

## บทที่ 6

### แรงดันเกินจากการทำงานของฟิวส์ชนิดขาดตก

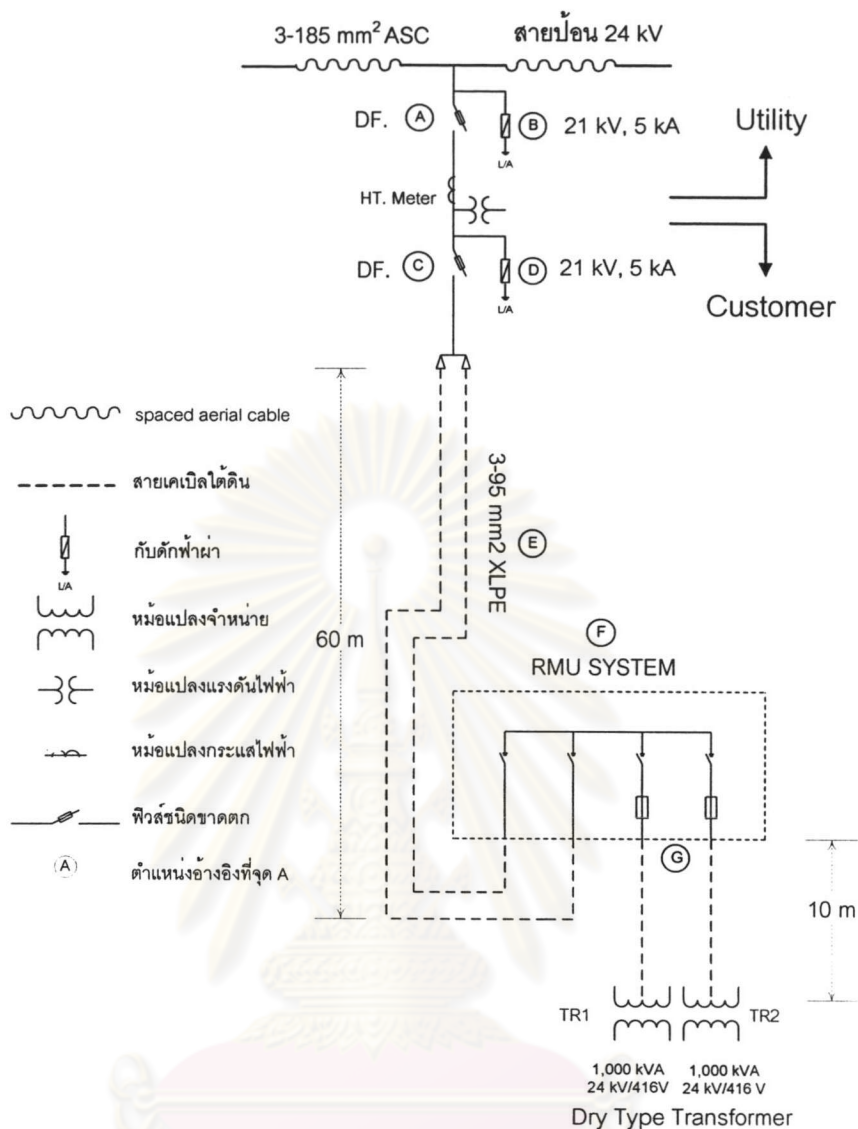
#### 6.1 ปัญหา

บทนี้นำเสนอปัญหาแรงดันเกินจากการทำงานของฟิวส์ชนิดขาดตกหลังจากเกิดการผิดพลาดพร่องลงดิน โดยศึกษาจากตัวอย่างกรณีปัญหาของการไฟฟ้านครหลวงขณะปฏิบัติงานเปลี่ยนฟิวส์ที่ขาดตก หลังจากได้รับแจ้งการผิดพลาดพร่องลงดินเนื่องจากกระรอกซึ่งทำให้ฟิวส์เฟส Y ที่ติดตั้งบนเสาเครื่องวัดแรงสูง (HT. meter) บริเวณหน้าอาคารของผู้ใช้ไฟขาดตก โดยภายหลังจากเปลี่ยน Fuse Link เสร็จเรียบร้อยจึงสับฟิวส์เฟส Y กลับคืน พบว่ากับดักฟ้าผ่าของผู้ใช้ไฟเฟส Y เกิดระเบิดขึ้นทันที ซึ่งเหตุการณ์ในลักษณะเดียวกันนี้ได้เกิดขึ้น 3-4 ครั้งด้วยกัน และบางครั้งหลังจากกับดักฟ้าผ่าเฟส Y ระเบิด พบว่าฟิวส์แรงสูงเฟส Y และ R ได้ขาดตกไปด้วย และเมื่อทำการเปลี่ยน Fuse Link ของทั้งสองเฟสแล้วสับกลับคืน กับดักฟ้าผ่าเฟส R เกิดระเบิดขึ้นเช่นกัน

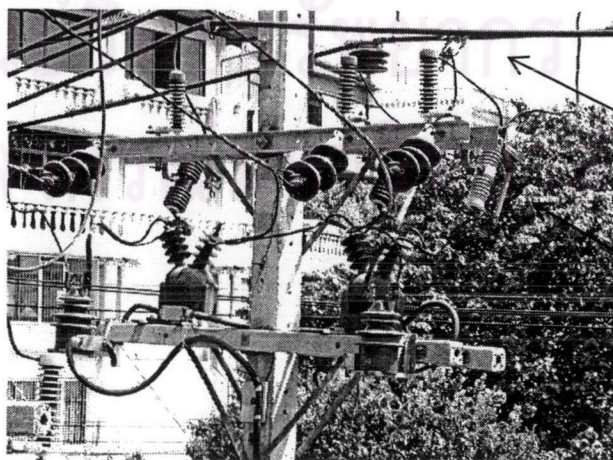
#### 6.1.1 โครงสร้างของระบบ

กรณีศึกษาเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าพิกัดแรงดัน 24 kV รับไฟจากสถานีไฟฟ้าย่อยและจ่ายไฟผ่านสายบ่อนเหนือศีรษะไปยังจุดต่างๆ ให้กับผู้ใช้ไฟ โดยระบบการจ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟซึ่งเป็นอาคารพาณิชย์มีองค์ประกอบของโครงสร้างระบบที่สามารถแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้ ตามรูปที่ 6.1

- 1) ระบบไฟฟ้าของอาคารพาณิชย์รับไฟจากสายบ่อนอากาศผ่านฟิวส์ชนิดขาดตก (Dropout Fuse) ที่ติดตั้งบนเสาเครื่องวัดแรงสูงของ กฟน. ที่จุด A ไปยังเสาไฟแรงสูงของลูกค้ำ และฟิวส์ชนิดขาดตกที่จุด C
- 2) จากเสาไฟแรงสูงของผู้ใช้ไฟต่อเชื่อมไปยังตู้ RMU ภายในตัวอาคารที่จุด F ด้วยสายเคเบิลใต้ดิน 2 วงจร
- 3) ภายใน RMU จะประกอบไปด้วยหม้อแปลงจำหน่ายชนิดแห้ง (Dry Type) ขนาด 1,000 kVA จำนวน 2 ชุด ซึ่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังภาระต่างๆ ภายในตัวอาคาร
- 4) การป้องกันแรงดันเกินมีการติดตั้งกับดักฟ้าขนาด 21 kV, 5 kA บนเสาเครื่องวัดแรงสูงที่จุด B และเสาไฟแรงสูงของลูกค้ำที่จุด D ซึ่งเป็นบริเวณเชื่อมต่อระหว่างสายบ่อนอากาศและสายเคเบิลใต้ดิน

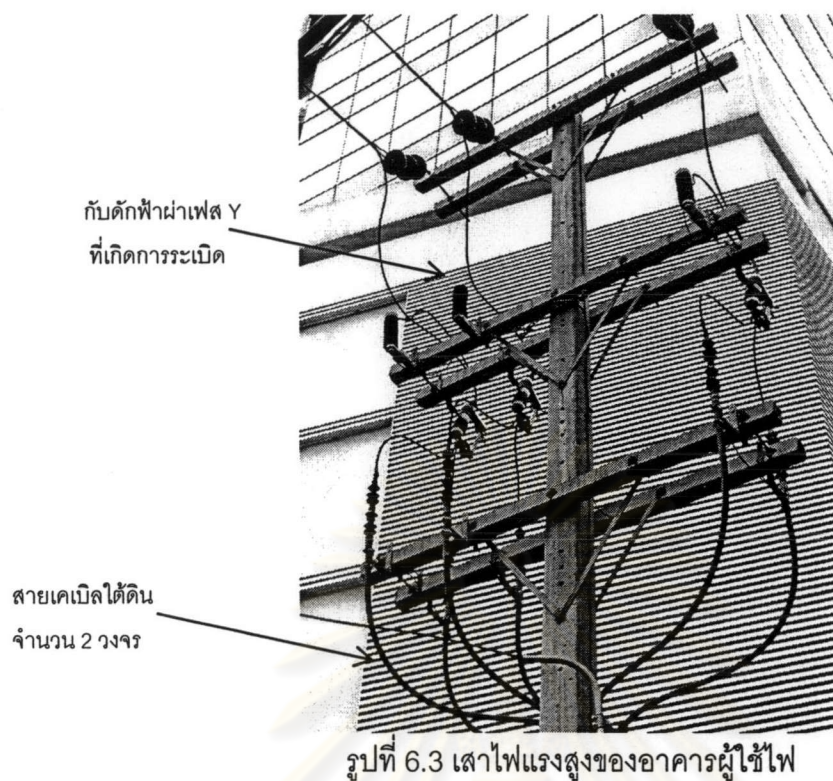


รูปที่ 6.1 แผนภาพเส้นเดียวแสดงระบบจ่ายไฟฟ้าของอาคารพาณิชย์ที่ปฏิบัติงาน

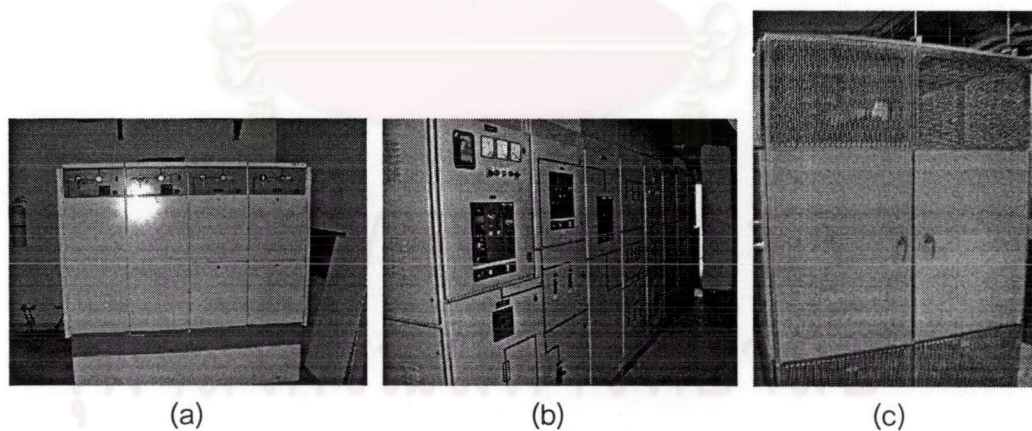


รูปที่ 6.2 เสาค้ำเครื่องวัดแรงสูงที่เกิดการผิดพลาดจากกระบวน  
ที่เป็นเหตุทำให้ฟิวส์แรงสูงเฟส Y ขาดตก





รูปที่ 6.2 และ 6.3 แสดงภาพถ่ายจากสถานที่จริงของเสาเครื่องวัดแรงสูง และเสาไฟแรงสูงของผู้ใช้ไฟตามลำดับ สำหรับรูปที่ 6.4 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบ RMU และตู้ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าหลักภายในอาคารของผู้ใช้ไฟ



- (a) ตู้ Switchgear ของระบบ Ring Main Unit ภายในอาคารของผู้ใช้ไฟ
- (b) ตู้ Main Distribution Board ที่มี CB. ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าให้ภาระต่างๆ ภายในอาคาร
- (c) หม้อแปลงจำหน่ายเรซินแข็งชนิดแห้ง ขนาด 1,000 kVA, 24kV/416V

รูปที่ 6.4

### 6.1.2 ขั้นตอนและเหตุการณ์ขณะปฏิบัติงาน

ภายหลังจากผู้ปฏิบัติงานได้รับแจ้งจากผู้ใช้ไฟซึ่งเป็นอาคารพาณิชย์ และสถานีไฟฟ้าย่อยว่ามีฟิวส์เฟส Y ขาดตก และเซอร์กิตเบรกเกอร์ของสายป้อนตกเกิดขึ้น โดยมีสาเหตุมาจากกระรอกทำให้เกิดการผัดพรัอง จึงเข้าตรวจสอบและเปลี่ยน Fuse Link ในเฟส Y เพื่อจ่ายไฟกลับคืนให้กับผู้ใช้ไฟ โดยมีขั้นตอนในการปฏิบัติงานสับ-ปลดสวิตช์และเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

- 1) ผู้ปฏิบัติงานปลดฟิวส์เฟส Y ที่ขาดตกลงมา และทำการเปลี่ยน Fuse Link ใหม่ ในขณะที่ฟิวส์เฟสอื่นที่เหลือ (R และ B) ยังคงอยู่ในตำแหน่งปิดวงจรอยู่เช่นเดิม
- 2) สับฟิวส์เฟส Y เพื่อจ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟตามปกติ ในสภาวะที่หม้อแปลงทั้ง 2 ตัวของผู้ใช้ไฟไม่มีโหลด เนื่องจากเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านแรงต่ำปลดวงจรออกจากกรที่มีแรงดันไม่ครบเฟส
- 3) หลังจากสับฟิวส์เฟส Y เข้าไป กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ป้องกันสายเคเบิลใต้ดินบนเสาไฟแรงสูงของลูกค้ำ เฟส Y เกิดระเบิดขึ้นทันที และส่งผลทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ต้นทางสายป้อนตกอีกด้วย
- 4) ผู้ปฏิบัติงานตรวจสอบความเสียหายของกับดักฟ้าผ่าเฟส Y ที่ระเบิด โดยปลดฟิวส์ออกทั้ง 3 เฟส และแก้ไขปัญหาในเบื้องต้นด้วยการตัดสายของกับดักฟ้าผ่าเฟส Y ออก
- 5) หลังจากตรวจสอบความเสียหายของระบบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ปฏิบัติงานจึงสับฟิวส์เข้าที่ละเฟส จนครบทั้ง 3 เฟส ซึ่งสามารถจ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟตามปกติ
- 6) หลังจากวันที่เกิดเหตุ ผู้ปฏิบัติงานได้ไปดำเนินการซ่อมแซมและแก้ไขอีกครั้ง โดยทำการดับไฟด้วยการปลด Dropout Fuse ที่เสาเครื่องวัดแรงสูงออกทั้ง 3 เฟส และเปลี่ยนกับดักฟ้าผ่าเฟส Y ของลูกค้ำที่เสียหาย จากนั้นจึงสับฟิวส์ทั้ง 3 เฟส เข้าที่ละเฟสเพื่อจ่ายไฟกลับคืนตามเดิม ซึ่งไม่พบความเสียหายใดๆ เกิดขึ้นหลังจากที่สับฟิวส์เข้าครบทั้ง 3 เฟส



### 6.1.3 ความเสียหายของกัปกัดฟ้าผ่า

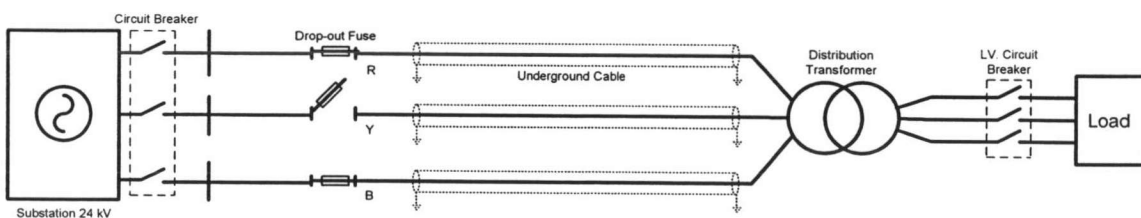
กัปกัดฟ้าผ่าเฟส Y ได้รับความเสียหายอย่างรุนแรงจากการระเบิดด้วยความร้อนสูงจากภายใน ดังแสดงในรูปที่ 6.5 จะเห็นได้ว่าการฉีกและแตกออกของเปลือกโพลีเมอร์ทำให้เห็นเนื้อของ ZnO ที่ถูกเผาไหม้อย่างชัดเจน แรงระเบิดยังทำให้ฝาครอบและส่วนหัวต่อสายลงดินแตกหลุดออกมา นอกจากนั้นยังพบคราบเขม่าที่ผิวของเปลือกโพลีเมอร์เป็นจำนวนมาก



รูปที่ 6.5 กัปกัดฟ้าผ่าเฟส Y บนเสาไฟแรงสูงของผู้ใช้ไฟภายหลังเกิดการระเบิดขึ้น

### 6.2 การจำลองด้วยโปรแกรม EMTP

การจำลองจะพิจารณาขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์ต้นทางสายป้อนสับกลับ (reclose) หลังจากเกิดการผิดพลาดลงดินบนเสาเครื่องวัดแรงสูง ซึ่งทำให้ฟิวส์เฟส Y ขาดตก เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำของผู้ใช้ไฟทริปเนื่องจากแรงดันมาไม่ครบเฟส และเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้นทางสายป้อนทริป รูปที่ 6.6 แสดงแผนภาพอย่างง่ายขณะฟิวส์เฟส Y ขาดตก โดยคาดว่า การขาดตกของฟิวส์เพียงเฟสเดียวในวงจรซึ่งจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงจำหน่ายผ่านสายเคเบิลใต้ดิน อาจทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วคราวจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่สายเคเบิลใต้ดินเฟสที่เปิดวงจร จึงส่งผลให้กับกัปกัดฟ้าผ่าทำงานและได้รับความเสียหาย



รูปที่ 6.6 แผนภาพอย่างง่ายแสดงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น

### 6.2.1 แบบจำลองของกรณีศึกษา

จากแผนภาพของกรณีศึกษาในรูปที่ 6.1 และภาคผนวก ค.1 สามารถจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ได้ดังรูปที่ 6.7 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

#### 6.2.1-1 วงจรสมมูลของแหล่งจ่าย

ใช้แหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ 3 เฟส ขนาด 24 kV<sub>rms</sub>(L-L) ต่อกับอิมพีแดนซ์ลัดวงจรซึ่งขนานกับอิมพีแดนซ์เสิร์จรวมของสายป้อนอื่นที่ต่ออยู่ในบัสเดียวกัน โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- 1) อิมพีแดนซ์ลัดวงจร ที่ระดับแรงดัน 24 kV, 100 MVA (Z<sub>th</sub>)

$$R_{1,2} = 0.294336 \ \Omega \text{ และ } L_{1,2} = 6.893 \text{ mH}$$

$$R_0 = 0.029376 \ \Omega \text{ และ } L_0 = 6.0924 \text{ mH}$$

- 3) อิมพีแดนซ์เสิร์จรวม (Z<sub>s</sub>) ของสายเคเบิลใต้ดินอื่นที่ต่ออยู่ในบัสเดียวกัน จำนวน 2 สาย มีค่าประมาณ 13.145  $\Omega$  (Z<sub>s</sub> = 26.29  $\Omega$  /เส้น)

#### 6.2.1-2 สายป้อนเหนือศีรษะและสายเคเบิลใต้ดิน

วงจรสายป้อนประกอบด้วยสายป้อนเหนือศีรษะขนาด 185 mm<sup>2</sup> และสายเคเบิลใต้ดินขนาด 70, 95 และ 400 mm<sup>2</sup> ซึ่งแทนด้วยแบบจำลองสายส่งชนิด PI โดยมีข้อมูลและพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก ค.3 และ ค.4

#### 6.2.1-3 หม้อแปลงจำหน่าย

หม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1,000 kVA 24kV/416 V แทนด้วยแบบจำลองหม้อแปลงทั่วไป (SatTrafo) กับตัวเหนี่ยวนำไม่เชิงเส้นชนิดฮิสเทอรีซิสต่อภายนอก สำหรับข้อมูลและคุณลักษณะต่างๆ ของหม้อแปลงแสดงอยู่ในภาคผนวก ค.5

#### 6.2.1-4 กักดับฟ้าผ่า

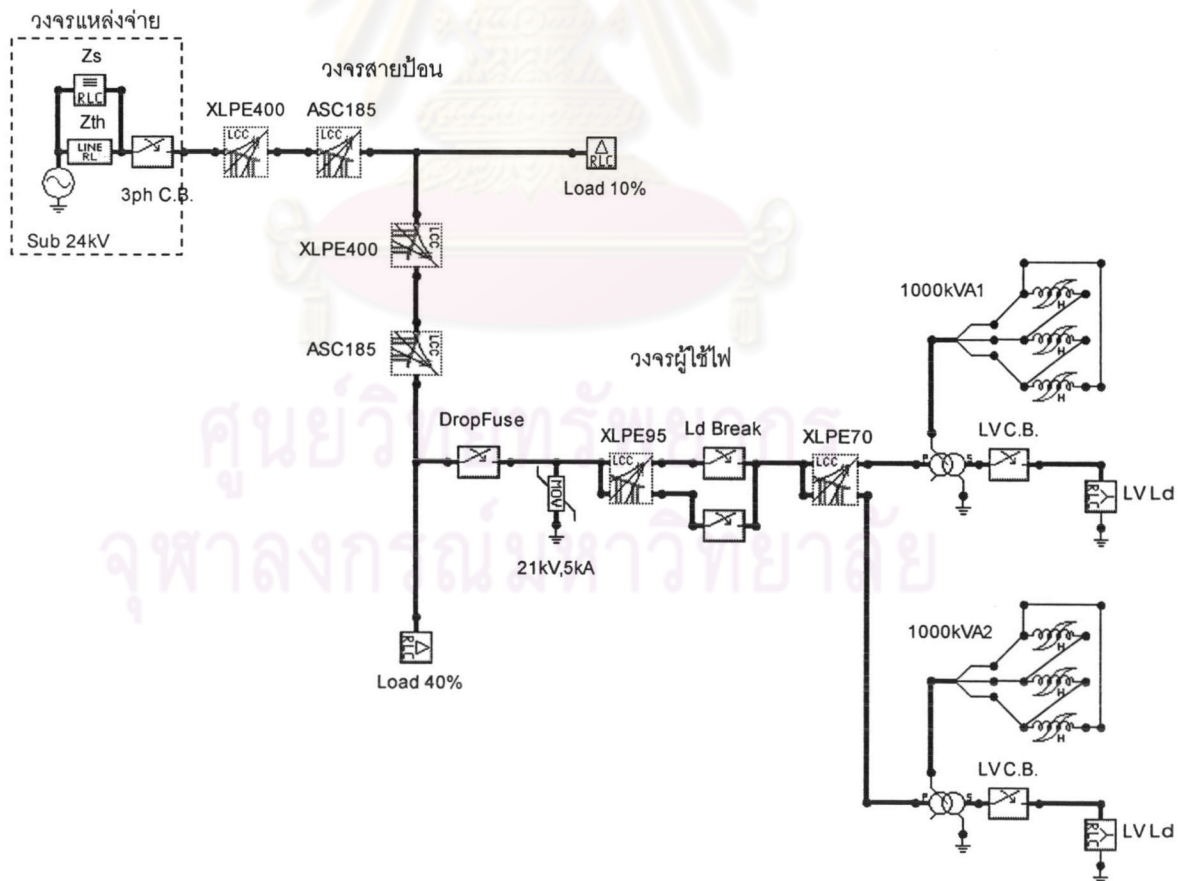
กักดับฟ้าผ่าขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA แบบติดตั้งในระบบจำหน่าย ชนิดโพลีเมอร์ แทนด้วยตัวต้านทานไม่เชิงเส้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล สำหรับข้อมูลต่างๆ และกราฟคุณลักษณะไม่เชิงเส้นของกักดับฟ้าผ่าแสดงอยู่ในภาคผนวก ค.6

6.2.1-5 โหลด

โหลดด้านแรงสูงของวงจรสายป้อนแบ่งออกเป็นสองส่วน และแทนด้วยโหลดเชิงเส้นแบบก้อน (lumped Load) 3 เฟส ต่อแบบเดลต้า โดยมีขนาดประมาณ 10% และ 40% ของกระแสโหลดสูงสุดของสายป้อน (400 A) ที่พิกัดแรงดัน 24 kV, 0.9 p.f. lagging โดยมีค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 6.1 สำหรับโหลดด้านแรงต่ำของหม้อแปลงจะแทนด้วยโหลดเชิงเส้นแบบก้อน 3 เฟส เช่นเดียวกัน แต่มีการต่อเป็นแบบวายลงดิน

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของโหลดในสายป้อน

% Load	Resistance ( $\Omega$ )	Inductance (mH)
10	935.308	1,442.000
40	233.827	360.478



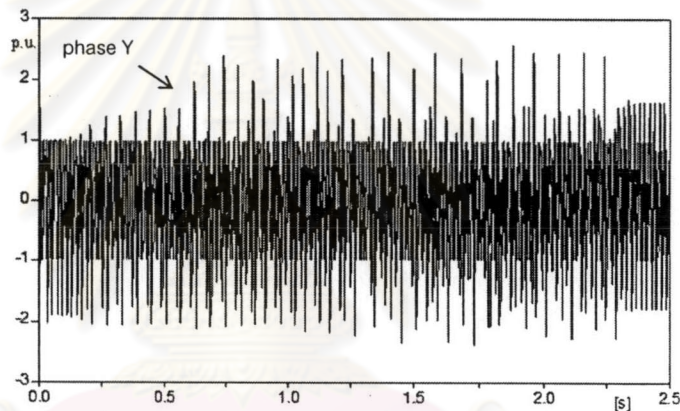
รูปที่ 6.7 แบบจำลองโปรแกรม ATP/EMTP ของกรณีศึกษา



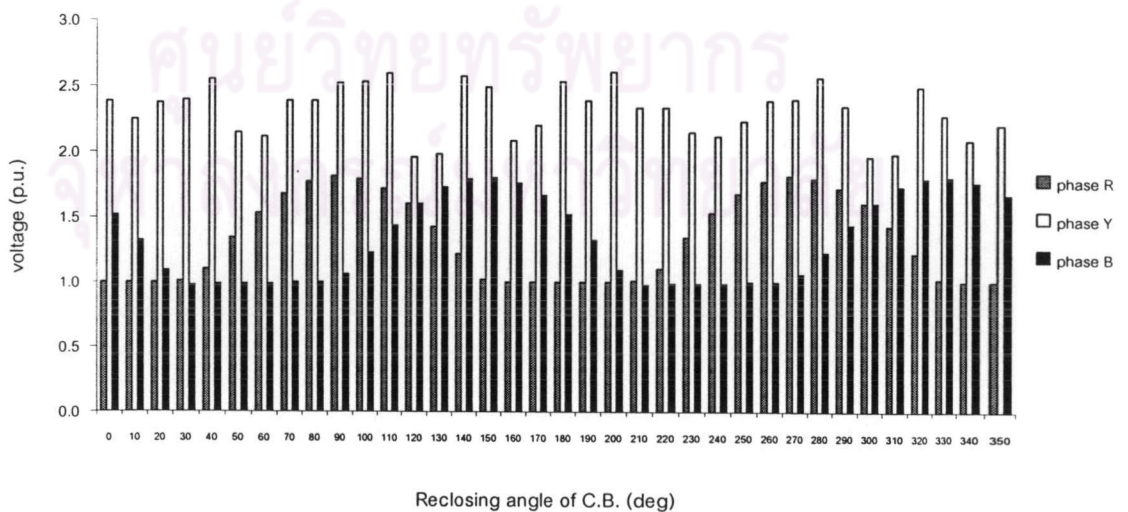
6.2.2 ผลการจำลอง

6.2.2-1 กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

ผลการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า ภายหลังจากสับกลับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้นทางสายป้อน ในสภาวะที่แรงดันและฟลักซ์คงค้างในสายเคเบิลใต้ดินและแกนเหล็กของหม้อแปลงเป็นศูนย์ และสายป้อนมีโหลดประมาณ 50% ที่พิกัดแรงดัน 24 kV พบว่าเกิดแรงดันเกินชั่วคราวที่สายเคเบิลใต้ดินเฟส Y ซึ่งเป็นเฟสที่ฟิวส์ขาดตก ดังแสดงในรูปที่ 6.8 ลักษณะรูปคลื่นในช่วงประมาณ 2-5 วินาทีแรกอาจมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและไม่เป็นฟังก์ชันคาบเวลา แต่ที่สภาวะคงตัวจะเป็นฟังก์ชันคาบเวลาที่มีความถี่เท่ากับความถี่กำลังไฟฟ้า และมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ (fundamental mode)



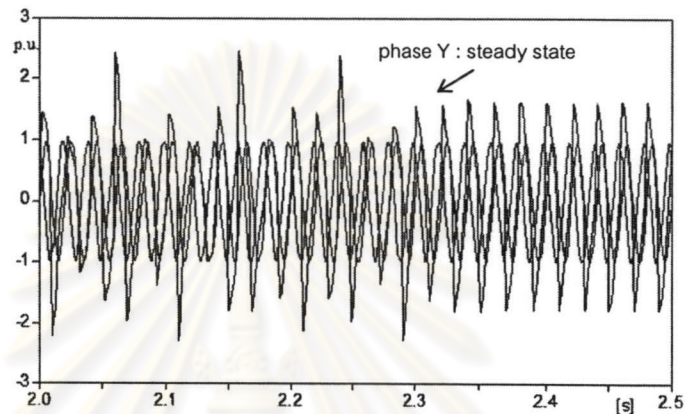
รูปที่ 6.8 รูปคลื่นแรงดันเฟสที่สายเคเบิลใต้ดินขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์สับกลับที่มุม  $90^\circ$  ของเฟส R



รูปที่ 6.9 ผลของมุมในการสับเซอร์กิตเบรกเกอร์กับแรงดันเกินสูงสุดเฟส Y

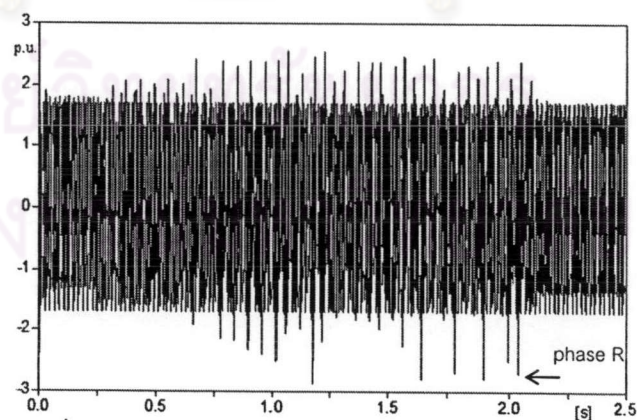


ในช่วงแรกเป็นช่วงที่มีการแกว่งของแรงดันซึ่งอาจทำให้ค่ายอดของแรงดันเกินสูงสุดเท่ากับ 2.60 p.u. ขึ้นอยู่กับมุมในการสับดังแสดงในรูปที่ 6.9 และจะเห็นว่าแรงดันเกินชั่วคราวสามารถเกิดขึ้นได้ทุกๆ มุมที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ดับทางสับกลับ สำหรับรูปที่ 6.10 แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะกำลังเข้าสู่สภาวะคงตัวซึ่งมีค่ายอดของแรงดันเฟส Y สูงสุดประมาณ 1.72 p.u.



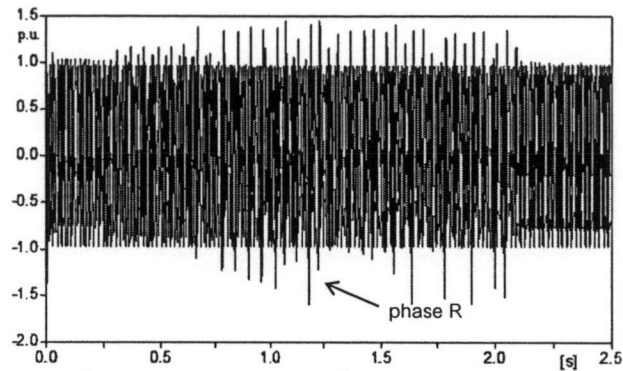
รูปที่ 6.10 แรงดันที่สายเคเบิลใต้ดินเฟส Y ขณะเข้าสู่สภาวะคงตัว

สำหรับแรงดันตกคร่อมขดลวดและแรงดันต้านแรงต่ำของหม้อแปลงพบว่า จะเกิดแรงดันเกินช่วงแรกในเฟส R ขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.60 เท่าของพิกัดค่ายอดแรงดันขดลวด ตามลำดับ และมีค่าไม่เกิน 1.0 เท่า ภายหลังแรงดันเข้าสู่สภาวะคงตัวดังแสดงในรูปที่ 6.11 และ 6.12



รูปที่ 6.11 แรงดันตกคร่อมขดลวดของหม้อแปลงขณะ

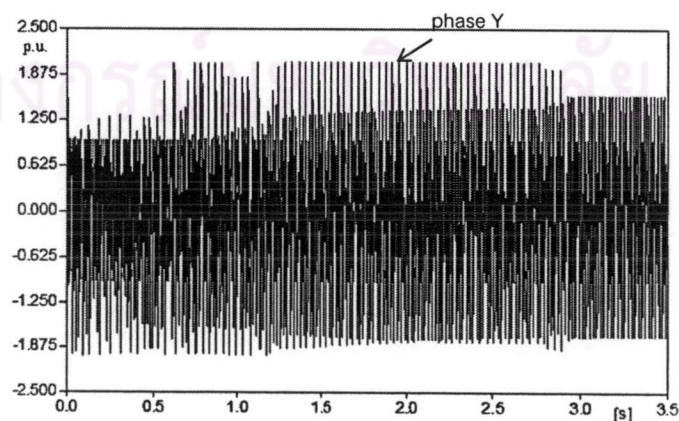
เซอร์กิตเบรกเกอร์สับกลับที่มุม  $90^\circ$  ของเฟส R



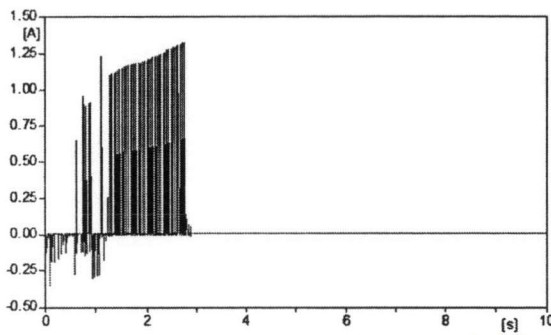
รูปที่ 6.12 แรงดันด้านแรงต่ำของหม้อแปลงขณะ  
เซอร์กิตเบรกเกอร์สับกลับที่มุม  $90^\circ$  ของเฟส R

#### 6.2.2-1 กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

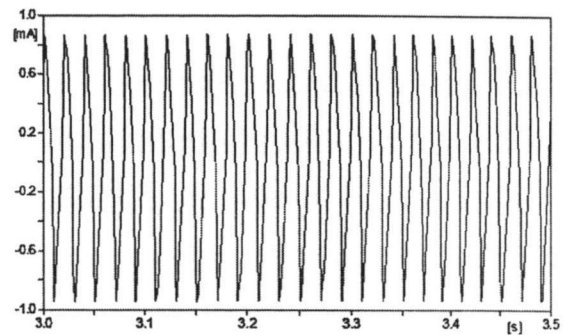
การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าทำให้ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเกินที่สายเคเบิลใต้ดินเปลี่ยนแปลงไปบ้าง และยังคงเป็นฟังก์ชันคาบเวลาที่ความถี่กำลังไฟฟ้า 50 Hz ที่สภาวะคงตัว เนื่องจากขนาดของแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเกินกว่าค่าพิกัดแรงดันทำงานต่อเนื่อง สูงสุด (MCOV) ของกับดักฟ้าผ่า ทำให้กับดักฟ้าผ่านำกระแสและจำกัดขนาดค่ายอดสูงสุดไว้ที่ประมาณ 2.0 และ 1.65 p.u. ในช่วงแรกและสภาวะคงตัวตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า รูปที่ 6.13 และ 6.14 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าที่ติดตั้งที่ต้นทางสายเคเบิลใต้ดินเฟส Y มีค่าสูงสุดของกระแสในช่วงแรกประมาณ 1.32 A แต่ที่สภาวะคงตัวขนาดค่ายอดของกระแสลดลงเหลือ 0.89 mA โดยมีขนาดของแรงดันเกิน 1.65 p.u. ซึ่งสูงเกินกว่า MCOV ของกับดักแรงดันเกินประมาณ 1.34 เท่า



รูปที่ 6.13 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าเฟส Y  
ขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์สับกลับที่มุม  $90^\circ$  ของเฟส R



(a) กระแสไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าเฟส Y

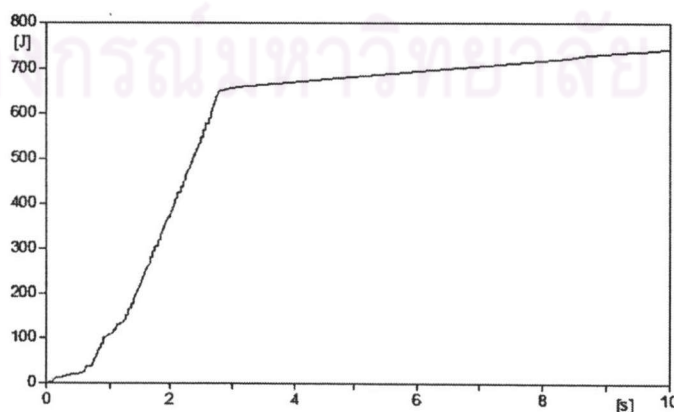


(b) กระแสไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าเฟส Y

ที่สภาวะคงตัว (steady state)

รูปที่ 6.14 รูปคลื่นกระแสไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าเฟส Y  
ขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์สับกลับที่มุม  $90^\circ$  ของเฟส R

จากรูปที่ 6.13 และ 6.14 เห็นได้ชัดเจนว่าภายหลังการสับกลับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ต้นทางพบว่าเกิดแรงดันเกินชั่วคราวขึ้นที่สายเคเบิลใต้ดินเฟส Y ซึ่งเปิดวงจรรออยู่ โดยในช่วงแรกขนาดของแรงดันเกินมีค่าสูงและลดลงในสภาวะคงตัว ซึ่งทำให้กับดักฟ้าผ่าทำงานรับพลังงานที่เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่สูงในช่วงแรกและลดลงในเวลาต่อมา ดังแสดงในรูปที่ 6.15 พลังงานส่วนนี้ทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในตัวกับดักฟ้าผ่า กับดักฟ้าผ่าสามารถรับพลังงานได้ในช่วงระยะเวลาเพียงสั้นๆ ดังนั้นหากขนาดแรงดันสูงเกินกว่าพิกัด MCOV ของกับดักแรงดันเกินเป็นระยะเวลานานจะทำให้เกิดการสะสมความร้อนขึ้นภายในตัวกับดักฟ้าผ่าจนกระทั่งกับดักฟ้าผ่าสูญเสียสภาพในที่สุด

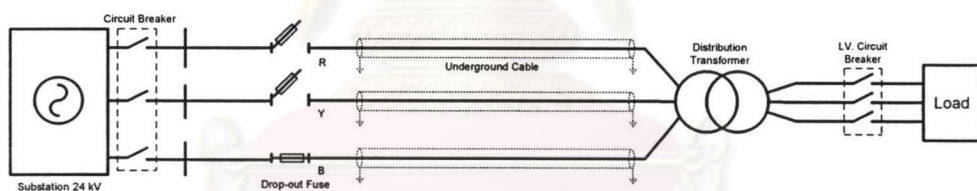


รูปที่ 6.15 พลังงานของกับดักฟ้าผ่าเฟส Y เพิ่มขึ้นจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้น



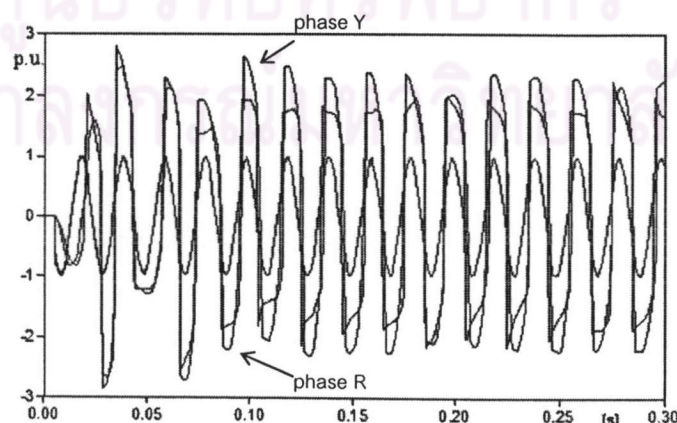
ดังนั้นกรณีนี้หากปล่อยให้ฟิวส์ขาดตกเป็นเวลานานก็อาจทำให้กับดักฟ้าผ่าได้รับความเสียหาย แต่จะไม่เกิดการระเบิดขึ้นในทันทีเนื่องจากแรงดันเกินเพอร์โรวเรโซแนนซ์เป็นแหล่งจ่ายแรงดันชนิดอิมพีแดนซ์สูง (weakness source) ไม่สามารถจ่ายกระแสได้สูงถึงแม้กับดักฟ้าผ่าจะสูญเสียสภาพไปแล้ว จนกว่าจะมีการเปลี่ยนฟิวส์และสับกลับคืน ซึ่งทำให้กับดักฟ้าผ่าได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟโดยตรง (stiff source) ที่สามารถจ่ายกระแสค่าสูงได้และทำให้ความร้อนภายในของกับดักฟ้าผ่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้ จึงเกิดการระเบิดขึ้นอย่างรุนแรง

จากข้อมูลการปฏิบัติงานบางครั้งพบว่า ผลจากการระเบิดของกับดักฟ้าผ่าเฟส Y ทำให้ฟิวส์เฟส Y และ R ตก ดังแสดงในรูปที่ 6.16 และเมื่อเปลี่ยนฟิวส์ทั้งสองเฟสแล้วสับฟิวส์เฟส Y และ R ตามลำดับ กับดักฟ้าผ่าเฟส R เกิดระเบิดขึ้นทันทีอีกหนึ่งเฟส โดยจากผลการจำลองดังรูปที่ 6.17 พบว่าขณะที่ฟิวส์ทั้งสองเฟสขาดตกจะเกิดแรงดันเกินชั่วคราวที่สายเคเบิลใต้ดินทั้งสองเฟส ซึ่งทำให้กับดักฟ้าผ่าเฟส R นั้น ต้องรับแรงดันเกินด้วยจึงเป็นผลให้เกิดระเบิดขึ้นในที่สุด หลังจากสับฟิวส์ทั้งสองเฟสเพื่อจ่ายไฟกลับคืน



รูปที่ 6.16 ฟิวส์เฟส R และ Y ตกจากการระเบิด

ของกับดักฟ้าผ่าเฟส Y ขณะสับฟิวส์เฟส Y กลับคืน



รูปที่ 6.17 รูปคลื่นแรงดันขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์สับกลับที่มุม  $90^\circ$  ของเฟส R

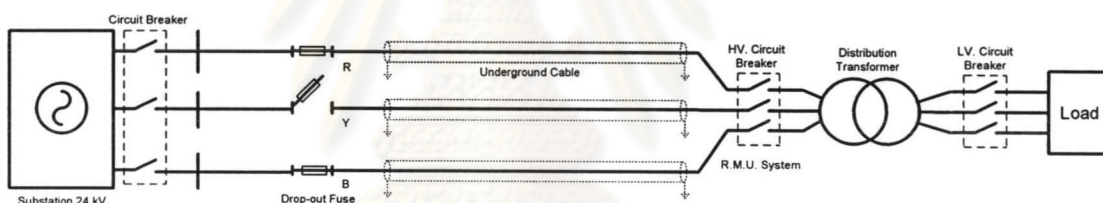
กรณีฟิวส์เฟส R และ Y ขาดตกหลังจากกับดักฟ้าผ่าเฟส Y ระเบิด

### 6.3 การแก้ปัญหา

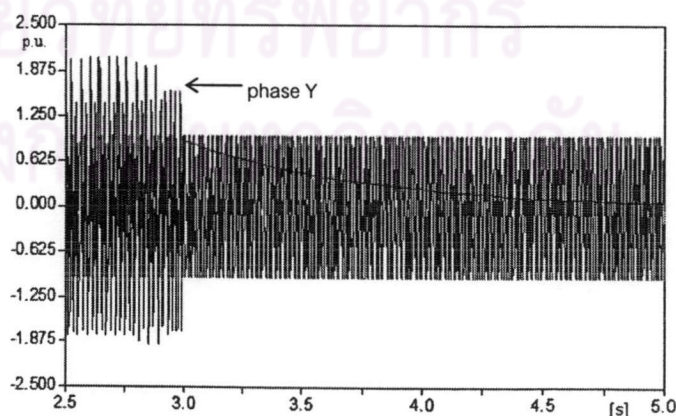
การแก้ปัญหาแรงดันเกินจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นภายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งมีสาเหตุมาจากการขาดตกของฟิวส์ขณะเกิดการผิดพลาดหนึ่งหรือสองเฟส สามารถปฏิบัติได้ตามวิธีต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 6.3.1 หลีกเลี่ยงการทำให้เกิดโครงสร้างของวงจรเฟอร์โรเรโซแนนซ์

- 1) ภายหลังจากฟิวส์หนึ่งหรือสองเฟสขาดตกจากการผิดพลาดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ให้ปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์หรือโหลดเบรกสวิตช์ด้านแรงสูงของชุด RMU ออกดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6.18 ซึ่งเป็นการแยกวงจรหม้อแปลงจำหน่ายและสายเคเบิลใต้ดินออกจากกัน จึงทำให้ระบบมีโครงสร้างที่ไม่เอื้อให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ รูปที่ 6.19 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าขณะมีการปลดโหลดเบรกด้านแรงสูงออกในสภาวะที่ฟิวส์เฟส Y ขาดตกและเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้นทางอยู่ในตำแหน่งดับ

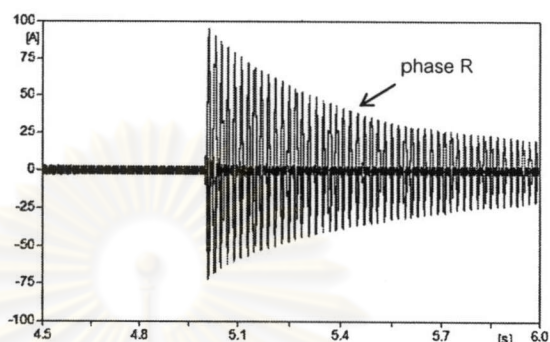


รูปที่ 6.18 ตัวอย่างแสดงการปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์หรือโหลดเบรกสวิตช์ด้านแรงสูงออก เพื่อแยกวงจรระหว่างหม้อแปลงและสายเคเบิลใต้ดินออกจากกัน



รูปที่ 6.19 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าขณะปลดโหลดเบรกสวิตช์ด้านแรงสูงออก

โดยหลังจากเปลี่ยน Fuse Link และสับฟิวส์เฟสที่ขาดตกกลับคืนแล้ว ค่อยสับโหลดเบรกสวิตช์สามเฟสจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงตามปกติ ซึ่งควรพิจารณาเลือกขนาดของฟิวส์แรงสูงให้เพียงพอกับค่ากระแสพุ่งเข้าที่อาจเกิดขึ้น สูงขณะสับโหลดเบรกกลับคืนดังระบบดังแสดงในรูปที่ 6.20

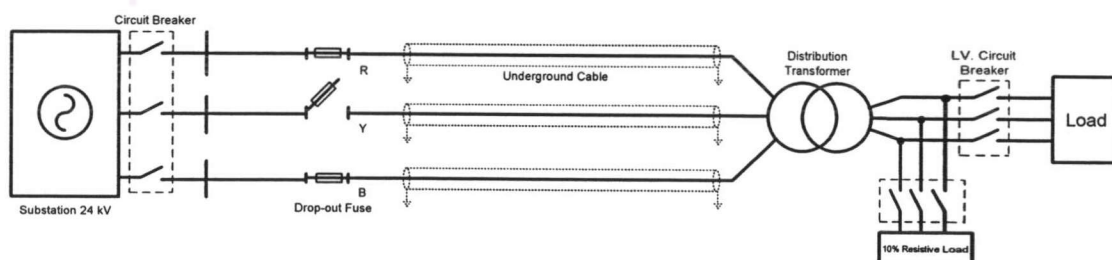


รูปที่ 6.20 กระแสพุ่งเข้าขณะสับโหลดเบรกสวิตช์จ่ายไฟกลับคืนให้หม้อแปลง

- 2) ใช้สวิตช์ชนิดสับ-ปลดพร้อมกันทั้งสามเฟส เช่น โหลดเบรกสวิตช์ หรือรีโคลสเซอร์แทนการใช้ฟิวส์ชนิดขาดทีละเฟส ในบริเวณที่สำคัญและมีความเสี่ยงในการเกิดผิดพ่วงบ่อยครั้ง หรืออาจออกแบบให้ฟิวส์ขาดตกพร้อมกันทั้งสามเฟสทันทีที่เฟสใดเฟสหนึ่งเกิดการผิดพ่วง

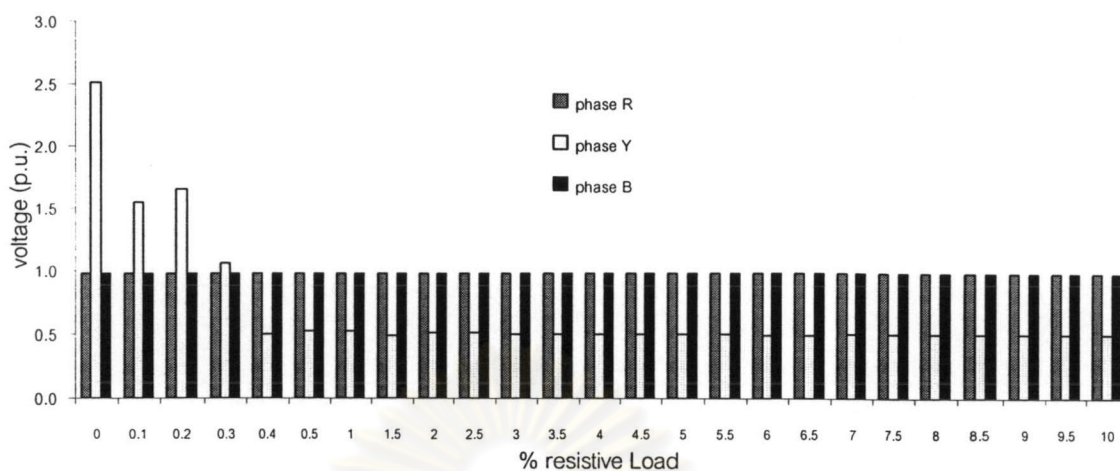
### 6.3.2 การต่อโหลดความต้านทานด้านแรงต่ำ

การต่อโหลดด้านความต้านทานเป็นการควบคุมให้วงจรมีจุดทำงานที่ไม่เกิดแรงดันเกินเฟลโรว์เรโซแนนซ์ โดยต่อโหลดความต้านทานด้านแรงต่ำของหม้อแปลงขนาดไม่ต่ำกว่า 5% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง และโดยปกติจะแนะนำให้ใช้ประมาณ 10% การนำไปใช้ในทางปฏิบัติสามารถต่อโหลดความต้านทานภายนอกด้านแรงต่ำของหม้อแปลงทันทีที่เกิดการผิดพ่วงและทำให้ฟิวส์แรงสูงขาดตกไม่ครบเฟส ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6.21



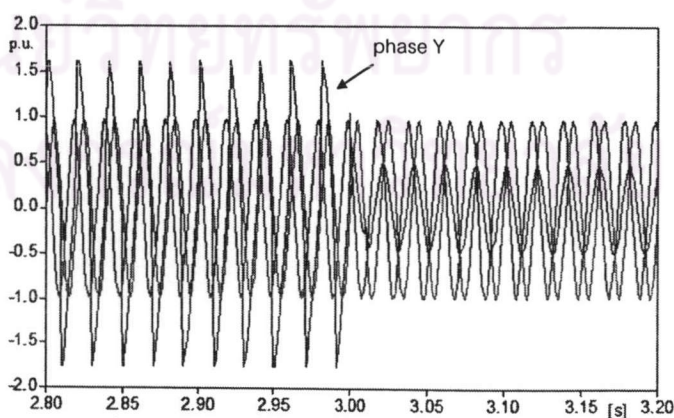
รูปที่ 6.21 ตัวอย่างแสดงการต่อโหลดความต้านทานภายนอกด้านแรงต่ำของหม้อแปลง





รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ของขนาดโหลดความต้านทานด้านแรงต่ำกับขนาดของแรงดันที่สายเคเบิลใต้ดินขณะฟิวส์เฟส Y เปิดวงจร

รูปที่ 6.22 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดของโหลดความต้านทานด้านแรงต่ำกับขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้น กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขณะเกิดการผิดพลาดทำให้ฟิวส์เฟส Y ขาดตก โดยกรณีปัญหานี้สามารถต่อโหลดความต้านทานขนาดเพียง 0.4% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงก็เพียงพอที่จะไม่เกิดแรงดันเกินชั่วคราวขึ้นในเฟส Y ที่ฟิวส์ขาดตก รูปที่ 6.23 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่สายเคเบิลใต้ดินกรณีต่อโหลดความต้านทานขนาด 10% ซึ่งเป็นขนาดที่แนะนำให้ใช้ทั่วไป และเมื่อทำการเปลี่ยน fuse link และสับฟิวส์เฟส Y กลับคืนเรียบร้อยแล้วก็สามารถปลดโหลดความต้านทานออกได้และสับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำเพื่อจ่ายไฟให้กับโหลดได้ตามปกติ



รูปที่ 6.23 รูปคลื่นแรงดันที่สายเคเบิลใต้ดินขณะต่อโหลดความต้านทานด้านแรงต่ำขนาด 10% ในสถานะที่ฟิวส์เฟส Y เปิดวงจรอยู่