

ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าของผู้ใช้จากการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ
ในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง

นายนครินทร์ วงศ์ศิริธร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543
ISBN 974-13-0245-2
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPACT OF CAPACITOR SWITCHING AT MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION
LEVEL ON CUSTOMER ELECTRICAL SYSTEMS

Mr. Nakarintra Wongsasithorn

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 2000

ISBN 974-13-0245-2


หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าของผู้ใช้จากการสวิตซ์ตัวเก็บประจุในระบบ
จำหน่ายแรงดันปานกลาง
โดย นายนครินทร์ วงศ์ศศิธร
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

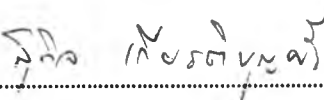

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอ้ออากรณ)


.....กรรมการ
(นายสุกิจ เกียรติกุล)

นครินทร์ วงศ์ศิธร : ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าของผู้ใช้จากการสวิตซ์ตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง (IMPACT OF CAPACITOR SWITCHING AT MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION LEVEL ON CUSTOMER ELECTRICAL SYSTEMS)

อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้าย, 188 หน้า. ISBN 974-13-0245-2

วิทยานิพนธ์นี้เน้นการศึกษาถึงผลของการสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุของการไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าย่อยขนาดแรงดันปานกลางที่มีต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า ที่ทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วคราวในระบบไฟฟ้ากำลัง พร้อมทั้งวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อขนาดแรงดันเกิน ระบบไฟฟ้านำมาเป็นกรณีศึกษา ใช้ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงขนาดแรงดัน 24 kV (สถานีไฟฟ้าย่อย แบริ่ง) โดยจำลองผลด้วยโปรแกรม EMTP เปรียบเทียบกับการวัดจริง

นอกจากนั้น ยังได้วิเคราะห์ถึงสเปกตรัมของรูปคลื่นแรงดัน เพื่อหาส่วนประกอบของรูปคลื่นที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ที่ไวต่อแรงดัน และเสนอวิธีการลดแรงดันเกินชั่วคราวด้วย

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิสิต _____ นครินทร์ วงศ์ศิธร
สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ปีการศึกษา _____ 2543 _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

4170352621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: CAPACITOR SWITCHING / TRANSIENTS OVERVOLTAGE /
ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAMME (EMTP) /
MITIGATION TECHNIQUE

NAKARINTRA WONGSASITHORN : IMPACT OF CAPACITOR
SWITCHING AT MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION LEVEL ON
CUSTOMER ELECTRICAL SYSTEMS.

THESIS ADVISOR: CHAIYA CHAMCHOY, 188 pp.

ISBN 974-13-0245-2

The voltage transients resulting from the utility capacitor banks switching were analyzed in this thesis. In addition the factors that influencing its voltage magnitude was analyzed. The recorded events from 24 kV MEA distribution system were compared with the simulated results from EMTP program, including a spectral analysis of the transient voltage waves. This procedure can reveal the harmonic components, which can affect the operation of sensitive equipments, e.g. ASD. Some mitigation techniques to reduce transient overvoltage also provided.

Department Electrical Engineering Student's signature Nakarintra W.

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature Ch. Chamchoy

Academic year 2000 Co-advisor's signature _____



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้แนะแนวทางปฏิบัติให้ความคิดเห็นและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ตลอดจนชี้ให้เห็นถึงข้อบกพร่องและแนวทางแก้ไขต่างๆ นับตั้งแต่เริ่มต้นในการทำวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และคุณสุกิจ เกียรติบุญศรี ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการแก้สมการคณิตศาสตร์

ขอขอบคุณ พนักงานการไฟฟ้านครหลวงทุกท่านที่ได้ให้การอนุเคราะห์ข้อมูลในการทำวิจัยในครั้งนี้ โดยเฉพาะ คุณนริศ แดกระโทก และคุณศรชัย บัวแก้ว ที่ได้ให้การช่วยเหลือมาตั้งแต่ต้น

ขอขอบคุณ พนักงานโรงงาน NS Electronics และ โรงงานรองเท้าบาจา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์การบันทึกข้อมูลในโรงงาน

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน ในห้องวิจัย PQ และห้องๆ ในห้องวิจัย HV ที่ได้ให้คำปรึกษาในทุกเรื่อง และได้ให้กำลังใจมาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ มารดา - บิดา ที่ได้มอบมรดกที่มีค่าที่สุดแก่ผู้วิจัย นั่นคือ “การศึกษา”

นครินทร์ วงศ์ศิธิธ

เมษายน 2544

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 แนวเหตุผลและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	4
2 ทฤษฎีการสวิตช์ตัวเก็บประจุ	5
2.1 การวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วคราวเนื่องจากการสวิตช์ตัวเก็บประจุ	5
2.1.1 การวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วคราวจากรูปที่ 2.2	7
2.1.2 การวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วคราวจากรูปที่ 2.3	17
3 การควบคุมแรงดันเกินชั่วคราวจากการสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ	27
3.1 การใช้ Pre-insertion Impedance	27
3.2 ชุดควบคุมการต่อวงจร (Synchronous Closing Control)	28
3.2.1 ต่อแบบวายต่อลงดิน	29
3.2.2 ต่อแบบวายไม่ต่อลงดิน	29
3.3 การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ	32
3.4 การปรับปรุงชุดแก้ตัวประกอบกำลังของผู้ใช้ไฟฟ้า	32
4 แบบจำลองระบบไฟฟ้าของโปรแกรม EMTP	33
4.1 สายส่ง	33
4.1.1 วงจรสมมูลชนิดพายน์ (Nominal Pi-Circuit)	33
4.1.2 สายส่งที่พารามิเตอร์ของสายมีค่าคงที่ (Constant Parameter Line) ...	36
4.1.3 สายส่งที่มีพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ (Frequency Dependent Line) ...	39

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2 องค์ประกอบเชิงเส้นแบบก้อน (Lumped Linear Element)	40
4.2.1 ตัวต้านทาน	40
4.2.2 ตัวเหนี่ยวนำ	41
4.2.3 ตัวเก็บประจุ	42
4.3 สวิตช์ที่ควบคุมด้วยเวลา (Time Controlled Switch)	43
4.4 หม้อแปลง	44
4.4.1 หม้อแปลงที่แทนด้วยวงจรสมมูลของเทวินิน	44
4.4.2 เมตริกซ์ความเหนี่ยวนำแทนหม้อแปลงเฟสเดียว	
ชนิด 2 และ 3 ขดลวด	45
4.4.2.1 หม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด	45
4.4.2.2 หม้อแปลงชนิด 3 ขดลวด	48
4.4.3 เมตริกซ์ความเหนี่ยวนำผกผันแทนหม้อแปลงเฟสเดียว	
ชนิด 2 และ 3 ขดลวด	49
4.4.3.1 หม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด	49
4.4.3.2 หม้อแปลงชนิด 3 ขดลวด	50
4.5 แหล่งกำเนิดแรงดัน และแหล่งกำเนิดกระแส	52
5 กรณีศึกษาการสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุของสถานีไฟฟ้าย่อย	53
5.1 แบบจำลองของวงจรและค่าของพารามิเตอร์	56
5.2 ผลการวิเคราะห์	60
5.2.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดกับการจำลองด้วย	
โปรแกรม EMTP	60
5.2.2 การวิเคราะห์ความถี่ของรูปคลื่น	89
5.2.2.1 ที่ผู้ใช้ไฟฟ้า	91
5.2.2.2 ที่สถานีไฟฟ้าย่อย	96
5.3 กรณีศึกษาเพิ่มเติม	98
5.3.1 รูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย	98
5.3.2 การกลับคืนของกระแส (Restrike)	101

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6 การศึกษาวิธีการควบคุมแรงดันเกินชั่วคราวจากการสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ ของระบบกรณีศึกษา	106
6.1 การใช้ Pre-insertion Impedance	106
6.2 ชุดควบคุมการต่อวงจร (Synchronous Closing Control)	112
6.3 การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ	121
6.4 การปรับปรุงชุดแก้ตัวประกอบกำลังของผู้ใช้ไฟฟ้า	127
6.5 บทสรุป	133
7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	136
7.1 สรุปผลการวิจัย	136
7.2 ข้อเสนอแนะ	137
รายการอ้างอิง	138
ภาคผนวก	139
ก แสดงวิธีหาสมการของแรงดัน และกระแสเกินชั่วคราว	140
ก.1 แสดงวิธีหาสมการของแรงดัน และกระแสเกินชั่วคราว จากวงจรรูปที่ 2.2	140
ก.2 แสดงวิธีหาสมการของแรงดัน และกระแสเกินชั่วคราว จากวงจรรูปที่ 2.3	146
ข การวิเคราะห์ความถี่รูปคลื่นแรงดันที่เกิดแรงดันเกินชั่วคราว	149
ประวัติผู้เขียน	188

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบค่าสูงสุดของแรงดันเกินและกระแส 10
2.2	เปรียบเทียบค่าสูงสุดของแรงดันเกินและกระแส 17
5.1	(ก) ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองใน EMTP 58
5.1	(ข) ค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ในการจำลองใน EMTP 59
5.2	เปรียบเทียบขนาดของแรงดันเกิน วันที่ 18 ตค. 2543 65
5.3	เปรียบเทียบขนาดของแรงดันเกิน วันที่ 24 ตค. 2543 70
5.4	เปรียบเทียบขนาดของแรงดันเกิน วันที่ 27 ตค. 2543 75
5.5	เปรียบเทียบขนาดของแรงดันเกิน วันที่ 6 พย. 2543 80
5.6	เปรียบเทียบขนาดของแรงดันเกิน วันที่ 28 ตค. 2543 84
5.7	เปรียบเทียบขนาดของแรงดันกรณี Back-to-Back กับกรณีแยกเดี่ยว 87
5.8	ผลวิเคราะห์ความถี่ของรูปคลื่นที่ผู้ใช้ไฟฟ้าในวันที่ 18 ตค. 2543 91
5.9	ผลวิเคราะห์ความถี่ของรูปคลื่นที่ผู้ใช้ไฟฟ้าในวันที่ 24 ตค. 2543 91
5.10	ผลวิเคราะห์ความถี่ของรูปคลื่นที่ผู้ใช้ไฟฟ้าในวันที่ 27 ตค. 2543 92
5.11	ผลวิเคราะห์ความถี่ของรูปคลื่นที่ผู้ใช้ไฟฟ้าในวันที่ 6 พย. 2543 92
5.12	ผลวิเคราะห์ความถี่ของรูปคลื่นที่ผู้ใช้ไฟฟ้าในวันที่ 28 ตค. 2543 92
5.13	ผลวิเคราะห์ความถี่ของรูปคลื่นที่สถานีไฟฟ้าย่อยในวันที่ 18 ตค. 2543 96
5.14	ผลวิเคราะห์ความถี่ของรูปคลื่นที่สถานีไฟฟ้าย่อยในวันที่ 24 ตค. 2543 96
5.15	ผลวิเคราะห์ความถี่ของรูปคลื่นที่สถานีไฟฟ้าย่อยในวันที่ 27 ตค. 2543 96
5.16	ผลวิเคราะห์ความถี่ของรูปคลื่นที่สถานีไฟฟ้าย่อยในวันที่ 6 พย. 2543 96
5.17	เปรียบเทียบขนาดของแรงดันเกินในรูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุ แบบวายไม่ต่อลงดินและแบบวายต่อลงดิน 98
5.18	ขนาดของแรงดันเกินชั่วคราวเนื่องจากการกลับคืนของกระแส 102
6.1	เปรียบเทียบขนาดแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดขึ้นที่ค่าความต้านทานขนาดต่างๆ . 107
6.2	เปรียบเทียบขนาดแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดขึ้นที่ค่าความผิดพลาดของ การต่อวงจรที่เวลาต่างๆ 113
6.3	เปรียบเทียบขนาดแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดขึ้นที่ค่า X_L ขนาดต่างๆ 122
6.4	เปรียบเทียบขนาดแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดขึ้นที่ตัวกรองแบบต่างๆ 128

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

1.1	(ก) รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของบัสที่สวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ	2
1.1	(ข) รูปคลื่นแรงดัน และกระแสที่ผู้ใช้ไฟฟ้า	2
2.1	แผนภาพเส้นเดี่ยวของวงจรอย่างง่าย	5
2.2	วงจรสมมูลของรูปที่ 2.1	6
2.3	วงจรสมมูลของรูปที่ 2.1 เมื่อคิดโหลดของสายป้อน	6
2.4	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = 0^\circ$	8
2.5	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = 0^\circ$	8
2.6	กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = 0^\circ$	8
2.7	กระแสที่ไหลผ่านที่ตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = 0^\circ$	9
2.8	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = -90^\circ$	9
2.9	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = -90^\circ$	9
2.10	กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = -90^\circ$	10
2.11	กระแสที่ไหลผ่านที่ตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = -90^\circ$	10
2.12	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า ϕ ต่างๆ	11
2.13	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า pf. ต่างๆ	12
2.14	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่าโหลดต่างๆ	12
2.15	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C1	13
2.16	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C2	13
2.17	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า ϕ ต่างๆ (C2: 415V)	14
2.18	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า pf. ต่างๆ (C2: 415V)	14
2.19	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่าโหลดต่างๆ (C2: 415V)	15
2.20	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C1 (C2: 415V)	15
2.21	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C2 (C2: 415V)	16
2.22	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = 0^\circ$	18
2.23	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = 0^\circ$	18
2.24	กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = 0^\circ$	18
2.25	กระแสที่ไหลผ่านที่ตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = 0^\circ$	19
2.26	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = -90^\circ$	19
2.27	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = -90^\circ$	19
2.28	กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C1 เมื่อ $\phi = -90^\circ$	20
2.29	กระแสที่ไหลผ่านที่ตัวเก็บประจุ C2 เมื่อ $\phi = -90^\circ$	20

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

2.30	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า ϕ ต่างๆ	21
2.31	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า pf. ต่างๆ	21
2.32	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่าโหลดต่างๆ	22
2.33	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่าโหลดสายป้อนขนาดต่างๆ	22
2.34	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C1	23
2.35	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C2	23
2.36	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า ϕ ต่างๆ (C2: 415V)	24
2.37	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่า pf. ต่างๆ (C2: 415V)	24
2.38	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่าโหลดต่างๆ (C2: 415V)	25
2.39	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 ที่ค่าโหลดสายป้อน ขนาดต่างๆ (C2: 415V)	25
2.40	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C1 (C2: 415V)	26
2.41	แรงดันเกินสูงสุดของ C1 และ C2 เมื่อทำการแปรค่า C2 (C2: 415V)	26
3.1	ลักษณะของ Pre-insertion Resistors	27
3.2	แสดงการต่อชุดตัวเก็บประจุ	29
3.3	แผนภาพแสดงเวลาในการปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์	30
3.4	ความเร็วที่น้อยที่สุดของการลดลงของไดโอดเล็คทริกที่จะนำมาใช้	31
3.5	เส้นโค้ง dV/dt ของสวิตช์ที่ใช้สัญญาณภาคเป็นฉนวนเทียบกับ เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดฉนวนเป็น SF ₆	31
3.6	การต่อตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ	32
4.1	(ก) แบบแทนแบบจำลอง (ข) วงจรสมมูลชนิดพายน์	34
4.2	วงจรสมมูลพายน์จำนวน n ยูนิต	36
4.3	(ก) แบบแทนแบบจำลอง (ข) วงจรสมมูลสายส่งแบบไม่คิดกำลังสูญเสีย	36
4.4	การต่อความต้านทานของสายส่งเมื่อคิดถึงกำลังสูญเสีย	39
4.5	แบบจำลองของสายส่งที่มีพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่	40
4.6	วงจรสมมูลของตัวต้านทาน	40
4.7	(ก) ตัวเหนี่ยวนำ (ข) วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำ	41
4.8	การอินทิเกรตแบบสี่เหลี่ยมคางหมู	42
4.9	(ก) ตัวเก็บประจุ (ข) วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุ	43
4.10	วงจรสมมูลของสวิตช์	43
4.11	แผนภาพเส้นเดียว และวงจรสมมูล ของวงจรตัวอย่าง	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12	วงจรรูปแบบววาย 44
4.13	วงจรถัดลักษณะที่ 46
4.14	วงจรถองหม้อแปลงชนิดแทนด้วยขดลวด 2 ขวด 48
4.15	วงจรถลเตลต้า 50
4.16	การเปลี่ยนวนจรถองแหล่งจ่ายพลังงาน 52
5.1	แผนผังของสถานีไฟฟ้าย่อยแบบริ่ง 53
5.2	ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่อง RPM ในสถานีไฟฟ้าย่อย 54
5.3	ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่อง RPM ในโรงงานรองเท้าบาจา 55
5.4	ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่อง RPM ในโรงงาน NS Electronics 55
5.5	วงจรถสมมูลที่ใช้กับโปรแกรม EMTP 56
5.6	เหตุการณ์ วันที่ 18 ต.ค. 2543 61
5.7	รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส C-A 62
5.8	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รองเท้าบาจา เฟส A 62
5.9	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รองเท้าบาจา เฟส B 62
5.10	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รองเท้าบาจา เฟส C 63
5.11	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส A 63
5.12	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส B 63
5.13	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส C 64
5.14	เหตุการณ์ วันที่ 24 ต.ค. 2543 66
5.15	รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส A-B 67
5.16	รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส C-A 67
5.17	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รองเท้าบาจา เฟส A 67
5.18	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รองเท้าบาจา เฟส B 68
5.19	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รองเท้าบาจา เฟส C 68
5.20	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส A 68
5.21	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส B 69
5.22	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส C 69
5.23	เหตุการณ์ วันที่ 27 ต.ค. 2543 71
5.24	รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส A-B 72
5.25	รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส B-C 72

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

5.26	รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส C-A	72
5.27	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส A	73
5.28	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส B	73
5.29	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส C	73
5.30	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส A	74
5.31	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส B	74
5.32	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส C	74
5.33	เหตุการณ์ วันที่ 6 พย. 2543	76
5.34	รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส A-B	77
5.35	รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส B-C	77
5.36	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส A	77
5.37	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส B	78
5.38	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส C	78
5.39	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส A	78
5.40	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส B	79
5.41	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส C	79
5.42	เหตุการณ์ วันที่ 6 พย. 2543	81
5.43	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส A	82
5.44	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส B	82
5.45	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส C	82
5.46	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส A	83
5.47	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส B	83
5.48	รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส C	83
5.49	เปรียบเทียบผลของสองกรณี ที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส A	85
5.50	เปรียบเทียบผลของสองกรณี ที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส B	85
5.51	เปรียบเทียบผลของสองกรณี ที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส C	86
5.52	เปรียบเทียบผลของสองกรณี ที่โรงงาน NS Electronics เฟส A	86
5.53	เปรียบเทียบผลของสองกรณี ที่โรงงาน NS Electronics เฟส B	86
5.54	เปรียบเทียบผลของสองกรณี ที่โรงงาน NS Electronics เฟส C	87
5.55	รูปคลื่นที่นำมาวิเคราะห์ (เป็นส่วนหนึ่งของรูปที่ 5.11)	89
5.56	รูปคลื่นที่กรองเอาความถี่หลักมุลออก	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.57 รูปคลื่นที่ผ่านกระบวนการ FFT	90
5.58 ความสัมพันธ์ของแรงดันกับความถี่ ที่โรงงาน NS Electronics เฟส A, B และ C	93
5.59 ความสัมพันธ์ของแรงดันกับความถี่ ที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส A, B และ C	94
5.60 ความสัมพันธ์ของแรงดันกับความถี่ ของทุกเหตุการณ์	95
5.61 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส C-A	99
5.62 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส A	99
5.63 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส B	99
5.64 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส C	100
5.65 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส A	100
5.66 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส B	100
5.67 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส C	101
5.68 เหตุการณ์การกลับคืนของกระแส	102
5.69 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส A-B	103
5.70 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส B-C	103
5.71 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส C-A	103
5.72 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส A	104
5.73 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส B	104
5.74 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส C	104
5.75 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส A	105
5.76 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส B	105
5.77 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส C	105
6.1 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส A-B	108
6.2 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส B-C	108
6.3 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส C-A	108
6.4 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส A	109
6.5 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส B	109
6.6 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส C	109
6.7 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส A	110
6.8 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส B	110

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.9 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส C	110
6.10 ขนาดของแรงดันเกินชั่วครู่ที่ขนาดความต้านทานต่างๆ	111
6.11 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส A-B	114
6.12 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส B-C	114
6.13 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส C-A	114
6.14 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส A	115
6.15 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส B	115
6.16 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส C	115
6.17 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส A	116
6.18 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส B	116
6.19 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส C	116
6.20 ลักษณะของรูปคลื่นเมื่อชุดควบคุมการต่อวงจร ต่อวงจรเข้าไป 2 มิลลิวินาที	119
6.21 ขนาดของแรงดันเกินชั่วครู่ที่เวลาการต่อวงจรต่างๆ	120
6.22 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส A-B	123
6.23 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส B-C	123
6.24 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส C-A	123
6.25 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส A	124
6.26 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส B	124
6.27 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส C	124
6.28 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส A	125
6.29 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส B	125
6.30 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส C	125
6.31 ขนาดของแรงดันเกินชั่วครู่ที่ X_L ขนาดต่างๆ	126
6.32 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส A-B	129
6.33 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส B-C	129
6.34 รูปคลื่นแรงดัน (เฟส-เฟส) ที่บัส BRGC2 เฟส C-A	129
6.35 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส A	130
6.36 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส B	130
6.37 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน รongเท้าบาจา เฟส C	130
6.38 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส A	131

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.39 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส B	131
6.40 รูปคลื่นแรงดันที่โรงงาน NS Electronics เฟส C	131
6.41 ขนาดของแรงดันเกินชั่วครู่ที่ตัวกรองแบบต่างๆ	132
6.42 เปรียบเทียบแรงดันเกินชั่วครู่ด้วยวิธีการควบคุมแรงดันแบบต่างๆ	134
ข.1 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.7	150
ข.2 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.8	151
ข.3 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.9	152
ข.4 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.10	153
ข.5 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.11	154
ข.6 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.12	155
ข.7 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.13	156
ข.8 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.15	157
ข.9 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.16	158
ข.10 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.17	159
ข.11 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.18	160
ข.12 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.19	161
ข.13 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.20	162
ข.14 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.21	163
ข.15 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.22	164
ข.16 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.24	165
ข.17 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.25	166
ข.18 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.26	167
ข.19 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.27	168
ข.20 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.28	169
ข.21 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.29	170
ข.22 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.30	171
ข.23 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.31	172
ข.24 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.32	173
ข.25 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.34	174
ข.26 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.35	175
ข.27 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.36	176

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.28 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.37	177
ข.29 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.38	178
ข.30 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.39	179
ข.31 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.40	180
ข.32 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.41	181
ข.33 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.43	182
ข.34 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.44	183
ข.35 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.45	184
ข.36 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.46	185
ข.37 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.47	186
ข.38 รูปผลการวิเคราะห์ความถี่ของรูปที่ 5.48	187