การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกในสถานีไฟฟ้าย่อย

นาย ศรชัย บัวแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-441-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16520790

A STUDY OF HARMONIC EFFECTS IN SUBSTATION

Mr. Sornchai Buakeaw

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University

Academic Year 1998
ISBN 974-331-441-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกในสถานีไฟฟ้าย่อย
โดย	นาย ศรชัย บัวแก้ว
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... กรรมการ

(นาย ยงยุทธ จิตรพยัคฆ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ศรชัย บัวแก้ว : การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกในสถานีไฟฟ้าย่อย
(A STUDY OF HARMONIC EFFECTS IN SUBSTATION)
อ.ที่ปรึกษา : อ.ไชยะ แช่มช้อย ; 174 หน้า. ISBN 974-331-441-5

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแนวทางการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกในสถานีไฟฟ้าย่อย โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ปริมาณกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกในสายป้อนเปรียบเทียบกับค่าจำกัดตามมาตรฐาน IEEE Standard 519-1992 และ ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม ของ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลกระทบของฮาร์มอนิก เนื่องจากการติดตั้งใช้งานตัวเก็บประจุกำลังและหม้อแปลงกำลังในสถานีไฟฟ้าย่อย เช่น การเกิดเรโซแนนซ์ และการลดพิกัดของหม้อแปลง โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Standard C.57-110-1986 การศึกษาดังกล่าวจะเป็นแนวทางสำหรับการวางแผนและแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้นในอนาคตต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ศรชัย บัวแก้ว
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา พ.ศ. 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

หน้าอนุมัติวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้พิมพ์ลงบนกระดาษปกสีเขียว

#3972888521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD:
HARMONIC EFFECT / RESONANCE / TRANSFORMER DERATING
SORNCHAI BUAKEAW : A STUDY OF HARMONIC EFFECTS IN SUBSTATION
THESIS ADVISOR : CHAIYA CHAMCHOY 174 pp.
ISBN 974-331-441-5

This thesis presents the study and analysis of harmonic effects at an electrical substation .The evaluation is focused on the level of harmonic currents and voltages on feeders which will be compared to IEEE 519-1992 Standard and The regulation of harmonic for commercial and industrial power systems of EGAT,MEA and PEA.

Moreover, harmonic effects from power capacitors and power transformers installed at the substation are also studied, such as resonance effects and transformer derating to IEEE C.57-110-1986 Standard. The study can be a guideline for the system planning and harmonic mitigations in the future.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต Sornchai Buakeaw.
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Chaiya Chamchoy
ปีการศึกษา พ.ศ. 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และ คุณ ยงยุทธ จิตรพยัคฆ์ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้า ที่ได้ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการศึกษาด้วยดีเสมอมา

ลุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ การไฟฟ้านครหลวง ที่ได้อนุญาตให้ข้าพเจ้ามีโอกาสมาศึกษาต่อในหลักสูตรอันเป็นประโยชน์นี้

ศรชัย บัวแก้ว

เมษายน 2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฒ

บทที่

1. บทนำ..... 1

1.1 แนวเหตุผล..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 3

1.3 ขอบเขตโครงงานวิทยานิพนธ์..... 3

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน..... 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์..... 5

2. แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบจำหน่าย..... 6

2.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล..... 7

2.1.1 เครื่องแปลงผันกำลังสถิต..... 7

2.1.2 แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง..... 10

2.1.3 หม้อแปลงไฟฟ้า..... 11

2.1.4 หลอดฟลูออเรสเซนต์..... 14

2.2 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าและไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล..... 15

2.2.1 ชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายกระแส..... 15

2.2.2 เตาหลอมแบบอาร์ก..... 16

2.2.3 ชุดควบคุมการทำงานแบบ Integral Cycle..... 17

3. การคัดเลือกสถานีไฟฟ้าย่อยตัวอย่างและการตรวจวัดข้อมูล..... 20
3.1การคัดเลือกสถานีไฟฟ้าย่อยตัวอย่าง..... 20
3.2การตรวจวัดข้อมูลฮาร์มอนิกภายในสถานีไฟฟ้าย่อย..... 28
4. การวิเคราะห์ปริมาณกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกในสายป้อน..... 30
4.1มาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และ ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม..... 30
4.1.1มาตรฐาน IEEE Std.519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System..... 31
4.1.2ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม.. 34
4.2ผลที่ได้จากการตรวจวัดและการวิเคราะห์ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในสายป้อน.... 36
4.2.1สถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด..... 36
4.2.2สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต..... 36
4.2.3สถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด..... 37
4.2.4สถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม..... 37
4.2.5สถานีไฟฟ้าย่อยชั่วคราวแจงร้อน..... 38
4.2.6สถานีไฟฟ้าย่อยชั่วคราวคอต่อ..... 38
4.2.7สถานีสับเปลี่ยนลำโรง..... 39
4.3ผลที่ได้จากการตรวจวัดและการวิเคราะห์ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมภายในสถานีไฟฟ้าย่อย..... 64
4.3.1แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมภายในสถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด..... 64
4.3.2แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมภายในสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay1 64
4.3.3แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมภายในสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay2 65
4.3.4แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมภายในสถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด bay1..... 65
4.3.5แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมภายในสถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม bay1..... 66
4.3.6แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมภายในสถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม bay2..... 66
4.3.7แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมภายในสถานีไฟฟ้าย่อยแจงร้อน..... 67
4.3.8แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมภายในสถานีไฟฟ้าย่อยคอต่อ..... 67
4.3.9แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมภายในสถานีไฟฟ้าย่อยลำโรง bay1..... 68

4.3.10แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมภายในสถานีไฟฟ้าย่อยสำโรง bay2..... 68
5. การเกิดเรโซแนนซ์และผลกระทบต่อชุดตัวเก็บประจุ..... 71
5.1ทฤษฎีการเกิดเรโซแนนซ์..... 71
5.2ผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ผล..... 76
6. การลดพิกัดของหม้อแปลงกำลัง..... 101
6.1กำลังสูญเสียในหม้อแปลงกำลัง..... 101
6.1.1กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด..... 103
6.1.1.1กำลังสูญเสียฮิสเตอริซิส..... 103
6.1.2กำลังสูญเสียขณะมีโหลด..... 105
6.1.2.1กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานภายในขดลวด..... 105
6.1.2.2กำลังสูญเสีย ปลีกย่อยภายในขดลวด.....105
6.2การคำนวณการลดพิกัดของหม้อแปลง.....106
6.3ผลที่ได้จากการตรวจวัดและวิเคราะห์ผล..... 108
7. สรุปและข้อเสนอแนะ..... 132
รายการอ้างอิง..... 134
ภาคผนวก..... 136
ประวัติผู้เขียน..... 174

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

3.1 รายละเอียดของสถานีไฟฟ้าย่อยตัวอย่าง..... 27

4.1 ค่าจำกัดของปริมาณกระแสฮาร์มอนิกโดยพิจารณาที่แรงดัน 120 โวลต์ ถึง 69 กิโลโวลต์..... 31

4.2 ค่าจำกัดของปริมาณกระแสฮาร์มอนิกโดยพิจารณาที่แรงดันที่สูงกว่า69 กิโลโวลต์ ถึง 161 กิโลโวลต์ 32

4.3 ค่าจำกัดของปริมาณกระแสฮาร์มอนิกโดยพิจารณาที่แรงดันสูงกว่า 161 กิโลโวลต์..... 32

4.4 ค่าจำกัดของปริมาณแรงดันฮาร์มอนิก..... 33

4.5 ขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกตามข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้า ประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม..... 34

4.6 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม..... 35

4.7 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในสายป้อนของสถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด..... 40

4.8 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในสายป้อนของสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต..... 41

4.9 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในสายป้อนของสถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด..... 43

4.10 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในสายป้อนของสถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม..... 44

4.11 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในสายป้อนของสถานีไฟฟ้าย่อยแจงร้อน..... 46

4.12 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในสายป้อนของสถานีไฟฟ้าย่อยคอต่อ..... 47

4.13 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในสายป้อนของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง..... 49

4.14 สายป้อนที่มีกระแสฮาร์มอนิกเกินค่าจำกัดที่กำหนดในมาตรฐาน..... 52

4.15 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของสถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด bay 1 เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และ ข้อกำหนดฯ..... 64

4.16 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay 1 เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และข้อกำหนดฯ..... 64

4.17 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay 2 เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และข้อกำหนดฯ..... 65

4.18 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของสถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด bay 1
เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และข้อกำหนดฯ..... 65
4.19 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของสถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม bay 1
เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และข้อกำหนดฯ..... 66
4.20 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของสถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม bay 2
เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และข้อกำหนดฯ..... 66
4.21 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของสถานีไฟฟ้าย่อยแจงร้อน
เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และข้อกำหนดฯ..... 67
4.22 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของสถานีไฟฟ้าย่อยคอต่อ
เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และข้อกำหนดฯ..... 67
4.23 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของสถานีไฟฟ้าย่อยสำโรง bay 1
เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และข้อกำหนดฯ..... 68
4.24 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของสถานีไฟฟ้าย่อยสำโรง bay 2
เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และข้อกำหนดฯ..... 68
4.25 สรุปผลการวิเคราะห์แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมภายในสถานีไฟฟ้าย่อย..... 70
5.1 การคำนวณหาอันดับของฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่สถานีไฟฟ้าย่อยต่างๆ..... 76
5.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การเกิดเรโซแนนซ์ที่สถานีไฟฟ้าย่อย..... 94
6.1 ผลการคำนวณหาค่า Pec-r(pu) ของข้อมูลจาก test report..... 108
6.2 การเปรียบเทียบปริมาณโหลดที่หม้อแปลงได้รับกับเปอร์เซนต์การลดลงของ
พิกัดหม้อแปลง..... 109

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

2.1 วงจรมาตรฐานของเครื่องแปลงผันกำลังสถิต แบบ 6 พัลส์..... 7

2.2 รูปคลื่นกระแสของเครื่องแปลงผันกำลังสถิตแบบอุดมคติ..... 8

2.3 วงจรสมมูลของเครื่องแปลงผันกำลังสถิต..... 8

2.4 วงจรของแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง..... 10

2.5 รูปคลื่นของกระแสที่ได้จากแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง..... .11

2.6 การสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเมื่อไม่คิดผลของ hysteresis loss..... 12

2.7 การสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเมื่อคิดผลของ hysteresis loss..... 12

2.8 ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงกรณีมีฟลักซ์แม่เหล็ก ตกค้างและไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง..... 13

2.9 ตัวอย่างกระแสอินรัชของหม้อแปลงขนาด 5 MVA Br=1.3T 13

2.10 รูปวงจรการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์..... 14

2.11 รูปแบบชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายกระแส..... 15

2.12 ตัวอย่างของระบบเตาหลอม..... 16

2.13 การเปรียบเทียบปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของช่วงหลอมกับช่วงที่ทำให้บริสุทธิ์..... 16

2.14 แบบจำลองของเตาหลอมแบบอาร์ก..... 17

2.15 วงจรพื้นฐานของชุดควบคุมการทำงานแบบ Integral cycle..... 17

2.16 รูปคลื่นของแรงดันของชุดควบคุมการทำงานแบบ Integral cycle..... 18

3.1 รูปแบบของระบบไฟฟ้ากำลัง..... 21

3.2 การใช้งานชุดตัวเก็บประจุแบบมีสายป้อน 1 ชุดจ่ายให้กับชุดตัวเก็บประจุ..... 23

3.3 การใช้งานชุดตัวเก็บประจุแบบใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ร่วมกับสายป้อนที่ตู้สวิตช์เกียร์..... 23

3.4 การใช้งานชุดตัวเก็บประจุแบบร่วมกับสายป้อน..... 24

3.5 การใช้งานชุดตัวเก็บประจุแบบมีสายป้อน 1 ชุดจ่ายให้กับชุดตัวเก็บประจุขนาด 3.6 MVAr..... 24

3.6รูปแบบการต่อใช้งานชุดตัวเก็บประจุขนาด 3.6 MVAr ในสถานีไฟฟ้าย่อยฯ..... 25

3.7 การตรวจวัดปริมาณกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกในสถานีไฟฟ้าย่อย..... 28
4.1 รูปแบบการจ่ายโหลดของสถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด bay1..... 36
4.2 รูปแบบการจ่ายโหลดของสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต..... 36
4.3 รูปแบบการจ่ายโหลดของสถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด bay1..... 37
4.4 รูปแบบการจ่ายโหลดของสถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม..... 37
4.5 รูปแบบการจ่ายโหลดของสถานีไฟฟ้าย่อยชั่วคราวแจงร้อน..... 38
4.6 รูปแบบการจ่ายโหลดของสถานีไฟฟ้าย่อยชั่วคราวคอต่อ..... 38
4.7 รูปแบบการจ่ายโหลดของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง..... 39
4.8 กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสายป้อน BK-12 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 53
4.9 กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสายป้อน BK-13 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 53
4.10 กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสายป้อน BK-14 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 53
4.11 กระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ของสายป้อน KS-14 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 54
4.12 กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสายป้อน KS-14 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 54
4.13 กระแสฮาร์มอนิกที่ 9 ของสายป้อน KS-22 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 54
4.14 กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสายป้อน KS-31 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 55
4.15 กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสายป้อน KS-32 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 55
4.16 กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสายป้อน KS-35 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 55
4.17 กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสายป้อน KS-36 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 56
4.18 กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสายป้อน SO-11 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 56
4.19 กระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสายป้อน SO-21 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 56
4.20 กระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ของสายป้อน SO-22 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 57
4.21 กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสายป้อน SO-22 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 57
4.22 กระแสฮาร์มอนิกที่ 6 ของสายป้อน SO-22 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 57
4.23 กระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสายป้อน SO-22 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 58
4.24 กระแสฮาร์มอนิกที่ 8 ของสายป้อน SO-22เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 58
4.25 กระแสฮาร์มอนิกที่ 9 ของสายป้อน SO-22 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 58
4.26 กระแสฮาร์มอนิกที่ 11 ของสายป้อน KO-411 เปรียบเทียบกับIEEE Std 519..... 59
4.27 กระแสฮาร์มอนิกที่ 11 ของสายป้อน KO-411 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 59

4.28 กระแสฮาร์มอนิกที่ 13 ของสายป้อน KO-411 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 59
4.29 กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสายป้อน KO-413 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 60
4.30 กระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสายป้อน KO-413 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 60
4.31 กระแสฮาร์มอนิกที่ 11 ของสายป้อน KO-413 เปรียบเทียบกับIEEE Std.519..... 60
4.32 กระแสฮาร์มอนิกที่ 11 ของสายป้อน KO-413 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 61
4.33 กระแสฮาร์มอนิกที่ 13 ของสายป้อน KO-413 เปรียบเทียบกับIEEE Std.519..... 61
4.34 กระแสฮาร์มอนิกที่ 13 ของสายป้อน KO-413 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 61
4.35 กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสายป้อน SR-12 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 62
4.36 กระแสฮาร์มอนิกที่ 6 ของสายป้อน SR-12 เปรียบเทียบกับIEEE Std.519..... 62
4.37 กระแสฮาร์มอนิกที่ 6 ของสายป้อน SR-12 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 62
4.38 กระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสายป้อน SR-12 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 63
4.39 กระแสฮาร์มอนิกที่ 6 ของสายป้อน SR-27 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 63
4.40 กระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสายป้อน SR-27 เปรียบเทียบกับข้อกำหนดฯ..... 63
5.1 การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานเนื่องจากการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ..... 72
5.2 รูปแบบของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ใช้ในการวิเคราะห์เรโซแนนซ์..... 73
5.3 วงจรสมมูลของการเกิดเรโซแนนซ์ที่สถานีไฟฟ้าย่อย..... 73
5.4 อัตราขยายของปริมาณกระแสฮาร์มอนิก สถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด bay1..... 77
5.5 อัตราขยายของปริมาณกระแสฮาร์มอนิก สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay1,2 ขณะมีการใช้ งานชุดตัวเก็บประจุขนาด 3.6 MVAr..... 77
5.6 อัตราขยายของปริมาณกระแสฮาร์มอนิก สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay1,2 ขณะมีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุขนาด 7.2 MVAr..... 78
5.7 อัตราขยายของปริมาณกระแสฮาร์มอนิก สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay3 ขณะมีการใช้งานตัวเก็บประจุขนาด 3.6 MVAr..... 78
5.8 อัตราขยายของปริมาณกระแสฮาร์มอนิก สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay3 ขณะมีการใช้งานตัวเก็บประจุขนาด 7.2 MVAr..... 79
5.9 อัตราขยายของปริมาณกระแสฮาร์มอนิก สถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด bay 1..... 79
5.10 อัตราขยายของปริมาณกระแสฮาร์มอนิก สถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay 1..... 80
5.11 อัตราขยายของปริมาณกระแสฮาร์มอนิก สถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay 2..... 80

5.12 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด bay1..... 82
5.13อัตราขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด bay1..... 82
5.14การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด bay1..... 83
5.15อัตราขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด bay1..... 83
5.16การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay1,2..... 84
5.17อัตราขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay1,2..... 84
5.18 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay1,2..... 85
5.19อัตราขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay1,2..... 85
5.20 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay3..... 86
5.21อัตราขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay3..... 86
5.22 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay3..... 87
5.23 อัตราขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay3..... 87
5.24การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด bay1..... 88
5.25อัตราขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด bay1..... 88
5.26การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัดbay1..... 89
5.27อัตราขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด bay1..... 89
5.28การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay1..... 90
5.29อัตราขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay1..... 90
5.30การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสถานีไฟฟ้าย่อยสำโรง bay1..... 91
5.31อัตราขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay1..... 91

5.32การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay2..... 92
5.33อัตราขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay2..... 92
5.34การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay2..... 93
5.35อัตราขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay2..... 93
5.36ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 60871-1997
ของสถานีไฟฟ้าย่อย บางปลากด bay 1..... 95
5.37 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 60871-1997
ของสถานีไฟฟ้าย่อย บางปลากด bay 1..... 95
5.38 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 60871-1997
ของสถานีไฟฟ้าย่อย คลองสรรพาสามิต bay 1,2..... 96
5.39 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 60871-1997
ของสถานีไฟฟ้าย่อย คลองสรรพาสามิต bay 1,2..... 96
5.40 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 60871-1997
ของสถานีไฟฟ้าย่อย คลองสรรพาสามิต bay 3..... 97
5.41 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 60871-1997
ของสถานีไฟฟ้าย่อย คลองสรรพาสามิต bay 3..... 97
5.42 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 60871-1997
ของสถานีไฟฟ้าย่อย ไม้อัด bay 1..... 98
5.43 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 60871-1997
ของสถานีไฟฟ้าย่อย ไม้อัด bay 1..... 98
5.44 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 60871-1997
ของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay 1..... 99
5.45 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 60871-1997
ของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay 1..... 99
5.46 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 60871-1997
ของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay 2..... 100
5.47 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 60871-1997
ของสถานีสับเปลี่ยนสำโรง bay 2..... 100

6.1 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสโหลดในหม้อแปลงไฟฟ้า..... 102
6.2 พิกัดของหม้อแปลง bay 1 สถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด..... 110
6.3 พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1 สถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด..... 110
6.4กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 ของหม้อแปลง bay1 สถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด..... 110
6.5กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay1..... 111
6.6กระแสฮาร์มอนิกที่ 7 เปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay1..... 111
6.7ผลรวมกระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay1..... 111
6.8พิกัดของหม้อแปลง bay 1 สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต 112
6.9พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay1สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต..... 112
6.10กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของหม้อแปลง bay1 สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต..... 112
6.11กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เปรียบเทียบกับ พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1..... 113
6.12ผลรวมกระแสฮาร์มอนิก เปรียบเทียบกับ พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1..... 113
6.13พิกัดของหม้อแปลง bay 2 สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต..... 114
6.14พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay2 สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต..... 114
6.15กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของหม้อแปลง bay2 สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต..... 114
6.16กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 2..... 115
6.17ผลรวมกระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 2..... 115
6.18พิกัดของหม้อแปลง bay 3 สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต..... 116
6.19พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 3 สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต..... 116
6.20กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของหม้อแปลง bay3 สถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต..... 116
6.21กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 3..... 117
6.22ผลรวมกระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 3..... 117
6.23พิกัดของหม้อแปลง bay 1 สถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด..... 118
6.24พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1 สถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด..... 118
6.25กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 ของหม้อแปลง bay1 สถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด..... 118
6.26กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เปรียบเทียบกับ พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1..... 119
6.27กระแสฮาร์มอนิกที่ 7 เปรียบเทียบกับ พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1..... 119
6.28ผลรวมกระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1..... 119

6.29พิกัดของหม้อแปลง bay 1 สถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม..... 120
6.30พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1 ที่สถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม..... 120
6.31กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 ของหม้อแปลง bay1 สถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม..... 120
6.32กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1..... 121
6.33กระแสฮาร์มอนิกที่ 7 เปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1..... 121
6.34ผลรวมกระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1..... 121
6.35พิกัดของหม้อแปลง bay 2 สถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม..... 122
6.36พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 2 สถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม..... 122
6.37กระแสฮาร์มอนิกที่5และ 7 ที่หม้อแปลง bay2 สถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม..... 122
6.38กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 2..... 123
6.39กระแสฮาร์มอนิกที่ 7 เปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 2..... 123
6.40ผลรวมกระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 2..... 123
6.41พิกัดของหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าย่อยแจงร้อน..... 124
6.42พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าย่อยแจงร้อน..... 124
6.43กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าย่อยแจงร้อน..... 124
6.44กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง..... 125
6.45ผลรวมกระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง..... 125
6.46พิกัดของหม้อแปลง bay 1 สถานีสับเปลี่ยนสำโรง..... 126
6.47พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1 สถานีสับเปลี่ยนสำโรง..... 126
6.48กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของหม้อแปลง bay1 สถานีสับเปลี่ยนสำโรง..... 126
6.49กระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1..... 127
6.50ผลรวมกระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 1..... 127
6.51พิกัดของหม้อแปลง bay 2 สถานีสับเปลี่ยนสำโรง..... 128
6.52พิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 2 สถานีสับเปลี่ยนสำโรง..... 128
6.53กระแสฮาร์มอนิกที่ 7 ของหม้อแปลง bay2 สถานีสับเปลี่ยนสำโรง..... 128
6.54กระแสฮาร์มอนิกที่ 7 เปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 2..... 129
6.55ผลรวมกระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับพิกัดที่ลดลงของหม้อแปลง bay 2..... 129

6.56พิกัดของหม้อแปลงขนาด 30/40 MVAที่สถานีไฟฟ้าย่อยไม้อัด bay1
เปรียบเทียบกับสถานีไฟฟ้าย่อยคลองสรรพาสามิต bay 3..... 131
6.57พิกัดของหม้อแปลงขนาด 36/48/60 MVAที่สถานีไฟฟ้าย่อยสวนส้ม
เปรียบเทียบกับสถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด bay 1..... 131
6.58พิกัดของหม้อแปลงขนาด 36/48/60 MVAที่สถานีสับเปลี่ยนสำโรง
เปรียบเทียบกับสถานีไฟฟ้าย่อยบางปลากด bay 1..... 131

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย