

การศึกษาแรงดันเกินจากการสับปลดสวิตช์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า



นายเกรียงไกร พัฒนภักดี

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1082-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF OVERVOLTAGES DUE TO SWITCHING OPERATIONS
IN DISTRIBUTION SYSTEMS



Mr.Kriangkrai Pattanakdee

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2004


ISBN 974-53-1082-4


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาแรงดันเกินจากการสับปลดสวิตช์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
โดย นายเกรียงไกร พัฒนภักดี
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล

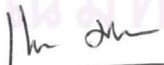
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัตน์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

เกรียงไกร พัฒนภักดี : การศึกษาแรงดันเกินจากการสับปลดสวิตช์ในระบบจำหน่าย
ไฟฟ้า. (A STUDY OF OVERVOLTAGES DUE TO SWITCHING OPERATIONS IN
DISTRIBUTION SYSTEMS). อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล
133 หน้า. ISBN 974-53-1082-4.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาแรงดันเกินจากการสับปลดสวิตช์ในระบบจำหน่าย
ไฟฟ้า ที่เป็นสาเหตุทำให้กับดักฟ้าผ่าได้รับความเสียหาย โดยศึกษาจากกรณีปัญหาที่เกิดขึ้นจริง
ขณะสับปลดสวิตช์ที่ติดตั้งในสายป้อนระดับแรงดัน 12 และ 24 kV วิธีการศึกษาใช้การจำลอง
เหตุการณ์ และวิเคราะห์ผลของปัจจัยต่างๆ ด้วยโปรแกรม ATP/EMTP และมีการทดสอบ
ภาคสนามเพื่อหาสาเหตุของปัญหา และใช้ตรวจสอบความถูกต้องของการจำลอง ในบางกรณีที่
สามารถกระทำได้

ผลการศึกษาพบว่า การสับปลดสวิตช์ใบมีด ฟิวส์ชนิดขาดตก หรือการขาดตกของฟิวส์
ที่มีลักษณะการสับปลดไม่พร้อมกันทั้งสามเฟส ในระบบที่ประกอบด้วยสายเคเบิลใต้ดินและ
หม้อแปลงจำหน่าย และมีภาวะและพารามิเตอร์ที่พอเหมาะ จะทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วคราวจาก
ปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งเป็นต้นเหตุทำให้กับดักฟ้าผ่าทำงานและได้รับความเสียหาย
จากการสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อน

สำหรับวิธีการแก้ไข และลดทอนปัญหาแรงดันเกินจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์
ได้นำเสนอแนวทางที่สามารถนำไปใช้ได้ทางปฏิบัติ เช่น การเปลี่ยนลำดับขั้นตอนการสับปลด
สวิตช์ การต่อโหลดความต้านทานขนาด 10% ด้านแรงต่ำของหม้อแปลง เป็นต้น พร้อมกับ
แสดงผลการแก้ไขปัญหาจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP และการทดสอบภาคสนาม

ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา..... 2547.....

4570224321 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : OVERVOLTAGE /FERRORESONANCE/ DISTRIBUTION SYSTEM / EMTP

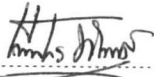
KRIANGKRAI PATTANAPAKDEE : A STUDY OF OVERVOLTAGES DUE TO SWITCHING OPERATIONS IN DISTRIBUTION SYSTEMS. THESIS ADVISOR : CHANNARONG BALMONGKOL, Dr.Sc.Techn. 133 pp. ISBN 974-53-1082-4.

This thesis presents a study of overvoltages associated with switching operations in distribution systems. Practical cases of arrester failures during the switching operations in 12 kV and 24 kV feeders were investigated using ATP/EMTP to simulate and analyze the causes and the related system parameters. Field tests were also conducted to identify a case and ensure the simulation results.

It was found that the phase-by-phase switching of disconnectors or drop-out fuses, as well as the blow-out of fuse, in the system having underground cables and a distribution transformer under specific conditions, may cause ferroresonance temporary overvoltages which make surge arresters operate and be damaged due to the thermal runaway.

Several countermeasures against the above problems, such as changing the procedures of switching operation or applying a resistive load of 10% of transformer power rating, were considered. The results of some countermeasures were confirmed using both the simulations with ATP/EMTP program and the field tests.

DepartmentElectrical Engineering.....
Field of studyElectrical Engineering.....
Academic year2004.....

Student's signature 

Advisor's signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจาก อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางการศึกษาวิจัย และ แก่ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ และอาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ ที่ช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์และ ยังให้ข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์กับวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณ คุณจรินทร์ หาลาภี และคุณฐิติพงษ์ อินทรสินธุ์ จากกองวิจัยการไฟฟ้า นครหลวง และพนักงานการไฟฟ้านครหลวงทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลและการ ทดสอบภาคสนาม

ขอขอบคุณ บริษัทผลิตหม้อแปลงเอกรัฐ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลของหม้อแปลง

ขอขอบคุณ บริษัท J. PRESS และ โรงพยาบาลวิภาวดี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล

ขอขอบคุณ คุณพีรวุฒิ ยุทธโกวิท และคุณถาวร เอื้อดี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการไป ตรวจวัดภาคสนาม และให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่านที่อยู่ใน ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง และท่านอื่นๆ ที่ ไม่ได้กล่าวถึง ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบคุณครูปาอาจารย์ และบิดา มารดา ที่อบรมสั่งสอนให้วิชาความรู้ และกำลังใจ จนข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป	1
1.2 ที่มาของปัญหา	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. ปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์	5
2.1 บทนำทั่วไป	5
2.2 ปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์	6
2.2.1 การเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์	6
2.2.2 ชนิดของรูปแบบสภาวะเฟอร์โรเรโซแนนซ์	14
2.2.3 ความไวต่อพารามิเตอร์ในระบบ	16
2.2.4 ความไวต่อเงื่อนไขขณะเริ่มต้น.....	18
2.3 การเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	19
2.4 ลักษณะบ่งชี้ขณะเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์	21
2.5 วิธีแก้ไขและลดทอนปัญหา	22
2.5.1 หลีกเลี่ยงการทำให้เกิดโครงสร้างของวงจรเรโซแนนซ์	22
2.5.2 การควบคุมหรือหน่วงวงจรด้วยตัวต้านทาน	23
3. กัมดักฟ้าผ่าและความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วคราว	24

บทที่	หน้า
3.1 บทนำทั่วไป	24
3.2 กับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะ.....	25
3.3 ความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วคราวของกับดักฟ้าผ่า	28
4. แรงดันเกินจากการสับ-ปลดสวิตช์ใบมีดในสายป้อน	34
4.1 ปัญหา.....	34
4.1.1 โครงสร้างของระบบ	34
4.1.2 ขั้นตอนและเหตุการณ์ขณะปฏิบัติงาน.....	36
4.1.3 ความเสียหายของกับดักฟ้าผ่า	40
4.2 การทดสอบภาคสนาม.....	41
4.2.1 การวัดรูปคลื่นแรงดัน	41
4.2.2 ลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติงานทดสอบภาคสนาม.....	44
4.2.3 ผลการวัดรูปคลื่นแรงดัน.....	48
4.2.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบภาคสนาม	54
4.3 การจำลองด้วยโปรแกรม EMTP.....	55
4.3.1 แบบจำลองของกรณีศึกษา	57
4.3.2 ผลการจำลองกรณีไม่ติดกับดักฟ้าผ่า	62
4.3.3 ผลของปัจจัยต่างๆ	68
4.3.4 ผลการจำลองกรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	72
4.4 การแก้ปัญหา.....	76
4.4.1 การเปลี่ยนแปลงลำดับการสับ-ปลดสวิตช์	76
4.4.2 การต่อโหลดความต้านทานแรงต่ำ	79
5. แรงดันเกินจากการสับ-ปลดฟิวส์ชนิดขาดตก	82
5.1 ปัญหา.....	82
5.1.1 โครงสร้างของระบบ	82
5.1.2 ขั้นตอนและเหตุการณ์ขณะปฏิบัติงาน.....	84
5.1.3 ความเสียหายของกับดักฟ้าผ่า.....	84
5.2 การจำลองด้วยโปรแกรม EMTP	85
5.2.1 แบบจำลองของกรณีศึกษา	86

บทที่	หน้า
5.2.2 ผลการจำลอง	88
5.3 การแก้ปัญหา.....	94
5.3.1 หลีกเลี่ยงการทำให้เกิดโครงสร้างของวงจรถ่วงเฟอโรเรโซแนนซ์.....	94
5.3.2 การต่อโหลดความต้านทานแรงต่ำ	96
6. แรงดันเกินจากการทำงานของฟิวส์ชนิดขาดตก	98
6.1 ปัญหา.....	98
6.1.1 โครงสร้างของระบบ	98
6.1.2 ขั้นตอนและเหตุการณ์ขณะปฏิบัติงาน.....	101
6.1.3 ความเสียหายของกับดักฟ้าผ่า	102
6.2 การจำลองด้วยโปรแกรม EMTP	102
6.2.1 แบบจำลองของกรณีศึกษา	103
6.2.2 ผลการจำลอง	105
6.3 การแก้ปัญหา.....	110
6.3.1 หลีกเลี่ยงการทำให้เกิดโครงสร้างของวงจรถ่วงเฟอโรเรโซแนนซ์.....	110
6.3.2 การต่อโหลดความต้านทานแรงต่ำ	111
7. สรุปและข้อเสนอแนะ	113
7.1 สรุป	113
7.2 ข้อเสนอแนะ	115
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก	118
ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง กรณีปัญหาแรงดันเกิน จากการลัด-ปลดสวิตช์ในสายป้อน.....	119
ภาคผนวก ข. ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง กรณีปัญหาแรงดันเกิน จากการลัด-ปลดฟิวส์ชนิดขาดตก	123
ภาคผนวก ค. ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง กรณีปัญหาแรงดันเกิน จากการทำงานของฟิวส์ชนิดขาดตก.....	128
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณลักษณะความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วคราวของกั๊บดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะ ประเภทติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ของบริษัท Ohio Brass.....	32
4.1 อัตราการลดทอนแรงดันของอุปกรณ์แบ่งแรงดันทั้ง 4 ชุด	41
4.2 ลำดับขั้นตอนการสับ-ปลดสวิตช์ กรณีไม่ติดตั้งกั๊บดักฟ้าผ่า	44
4.3 ลำดับขั้นตอนการสับ-ปลดสวิตช์ กรณีติดตั้งกั๊บดักฟ้าผ่า	46
4.4 รายงานความเสียหายของกั๊บดักฟ้าผ่าขณะปฏิบัติงานในสายบ่อน.....	81
5.1 พารามิเตอร์ของโหลดในสายบ่อน กรณีศึกษาแรงดันเกิน จากการสับ-ปลดฟิวส์ชนิดขาดตก	87
6.1 พารามิเตอร์ของโหลดในสายบ่อน กรณีศึกษาแรงดันเกิน จากการทำงานของฟิวส์ชนิดขาดตก.....	104

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 วงจรเชิงเส้นพื้นฐานที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์.....	7
2.2 ความสัมพันธ์ของขนาดกระแสในวงจรกับขนาดค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ	8
2.3 การหาผลลัพธ์ของวงจรเชิงเส้น LC ด้วยวิธีกราฟ.....	8
2.4 การอธิบายพื้นฐานการเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ของวงจร LC เชิงเส้นด้วยวิธีกราฟ	9
2.5 ผลของความต้านทานอนุกรมในวงจร	11
2.6 วงจรสมมูลและแผนภาพเฟสเซอร์ของการต่อโหลดความต้านทานด้านแรงต่ำ	12
2.7 การหาจุดทำงานโดยใช้วิธีกราฟ เมื่อมีโหลดความต้านทานด้านแรงต่ำ	13
2.8 แผนภาพสเปคตรัมและสโตโบสโคปของรูปแบบ fundamental mode	14
2.9 แผนภาพสเปคตรัมและสโตโบสโคปของรูปแบบ subharmonic mode	15
2.10 แผนภาพสเปคตรัมและสโตโบสโคปของรูปแบบ quasi-periodic mode	15
2.11 แผนภาพสเปคตรัมและสโตโบสโคปของรูปแบบ chaotic mode.....	16
2.12 กราฟแสดงความไวของพารามิเตอร์ E กับปรากฏการณ์ก้าวกระโดดของแรงดัน	16
2.13 แผนภาพ bifurcation ขณะเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ (C) จาก 0-30 μ F	17
2.14 แผนภาพ bifurcation ขณะลดขนาดตัวเก็บประจุ (C) จาก 30-0 μ F	18
2.15 เส้นทางคุณลักษณะของเฟอร์โรเรโซแนนซ์	19
2.16 แผนภาพสภาวะที่อาจเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	20
2.17 รูปคลื่นแรงดันของสายเคเบิลใต้ดินในเฟสที่เปิดวงจรขณะเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ รูปแบบ fundamental mode ในสภาวะคงตัว	20
2.18 รูปคลื่นแรงดันของสายเคเบิลใต้ดินในเฟสที่เปิดวงจรขณะเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ รูปแบบ chaotic mode ในสภาวะคงตัว.....	21
3.1 ตัวอย่างของกัปดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน	24
3.2 ตัวอย่างบล็อกของกัปดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะที่ถูกอัดกดให้กลม	25
3.3 อนุภาคของสารออกไซด์ผสมที่ทำเป็นความต้านทานไม่เชิงเส้น	25
3.4 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของแรงดัน-กระแสไฟฟ้าของ ZnO	26
3.5 วงจรสมมูลของแผ่นบล็อกสารออกไซด์โลหะของกัปดักฟ้าผ่า	26
3.6 คุณลักษณะทางความร้อนของกัปดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะ ประเภท station class (porcelain housing).....	29

ภาพประกอบที่	หน้า
3.7 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของกับดักฟ้าผ่าขนาด 27 kV	29
3.8 ความสามารถในการรองรับแรงดันเกินชั่วคราวของกับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะ	30
3.9 ตัวอย่างของกราฟความสามารถในการรับแรงดันเกินชั่วคราวของ กับดักฟ้าผ่าชนิด station class	31
4.1 แผนผังเส้นเดียวของบริเวณที่ปฏิบัติงาน	34
4.2 ภาพถ่ายเสาไรเซอร์ที่มีสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ติดตั้งอยู่	35
4.3 สวิตช์ใบมีด BZ14-1H และกับดักฟ้าผ่า เฟส Y และ B.....	35
4.4 แผนผังเส้นเดียวแสดงลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงานในครั้งที่ 1	37
4.5 แผนผังเส้นเดียวแสดงลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงานในครั้งที่ 2 และ 3	38
4.6 ตำแหน่งเฟสของวงจรสายป้อน	38
4.7 แผนผังเส้นเดียวแสดงลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงานในครั้งที่ 4	39
4.8 ภาพถ่ายขณะกับดักฟ้าผ่าเฟส R ระเบิดในการปฏิบัติงานครั้งที่ 4.....	40
4.9 ภาพถ่ายกับดักฟ้าผ่าเฟส R ที่เกิดระเบิดในการปฏิบัติงานครั้งที่ 4	40
4.10 อุปกรณ์แบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ทั้ง 4 ตัว ถูกนำมาติดตั้งบนรถบรรทุก.....	42
4.11 การต่อสายแรงสูงเข้าอุปกรณ์แบ่งแรงดัน	42
4.12 วงจรการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันในเฟสต่างๆ.....	43
4.13 ดิจิตอลออสซิลโลสโคปที่ใช้วัดและบันทึกรูปคลื่นแรงดัน	43
4.14 แผนภาพและลำดับขั้นตอนในการสับ-ปลดสวิตช์ กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	45
4.15 แผนภาพและลำดับขั้นตอนในการสับ-ปลดสวิตช์ กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	47
4.16 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14	48
4.17 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14-1H เฟส Y	49
4.18 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14-1H เฟส B.....	49
4.19 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ BZ14-1H เฟส R.....	49
4.20 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขณะปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส R	50
4.21 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขณะปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส B	51
4.22 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส Y	52
4.23 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส B	52
4.24 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส R.....	53

ภาพประกอบที่	หน้า
4.25 หม้อแปลง Station Service ขนาด 112.5 kVA ของสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งรับจ่ายสายป้อน BZ14 โดยต่ออยู่ที่ต้นทางของสายเคเบิลใต้ดิน	54
4.26 แสดงตำแหน่งที่หม้อแปลง Station Service ติดตั้งอยู่บริเวณต้นทาง ของสายเคเบิลใต้ดิน BZ14 ซึ่งอาจเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์	55
4.27 แผนผังเส้นเดียวที่ใช้สร้างแบบจำลองในโปรแกรม EMTP.....	56
4.28 แบบจำลองโปรแกรม ATP/EMTP ของกรณีศึกษา	57
4.29 แบบจำลองสายส่งชนิด PI	58
4.30 โครงสร้างของหม้อแปลง 3 เฟส ชนิดแกนเหล็ก 3 ขา	59
4.31 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ชนิดแกนเหล็ก 3 ขา ที่มีการต่อขดลวดแบบ Dyn11 ..	59
4.32 วงจรสมมูลลัดวงจรลำดับศูนย์ด้านแรงต่ำของหม้อแปลง	60
4.33 รูปคลื่นแรงดันขณะสับ C.B.BZ14 ที่มุม 64.8°	63
4.34 แรงดันเฟสที่ขั้วของสายเคเบิลใต้ดิน ขณะสับสวิตช์ใบมีดเฟส Y	63
4.35 แรงดันตกคร่อมขดลวดหม้อแปลง ขณะสับสวิตช์ใบมีดเฟส Y	63
4.36 แรงดันเฟสด้านแรงต่ำของหม้อแปลง ขณะสับสวิตช์ใบมีดเฟส Y	64
4.37 แรงดันเฟสที่ขั้วของสายเคเบิลใต้ดิน ขณะสับสวิตช์ใบมีดเฟส B	64
4.38 แรงดันตกคร่อมขดลวดหม้อแปลง ขณะสับสวิตช์ใบมีดเฟส B	64
4.39 แรงดันเฟสด้านแรงต่ำของหม้อแปลง ขณะสับสวิตช์ใบมีดเฟส B.....	65
4.40 รูปคลื่นแรงดันขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14 เฟส R	65
4.41 แรงดันเฟสที่ขั้วของสายเคเบิลใต้ดิน ขณะปลดสวิตช์ใบมีดเฟส R.....	66
4.42 แรงดันตกคร่อมขดลวดหม้อแปลง ขณะปลดสวิตช์ใบมีดเฟส R.....	66
4.43 แรงดันเฟสด้านแรงต่ำของหม้อแปลง ขณะปลดสวิตช์ใบมีดเฟส R	66
4.44 แรงดันเฟสที่ขั้วของสายเคเบิลใต้ดิน ขณะปลดสวิตช์ใบมีดเฟส B.....	67
4.45 แรงดันตกคร่อมขดลวดหม้อแปลง ขณะปลดสวิตช์ใบมีดเฟส B.....	67
4.46 แรงดันเฟสด้านแรงต่ำของหม้อแปลง ขณะปลดสวิตช์ใบมีดเฟส B	67
4.47 ผลของมุมในการสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส Y	68
4.48 ตัวอย่างผลของมุมในการสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส B (กรณีสับสวิตช์ใบมีดเฟส B ที่มุม 90°	69

ภาพประกอบที่	หน้า
4.49 ตัวอย่างผลของมุมในการสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส B (กรณีสับสวิตช์ใบมีดเฟส B ที่มุม 0°	70
4.50 รูปคลื่นแรงดันที่ขั้วของสายเคเบิลใต้ดินขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส Y และ B ที่มุม 90° ตามลำดับ	70
4.51 ผลของมุมในการปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส R	71
4.52 ตัวอย่างผลของมุมในการปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส B (กรณีสับสวิตช์ใบมีดเฟส R ที่มุม 0°)	71
4.53 แรงดันที่ขั้วของสายเคเบิลใต้ดินขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส Y ที่มุม 90° ในสถานะที่มีแรงดันคงค้างในสาย 0.3 p.u. และมีฟลักซ์คงค้างในแกนเหล็ก 5.57, 8.94 และ -14.3 V.s ในเฟส R,Y และ B ตามลำดับ	72
4.54 รูปคลื่นแรงดันที่ขั้วของสายเคเบิลใต้ดิน (กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า)	73
4.55 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าเฟส R	73
4.56 รูปคลื่นแรงดันเกินในเฟส Y และ B ด้านแรงต่ำของหม้อแปลง	73
4.57 รูปคลื่นแรงดันขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส B ที่มุม 27° กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	74
4.58 รูปคลื่นแรงดันขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส B ที่มุม 27° กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	74
4.59 พลังงานที่กับดักฟ้าผ่าเฟส R ได้รับขณะเกิดแรงดันเกินชั่วคราว	75
4.60 แผนภาพเส้นเดียวของกรณีปัญหา แสดงการปรับเปลี่ยนลำดับการสับ-ปลดสวิตช์	76
4.61 C.B. BZ14 อยู่ในตำแหน่งปิดวงจร ขณะสับ-ปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H	77
4.62 รูปคลื่นแรงดันไซเคิลบวกของเฟส R ระหว่างหน้าสัมผัสของสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส R ภายหลังจากการสับ C.B. BZ14	78
4.63 รูปคลื่นแรงดันขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ขณะมีการสับ C.B. BZ14 เข้าไปก่อน	78
4.64 รูปคลื่นกระแสไหลดที่ไหลผ่านสวิตช์ใบมีด BZ14-1H ขณะทำการสับสวิตช์ที่ละเฟส	78
4.65 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าขณะสับสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส Y,B และ R ตามลำดับ	79
4.66 ขนาดแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าสูงสุดขณะปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส R และ B ที่มุม 0° และ 90° ตามลำดับ เมื่อต่อโหลดด้านแรงต่ำที่ขนาดต่างๆกัน	80

ภาพประกอบที่	หน้า
4.67 ขนาดแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าสูงสุดขณะปลดสวิตช์ใบมีด BZ14-1H เฟส R และ B ที่มุม 0° และ 90° ตามลำดับ เมื่อต่อโหลดด้านแรงต่ำที่ขนาด 10%	80
5.1 แผนภาพเส้นเดียวของกรณีศึกษาแรงดันเกินจากการสับ-ปลดฟิวส์ชนิดขาดตก	82
5.2 แผนภาพเส้นเดียวของระบบ RMU ภายในอาคารของผู้ใช้ไฟ	83
5.3 กับดักฟ้าผ่าขนาด 21 kV, 5 kA ที่ติดตั้งภายในตู้ RMU	83
5.4 ภาพถ่ายของกับดักฟ้าผ่าเฟส R ที่เกิดระเบิด	85
5.5 ภาพถ่ายข้อต่อโลหะส่วนบนของกับดักฟ้าผ่าเฟส Y และ B ที่มีคราบเขม่าดำและมีบางส่วนหลอมละลายไฟ	85
5.6 แบบจำลองโปรแกรม ATP/EMTP ของกรณีศึกษาแรงดันเกินจากการสับ-ปลดฟิวส์ชนิดขาดตก	87
5.7 รูปคลื่นแรงดันขณะสับฟิวส์เฟส Y ที่มุม 90°	88
5.8 ผลของมุมในการสับฟิวส์เฟส Y กับขนาดค่ายอดของแรงดันเกินสูงสุดที่เกิดขึ้น	88
5.9 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมขดลวดของหม้อแปลง ขณะสับฟิวส์เฟส Y ที่มุม 90°	89
5.10 รูปคลื่นแรงดันด้านแรงต่ำของหม้อแปลงขณะสับฟิวส์เฟส Y ที่มุม 90°	89
5.11 รูปคลื่นแรงดันขณะสับฟิวส์เฟส B ที่มุม 60° (สับฟิวส์เฟส Y ที่มุม 90°)	90
5.12 ผลของมุมในการสับฟิวส์เฟส B กับขนาดค่ายอดของแรงดันเกินสูงสุดที่เกิดขึ้น	90
5.13 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมขดลวดของหม้อแปลง ขณะสับฟิวส์เฟส B ที่มุม 60°	91
5.14 รูปคลื่นแรงดันด้านแรงต่ำของหม้อแปลง ขณะสับฟิวส์เฟส B ที่มุม 60°	91
5.15 รูปคลื่นแรงดันที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่า ขณะสับฟิวส์เฟส R ที่มุม 90° เป็นเฟสสุดท้าย	92
5.16 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่า ขณะสับฟิวส์เฟส Y	92
5.17 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าเฟส R ขณะรับแรงดันเกินหลังจากสับฟิวส์เฟส Y	93
5.18 พลังงานที่กับดักฟ้าผ่าเฟส R ได้รับ ขณะแรงดันเกินหลังจากสับฟิวส์เฟส Y	93
5.19 แผนภาพแสดงการแก้ปัญหาด้วยการปลด Incoming C.B. ของ RMU ออกก่อนการสับฟิวส์ชนิดขาดตก	94
5.20 รูปคลื่นของแรงดันเฟสที่จุดติดตั้งกับดักฟ้าผ่าของหม้อแปลง 1,250 kVA ขณะสับฟิวส์ชนิดขาดตก และ Incoming C.B. ของ RMU ทั้งสองชุดเปิดวงจร	95

ภาพประกอบที่	หน้า
5.21 รูปคลื่นแรงดันเฟสของสายเคเบิลใต้ดินขณะสับฟิวส์ชนิดขาดตก เฟส Y, B และ R ที่มุม 90° ตามลำดับ	95
5.22 รูปคลื่นกระแสพุ่งเข้าขณะสับ Incoming C.B. จ่ายไฟให้กับหม้อแปลงขนาด 2x1,600 kVA และ 1,250 kVA ตามลำดับ.....	96
5.23 ขนาดของโหลดความต้านทานกับขนาดแรงดันเฟส R สูงสุด ขณะสับฟิวส์ เฟส Y และ B ที่มุม 90° และ 270°	96
5.24 รูปคลื่นแรงดันขณะสับฟิวส์เฟส Y และ B ที่มุม 90° และ 270° (Load 10%)	97
6.1 แผนภาพเส้นเดียวแสดงระบบจ่ายไฟฟ้าของอาคารพาณิชย์ที่ปฏิบัติงาน.....	99
6.2 เสาเครื่องวัดแรงสูงที่เกิดการผิดพลาดจากกระรอกที่เป็นเหตุทำให้ ฟิวส์แรงสูงเฟส Y ขาดตก.....	99
6.3 เสาไฟแรงสูงของอาคารผู้ใช้ไฟ	100
6.4 ภาพถ่ายอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบ RMU และตู้ควบคุมการจ่ายไฟหลักของอาคาร.....	100
6.5 กั๊บดักฟ้าผ่าเฟส Y บนเสาไฟแรงสูงของผู้ใช้ไฟภายหลังเกิดการระเบิดขึ้น.....	102
6.6 แผนภาพอย่างง่ายแสดงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น	102
6.7 แบบจำลองโปรแกรม ATP/EMTP ของกรณีศึกษาแรงดันเกิน จากการทำงานของฟิวส์ชนิดขาดตก	104
6.8 รูปคลื่นแรงดันเฟสที่สายเคเบิลใต้ดิน ขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์สับกลับ ที่มุม 90° ของเฟส R.....	105
6.9 ผลของมุมในการสับกลับของเซอร์กิตเบรกเกอร์กับแรงดันเกินสูงสุดเฟส Y	105
6.10 แรงดันที่สายเคเบิลใต้ดินเฟส Y ขณะเข้าสู่สภาวะคงตัว	106
6.11 แรงดันตกคร่อมขดลวดของหม้อแปลง ขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์สับกลับ ที่มุม 90° ของเฟส R.....	106
6.12 แรงดันด้านแรงต่ำของหม้อแปลง ขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์สับกลับที่มุม 90° ของเฟส R ...	107
6.13 แรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าเฟส Y ขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์สับกลับที่มุม 90° ของเฟส R	107
6.14 รูปคลื่นกระแสไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าเฟส Y ขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์สับกลับ ที่มุม 90° ของเฟส R.....	108
6.15 พลังงานของกับดักฟ้าผ่าเฟส Y ที่เพิ่มสูงขึ้นจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้น	108

ภาพประกอบที่	หน้า
6.16 ฟิวส์เฟส R และ Y ขาดตกจากการระเบิดของกับดักฟ้าผ่าเฟส Y ขณะสับฟิวส์เฟส Y กลับคืน	109
6.17 รูปคลื่นแรงดันขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์สับกลับที่มุม 90° ของเฟส R กรณีฟิวส์ เฟส R และ Y ขาดตกหลังจากกับดักฟ้าผ่าเฟส Y ระเบิด.....	109
6.18 ตัวอย่างแสดงการปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ หรือโหลดเบรกสวิตช์ด้านแรงสูงออก เพื่อแยกวงจรระหว่างหม้อแปลงและสายเคเบิลใต้ดินออกจากกัน.....	110
6.19 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่า ขณะปลดโหลดเบรกสวิตช์ด้านแรงสูงออก.....	110
6.20 กระแสพุ่งเข้าขณะสับโหลดเบรกสวิตช์จ่ายไฟกลับคืนให้กับหม้อแปลง	111
6.21 ตัวอย่างแสดงการต่อโหลดความต้านทานด้านภายนอกด้านแรงต่ำของหม้อแปลง.....	111
6.22 ความสัมพันธ์ของขนาดโหลดความต้านทานด้านแรงต่ำกับ ขนาดของแรงดันที่สายเคเบิลใต้ดินขณะฟิวส์เฟส Y เปิดวงจร	112
6.23 รูปคลื่นแรงดันที่สายเคเบิลใต้ดินขณะต่อโหลดความต้านทานด้านแรงต่ำ ขนาด 10% ในสภาวะที่ฟิวส์เฟส Y เปิดวงจรอยู่.....	112