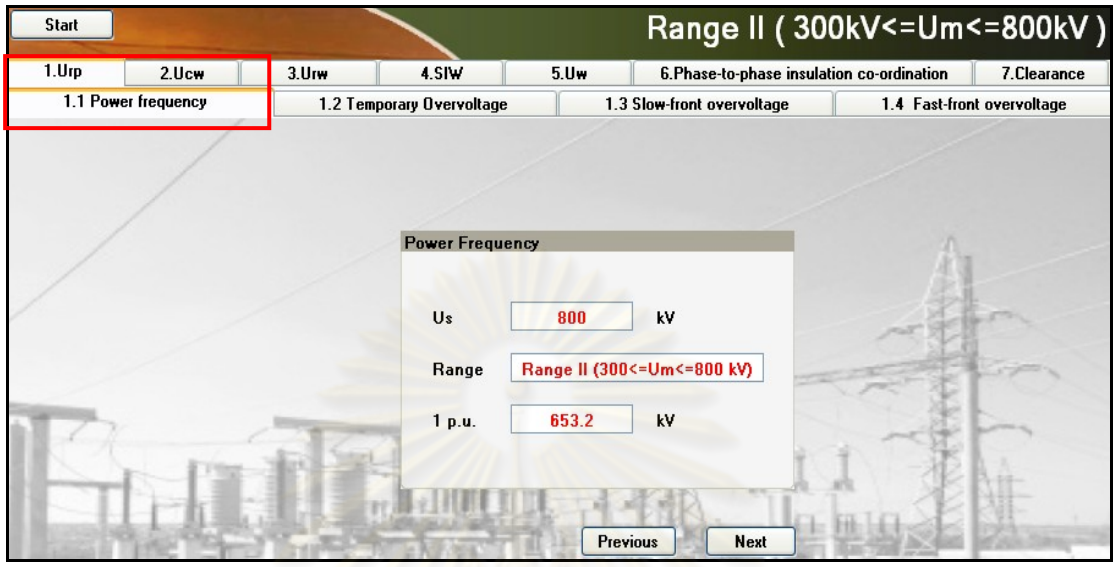
ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

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

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

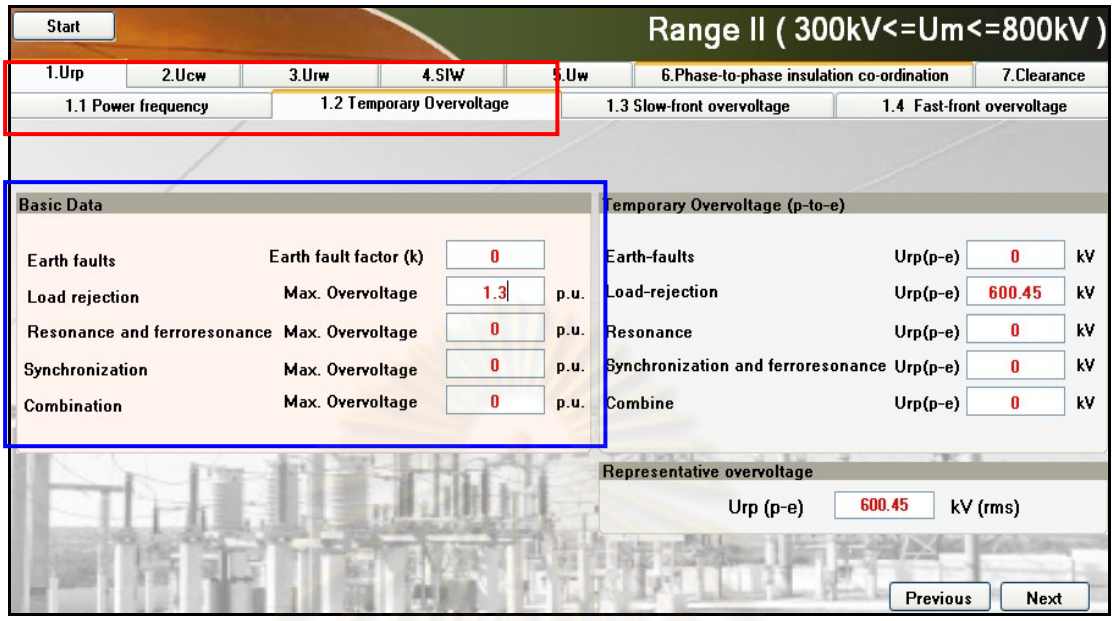
Range คือ ช่วงของแรงดันที่พิจารณา ซึ่งจะขึ้นกับ U_n ที่ผู้ใช้งานป้อน ซึ่งประกอบด้วย แรงดันช่วงที่ 1 (3.6 kV$\leq U_m \leq$36 kV), แรงดันช่วงที่ 1 (52 kV$\leq U_m \leq$245 kV) และและแรงดันช่วงที่ 2 (300 kV$\leq U_m \leq$800 kV)

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 :

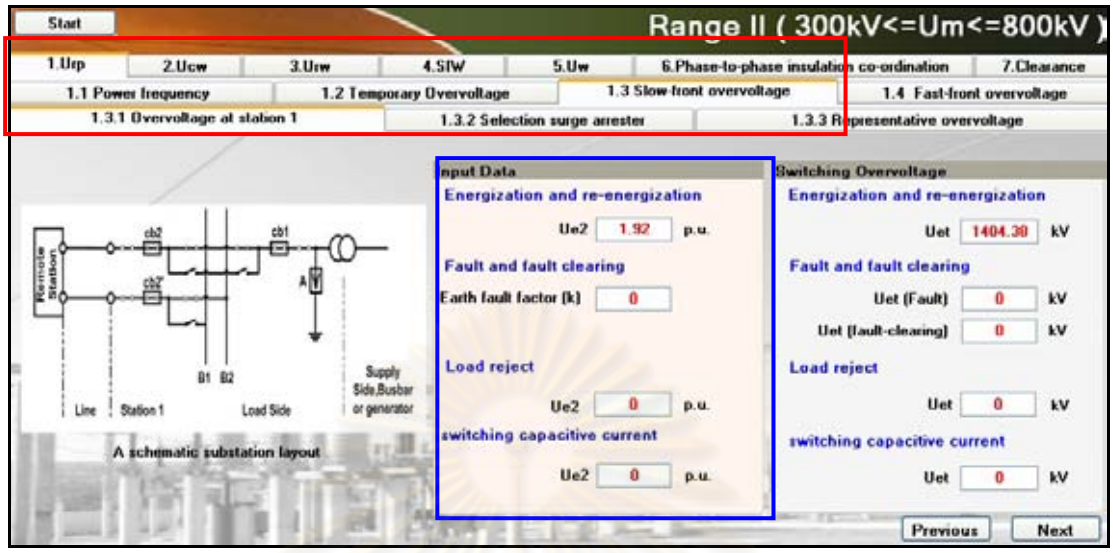
ในส่วนกรอบสีน้ำเงิน พื้นที่สีชมพู คือ แหล่งกำเนิดแรงดันเกินที่เป็นไปได้ (U_{e2}) เช่น ความผิดพร่องลงดิน การปลดโหลด แรโซแนน หรือ ผลรวมจากการเกิดหลายแหล่งกำเนิด ในตัวอย่างนี้สมมุติเกิดการปลดโหลดเกิดแรงดันเกิน U_{e2} ขนาด 1.3 pu

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

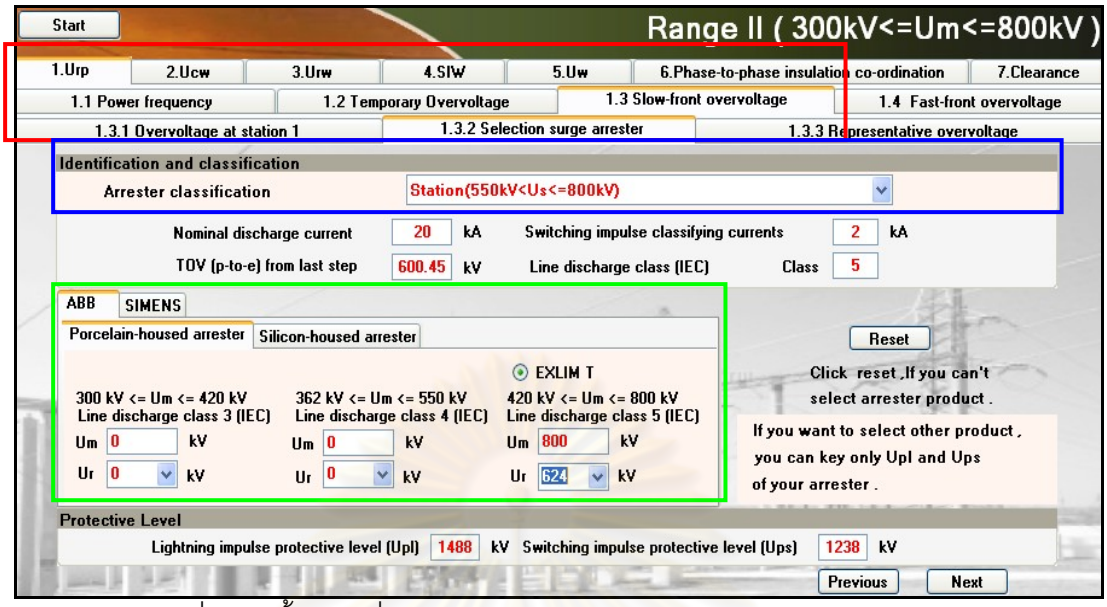
จากรูปที่ ค.21 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.1 Overvoltage originate from station 1 โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

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

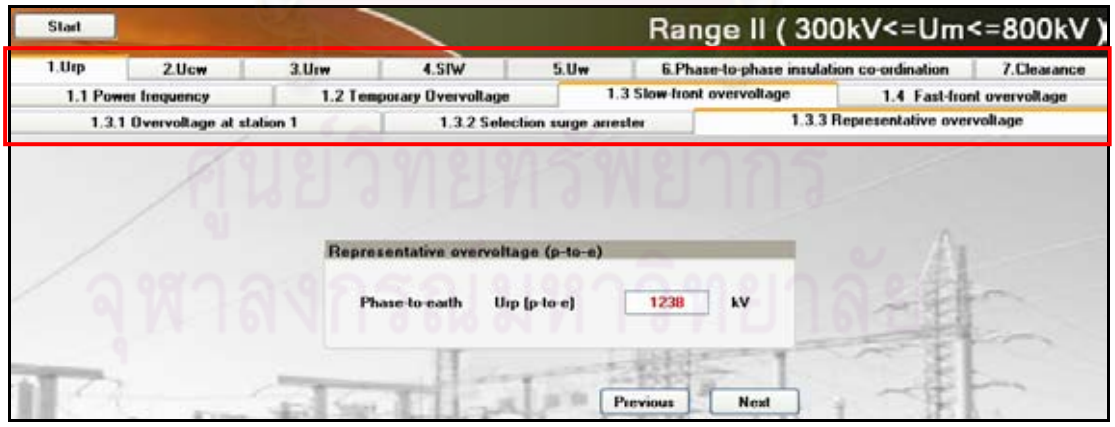
จากรูปที่ ค.22 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.3.2 Selection surge arrester มีรายละเอียดดังนี้

- 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}

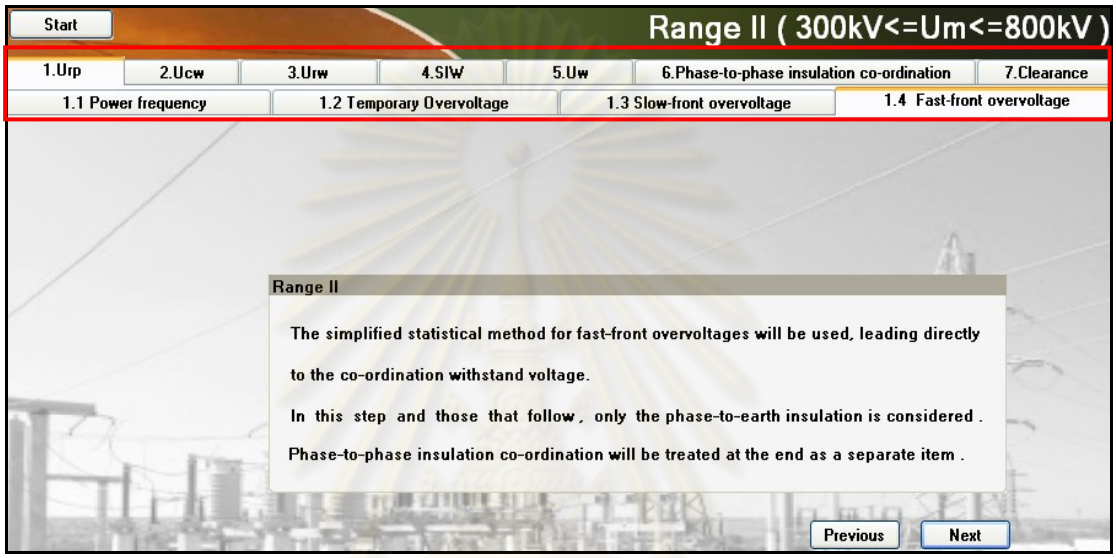
- ตัวอย่างนี้สมมุติเลือก กับดักเสิร์จบริษัท ABB ชนิด Porcelain-Housing Arrester รุ่น EXLIM-T โปรแกรมจะแสดงผลการเลือกค่า U_m ของกับดักเสิร์จ มีค่า 800 kV ตัวอย่างนี้สมมุติเลือก U_r ค่า 624 kV โปรแกรมจะแสดงผลค่า U_{pl} มีค่า 1488 kV และ U_{ps} มีค่า 1238 kV จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป



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

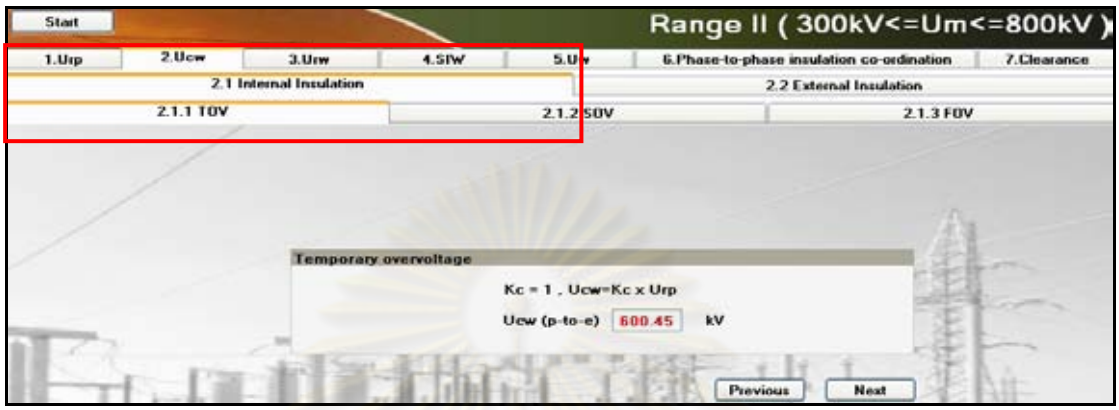
จากรูปที่ ค.24 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 1 U_{rp} หัวข้อย่อย 1.4 Fast-front overvoltage แสดงข้อความอธิบายว่า แรงดันเกินหน้าคลื่นเร็วจะพิจารณาในขั้นตอนที่ 2 U_{cw} ของการประสานสัมพันธ์ฉนวน จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 จากสมการที่แสดงเนื่องจากทราบค่า U_{rp} จากขั้นตอนก่อนหน้านี้

U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

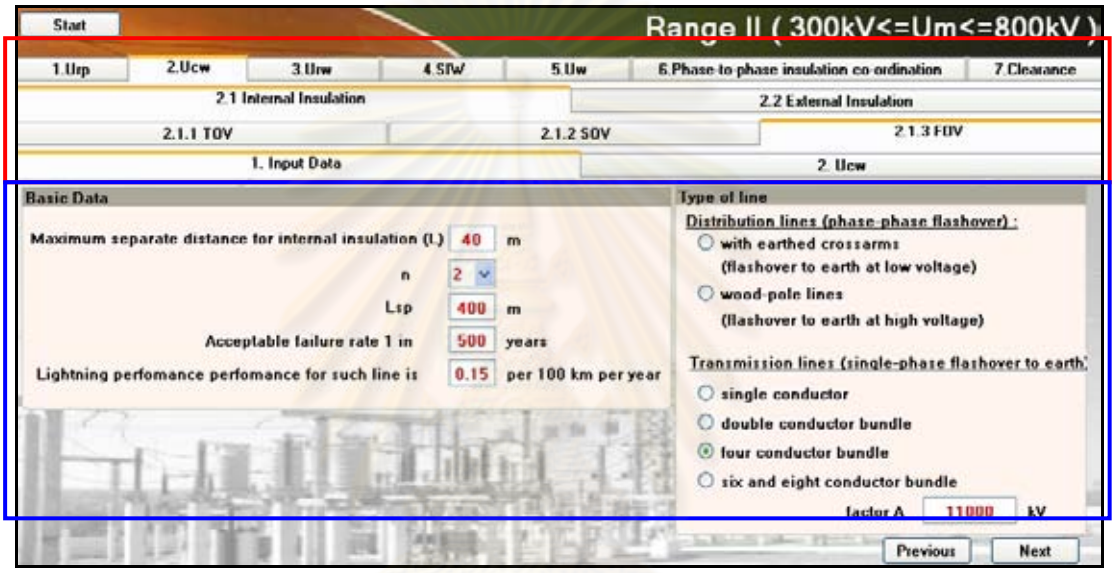
รูปที่ ค.26 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.1.2 SOV สำหรับฉนวนภายใน

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)

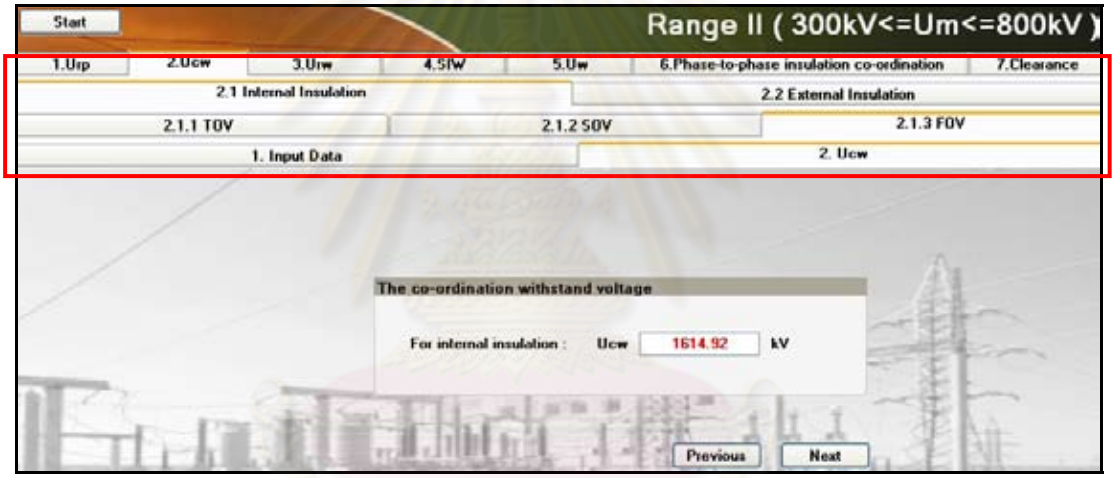
A คือ ตัวแปรแสดงคุณลักษณะของสายส่งพิจารณาตามตารางที่ 3.5

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

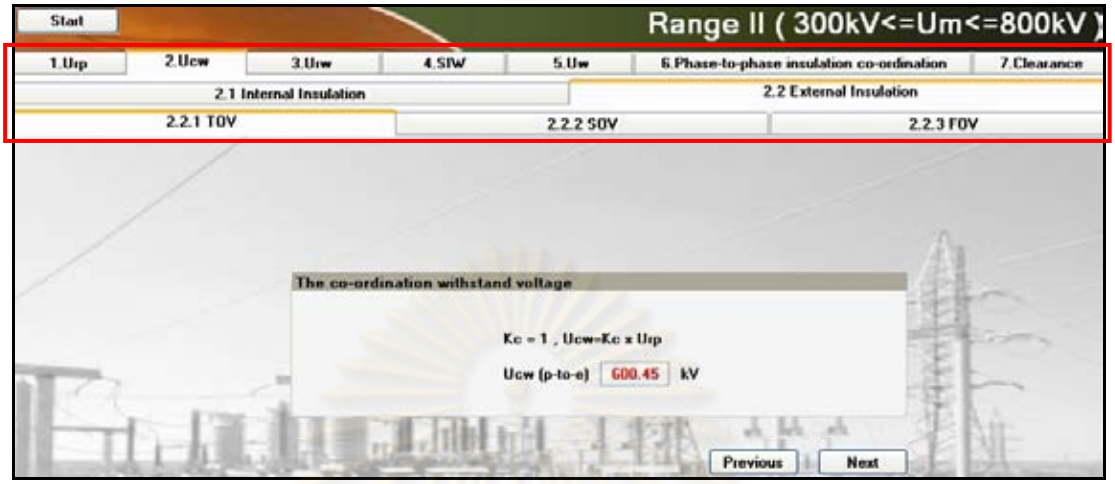


รูปที่ ค.28 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} สำหรับ FOV

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

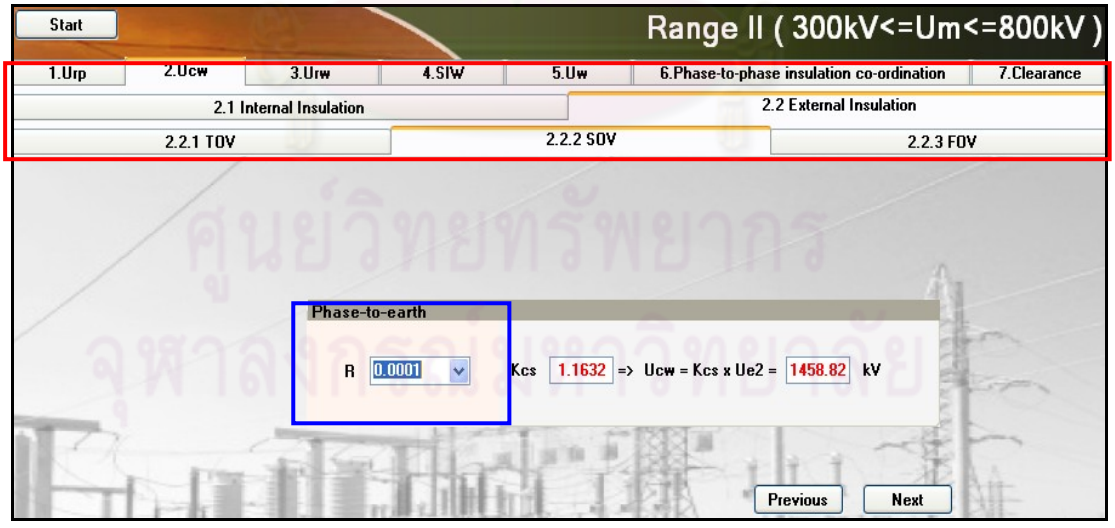
U_{cw} สำหรับแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า



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



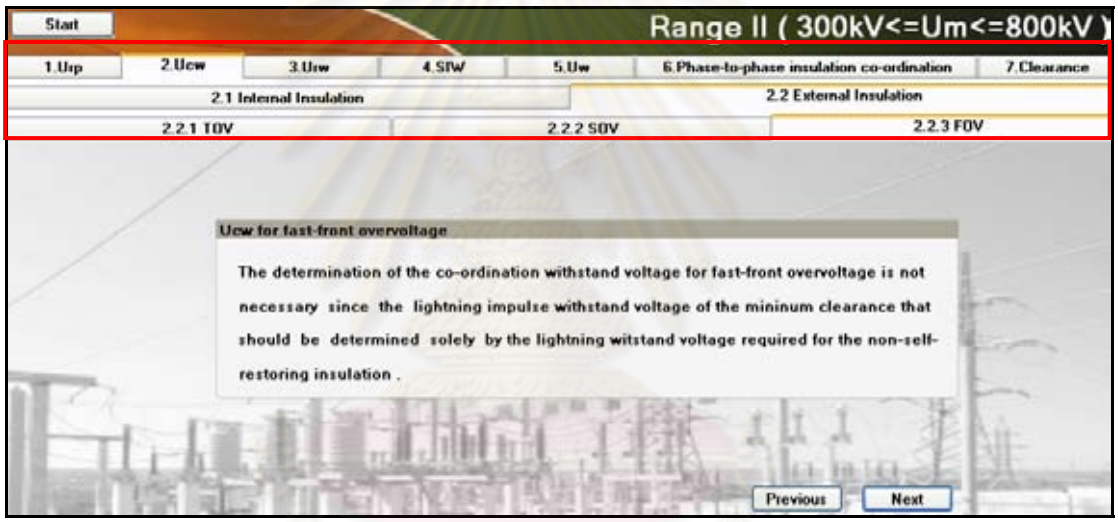
รูปที่ ค.30 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2.2 SOV สำหรับฉนวนภายนอก

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

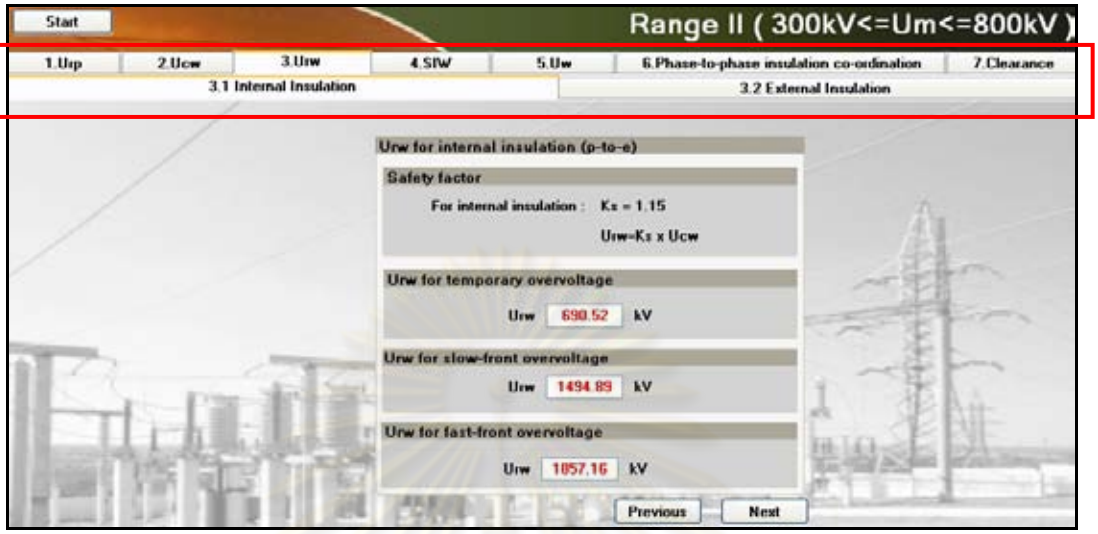


รูปที่ ค.31 ขั้นตอนที่ 2 U_{cw} หัวข้อย่อย 2.2.3 FOV สำหรับฉนวนภายนอก

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

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

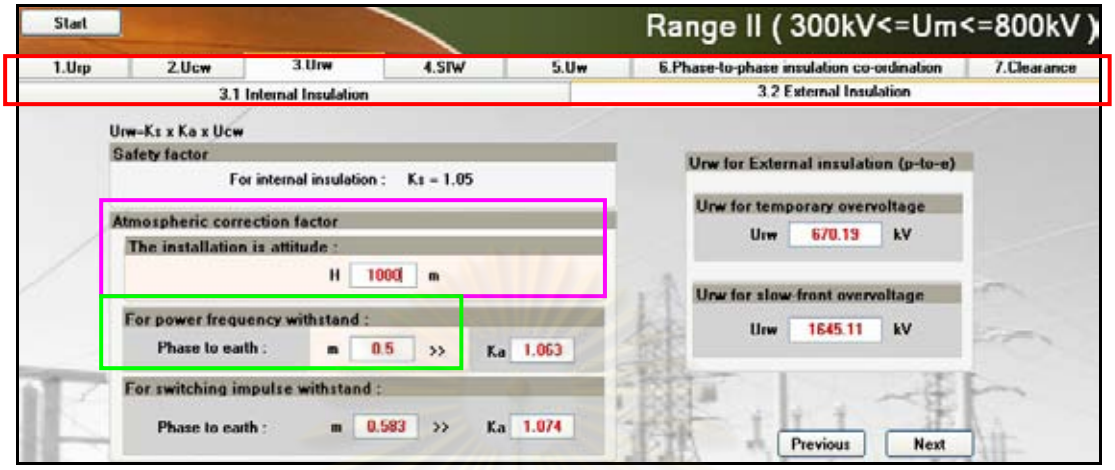
U_{rw} for temporary overvoltage: $U_{rw}(p-e)$ มีค่า 690.52 kV

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

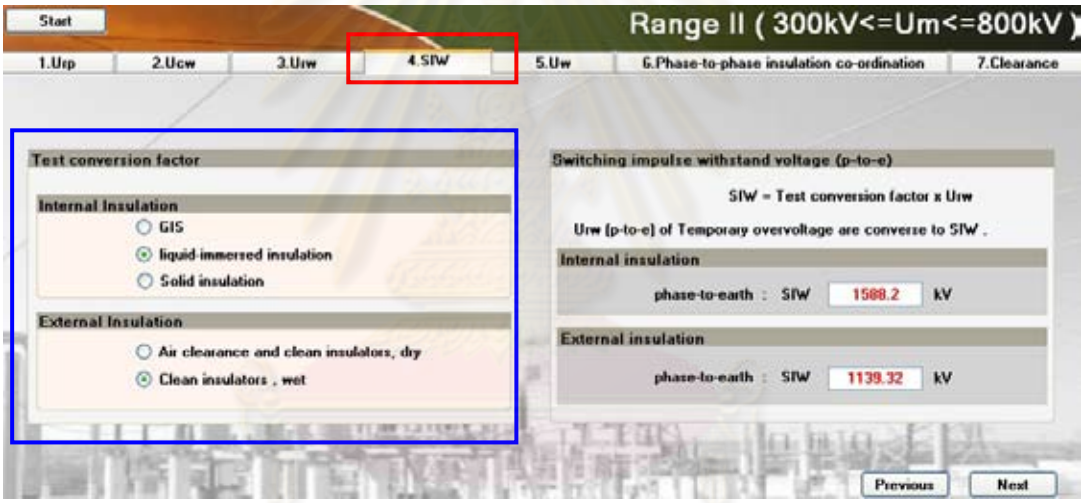
U_{rw} for temporary overvoltage: $U_{rw}(p-e)$มีค่า 670.19 kV

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

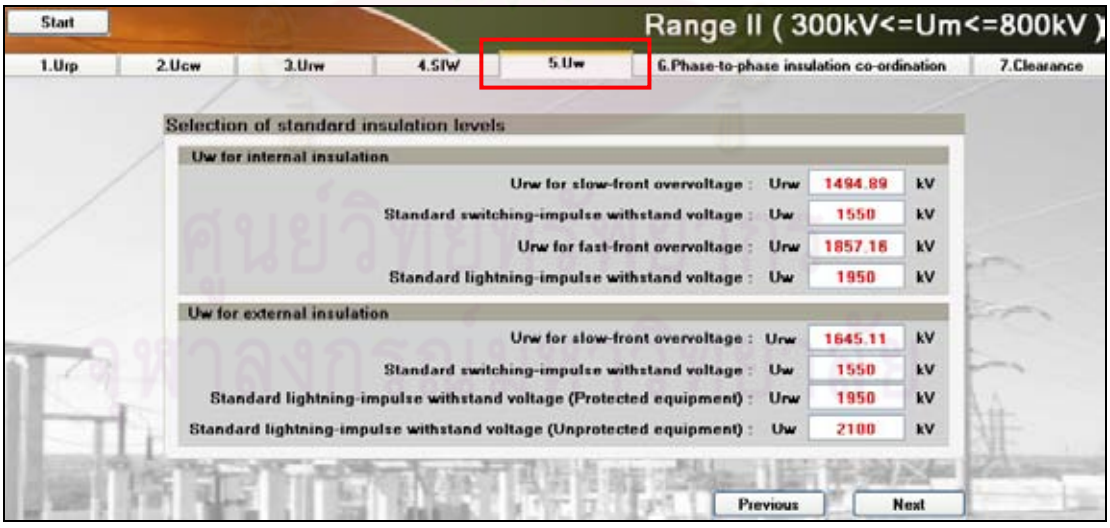
- ตัวอย่างนี้สมมุติ เลือกค่าตัวแปรสำหรับการเปลี่ยนรูปเพื่อการทดสอบ (Test Conversion Factor) สำหรับฉนวนภายใน ระหว่างเฟสกับดิน เลือกเป็น Liquid immersed insulation สำหรับฉนวนภายนอก สำหรับระหว่างเฟสกับดิน เลือก Clean insulator, wet

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

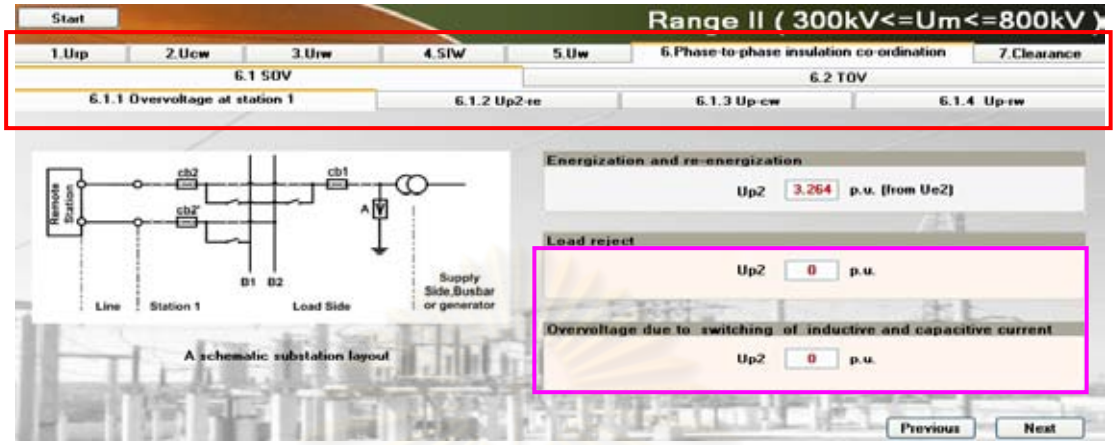
เมื่อทราบค่า U_{rw} for slow-front overvoltage คือ $U_{rw}(p-e)$ค่า 1,645.11 kV จากนั้นเปิดตารางที่ 2.3 มาตรฐานระดับการฉนวนเพื่อเลือกค่ามาตรฐานความคงทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (Standard switching-impulse withstand voltage) โดยเลือกค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $U_{rw}(p-e)$ในตัวอย่างนี้เลือกค่า U_w ค่า 1550 kV

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

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

ค.2.7 การประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

ค.2.7.1 แรงดันเกินหน้าคลื่นช้า

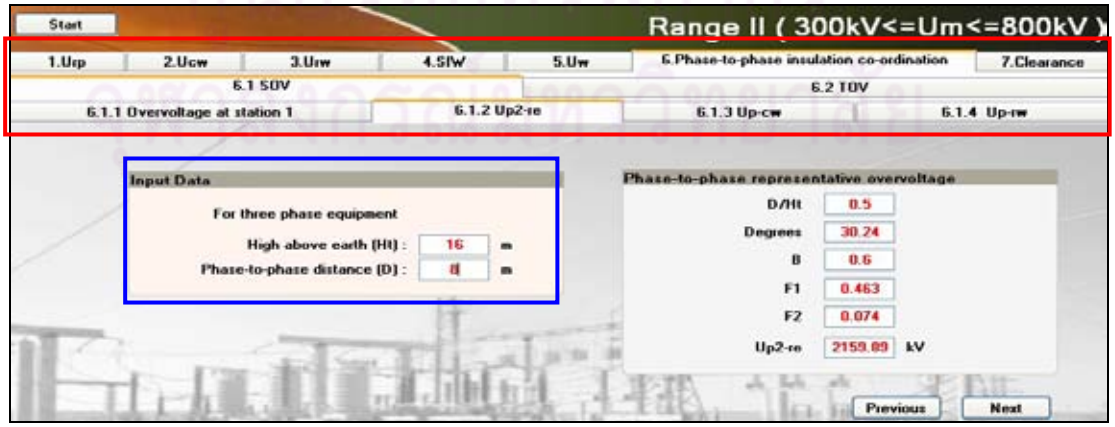


รูปที่ ค.36 ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อยที่ 6.1.1 Overvoltage at station 1

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

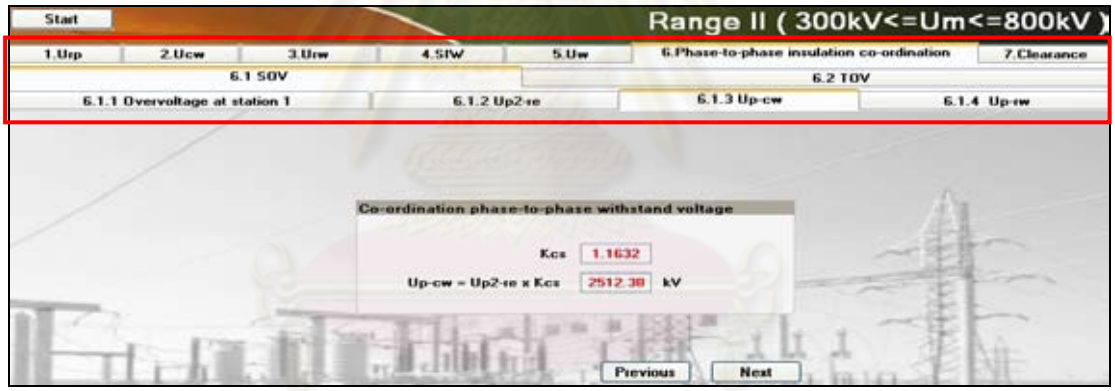
Ht คือ ความสูงเหนือพื้นดิน

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



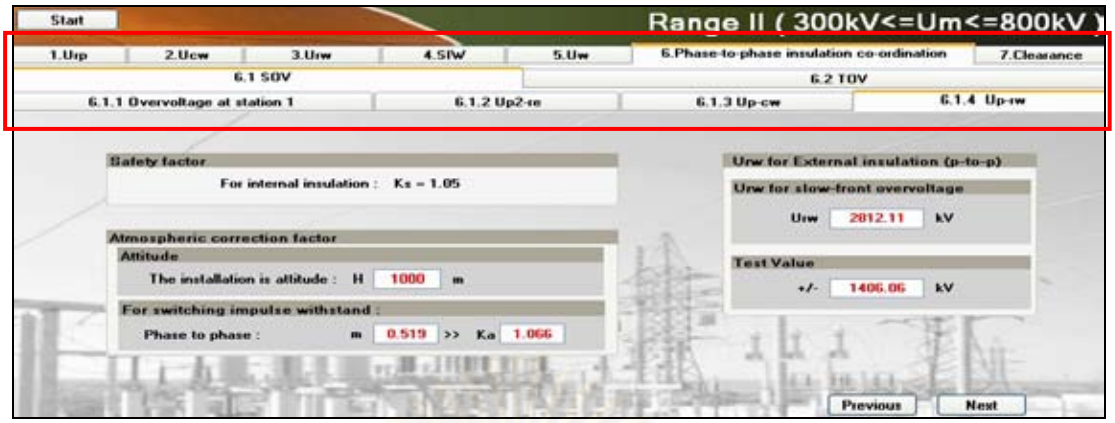
รูปที่ ค.38 ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อยที่ 6.1.3 $U_{p\text{-}cw}$

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 $U_{p\text{-}rw}$

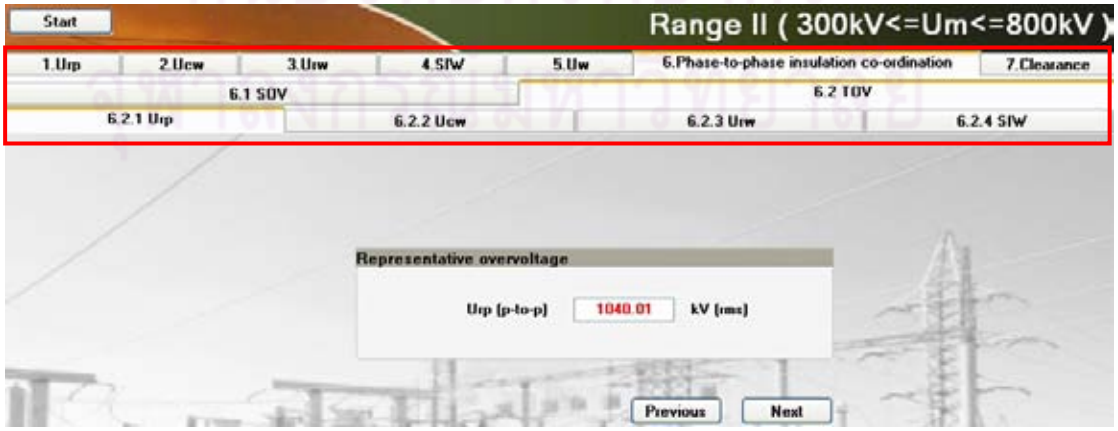
ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง :

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

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

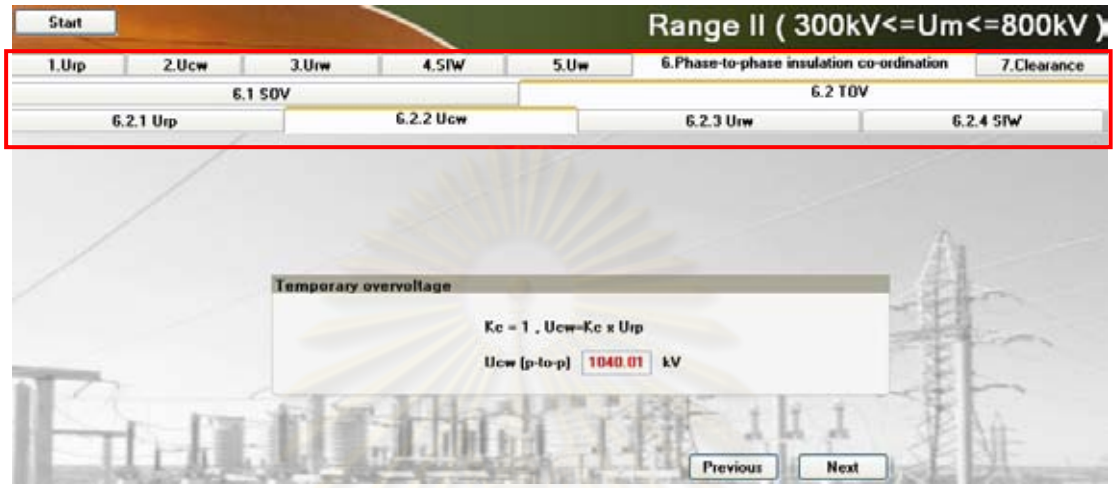
จากรูปที่ ค.39 ในส่วนกรอบสีแดง แสดงขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อย 6.1.4 $U_{p\text{-}rw}$ พิจารณาตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ $U_{p\text{-}rw}$ คือ ตัวแปรความปลอดภัย (K_s) สำหรับฉนวนภายในมีค่าคงที่ คือ 1.05 และตัวแปรชดสภาพบรรยากาศ (K_a) คำนวณได้เมื่อทราบค่า ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (H) ค่า 1000 m และ m มีค่า 0.519 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



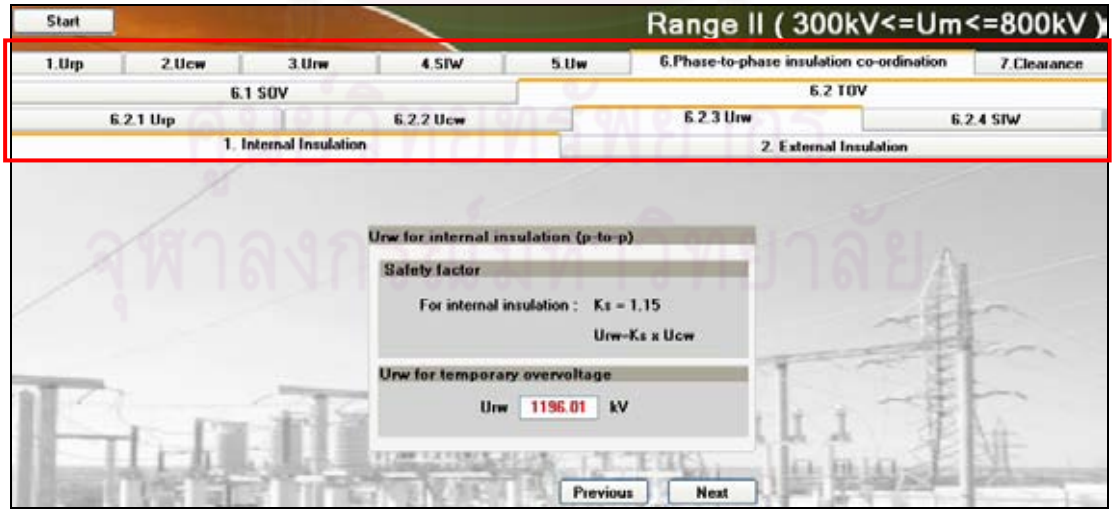
รูปที่ ค.40 ขั้นตอนที่ 6 หัวข้อย่อย 6.2.1 U_{rp}

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



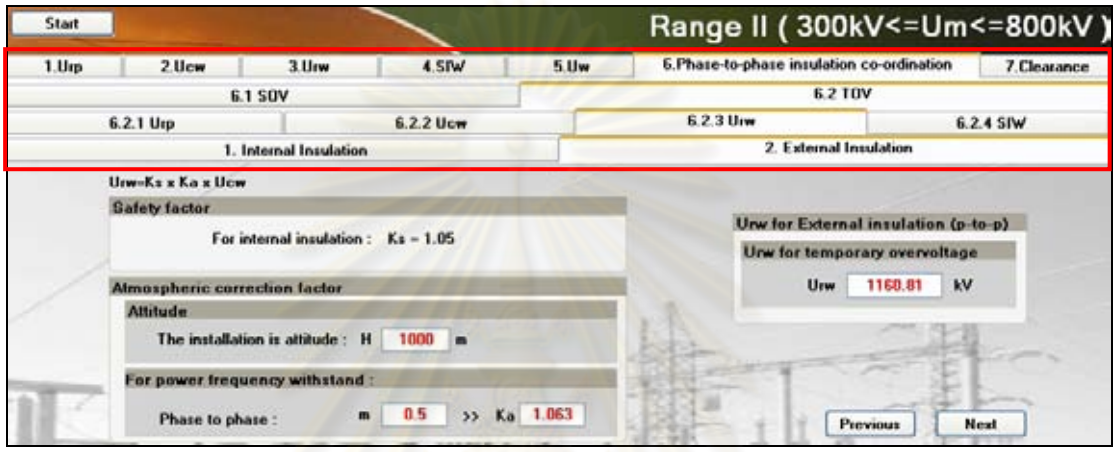
รูปที่ ค.41 ขั้นตอนที่ 6 P-to-P insulation co-ordination หัวข้อย่อย 6.1.4 U_{cw}

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



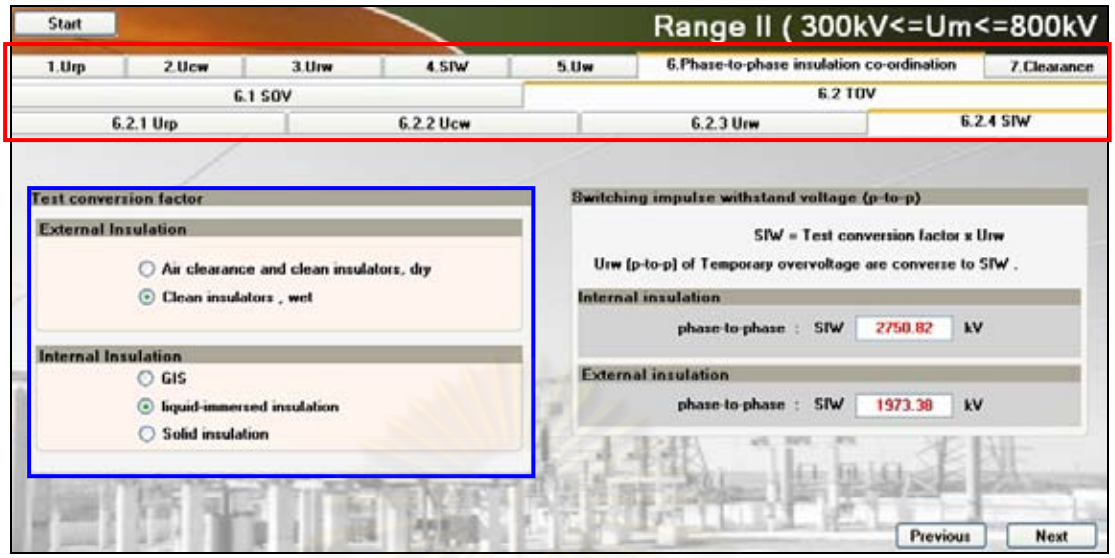
รูปที่ ค.42 ขั้นตอนที่ 6 P-to-P Insulation Co-Ordination หัวข้อย่อยที่ 6.2.3.1 U_{rw} สำหรับ Internal Insulation

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 :

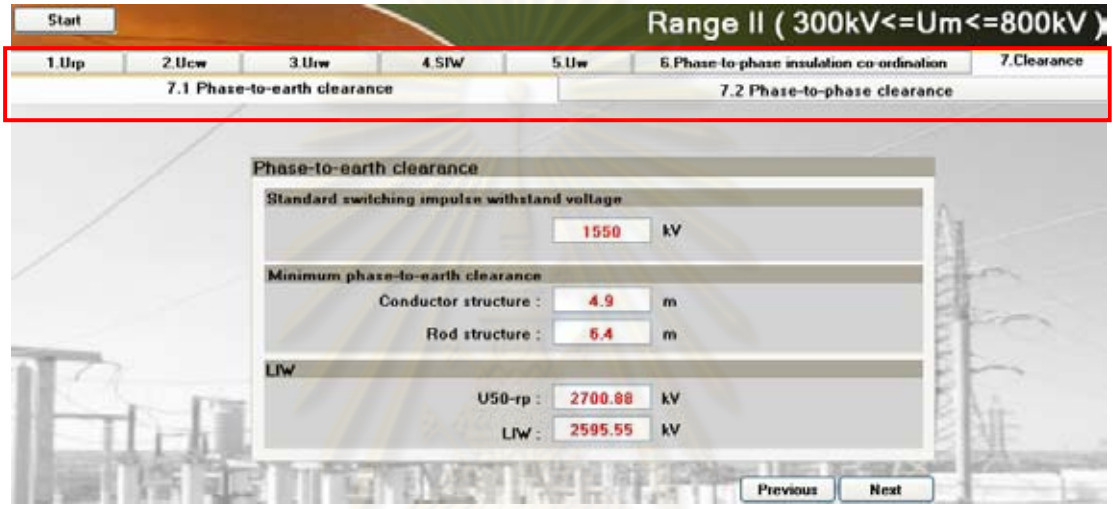
เมื่อผู้ใช้งานป้อนข้อมูลข้างต้นแล้วเสร็จ โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณสำหรับ *SIW(p - p)* โดยพิจารณาแยกระหว่าง ฉนวนภายใน และ ฉนวนภายนอก คือ

- 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 ค่าสูงสุดของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้าระหว่างเฟสกับเฟส (kV)

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

$U_{p\text{-}rw}$ คือ ความคงทนแรงดันที่ต้องการของแรงดันเกินหน้าคลื่นช้า 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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย