การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว

นาย สมพร ฮะวังจู

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-110-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 15945204 1

OPTIMUM DESIGN OF A SINGLE-TUNED HARMONIC CURRENT FILTER

Mr. Somphorn Hawangju

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 1999

ISBN 974-333-110-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว
โดย	นาย สมพร ฮะวังจู
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กีระนันทน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

.....กรรมการ
(นาย พงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สมพร ฮะวังจู : การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว
(OPTIMUM DESIGN OF A SINGLE-TUNED HARMONIC CURRENT FILTER)
อ.ที่ปรึกษา : อ.ไชยะ แซ่มซ้อย , 99 หน้า. ISBN 974-333-110-7

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว เพื่อจำกัดระดับกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก และ ชดเชยกำลังรีแอกทีฟ เพื่อการปรับปรุงคุณภาพและประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า โดยทำการคำนวณหาขนาดของตัวกรองที่ใช้ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำที่มีจำหน่ายในประเทศที่มีราคารวมต่ำสุด และจำกัดการไหลของกระแสฮาร์มอนิกจากโรงงานอุตสาหกรรมเข้าสู่ระบบ ที่จุดต่อร่วมให้ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดของมาตรฐานด้านฮาร์มอนิก

โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ สามารถใช้วิเคราะห์หาแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิกที่แต่ละลำดับ ที่ไหลผ่านไปยังอุปกรณ์ และจุดต่อร่วม นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาขนาดที่เหมาะสมของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว อันจะเป็นแนวทางปฏิบัติในการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าต่อไป

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต สมพร ฮะวังจู
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา พ.ศ. 2543	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4070450321: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: HARMONIC CURRENT FILTER / OPTIMUM
SOMPHORN HAWANGJU : OPTIMUM DESIGN OF A SINGLE-TUNED HARMONIC CURRENT FILTER. THESIS ADVISOR : CHAIYA CHAMCHOY 99 pp.
ISBN 974-333-110-7

This research presents the design of a single-tuned harmonic current filter which is used to limit the level of harmonic current and voltage and compensate reactive power. This method will improve the quality and efficiency of an electrical system. Size of the available capacitor and inductor which give minimum cost are calculated. The limitation of harmonic current flow from an industrial plant into the system at the point of common coupling(PCC) as given in the utility regulation is also achieved.

The developed computer program can be used to analyze harmonic voltage and current flowing to equipment in each order and at the PCC. Moreover , the program can also select the suitable single-tuned harmonic current filter size which is a guideline before an installation of harmonic filters will be completed in the electrical system.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา พ.ศ. 2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และ คุณพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

อนึ่ง เนื่องจากทุนการศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิตทั้งหมดนี้ ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วยที่ได้เล็งเห็นความสำคัญต่อการศึกษาระดับสูงของนิสิตนักศึกษา ซึ่งจะเป็นการวางรากฐานที่สำคัญอันจะนำไปสู่การพัฒนาของประเทศไทยอย่างแท้จริง

ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่น้องที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา และทุก ๆ ท่านที่มีส่วนช่วยเหลือ อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นาย สมพร ฮะวังจู

กันยายน 2542

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฏ

บทที่

1. บทนำ..... 1

1.1 แนวเหตุผล..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 2

1.3 ขอบเขตโครงงานวิทยานิพนธ์..... 2

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน..... 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์..... 3

2. หลักพื้นฐานของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกและการประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้า..... 4

2.1 ตัวเก็บประจุ..... 4

2.2 ตัวเหนี่ยวนำ..... 5

2.3 ตัวประกอบกำลังและการชดเชย..... 6

2.3.1 ตัวประกอบกำลัง..... 6

2.3.2 การชดเชยกำลังรีแอกทีฟ..... 7

2.3.3 ประโยชน์จากการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ..... 8

2.4 ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว..... 8

2.4.1 โครงสร้าง หน้าที่ และการทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก..... 8

2.4.2 การออกแบบ และคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรตัวกรอง..... 12

2.5 การประยุกต์ใช้งานตัวกรองในระบบไฟฟ้า..... 16

3. การคำนวณขนาดตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว..... 17
3.1 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก..... 17
3.1.1 แบบจำลองของระบบไฟฟ้า..... 19
3.1.2 แบบจำลองของหม้อแปลง..... 19
3.1.3 แบบจำลองของโหลดประเภทมอเตอร์..... 20
3.1.4 แบบจำลองของโหลดเชิงเส้น..... 21
3.1.5 แบบจำลองของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก..... 22
3.2 ลักษณะของปัญหา..... 22
3.2.1 รูปแบบของปัญหา..... 23
3.2.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์..... 25
3.3 การแก้ปัญหา..... 27
3.3.1 การวิเคราะห์สร้างทางเลือก..... 28
3.3.2 การตรวจสอบระดับจำกัดของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก..... 34
3.4 ขั้นตอนการคำนวณ..... 36
4. มาตรฐานทางฮาร์มอนิกและตัวเก็บประจุ..... 40
4.1 มาตรฐานฮาร์มอนิก..... 40
4.1.1 มาตรฐานการไฟฟ้าฯ..... 40
4.1.2 มาตรฐาน IEC 1000-2-2-1990 และ 1000-2-4 -1994..... 42
4.1.3 มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992..... 44
4.2 มาตรฐานตัวเก็บประจุ..... 47
4.2.1 มาตรฐานตัวเก็บประจุ..... 47
5. ผลการคำนวณและตัวอย่างการวิเคราะห์..... 50
5.1 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... 50
5.2 การป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบ..... 52
5.2.1 ข้อมูลระบบไฟฟ้า ข้อมูลหม้อแปลงและข้อมูลโหลด..... 52
5.2.2 ข้อมูลสำหรับการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก..... 54
5.3 การแสดงผลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... 57
5.3.1 ผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบ..... 57

5.3.2 ผลขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ..... 59
5.3.3 กราฟผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบ..... 60
5.4 ระบบตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ..... 64
5.5 สรุป..... 87
6. สรุปและข้อเสนอแนะ..... 88
รายการอ้างอิง..... 90
ภาคผนวก..... 92
ภาคผนวก ก. ราคาตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ..... 93
ประวัติผู้เขียน..... 99

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

3.1 ขั้นตอนการปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟชดเชย..... 31

3.2 ผลการปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก..... 31

3.3 ขั้นตอนการปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟชดเชย..... 33

4.1 ขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม *(PCC)..... 41

4.2 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆ
ที่จุดต่อร่วม*(PCC)(รวมทั้งความผิดเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)..... 41

4.3 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดันต่ำ (415/240 Volt)..... 42

4.4 ค่าจำกัดของระดับฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ(ไม่รวมฮาร์มอนิกที่เป็นพหุคูณของ 3)..... 43

4.5 ค่าจำกัดของระดับฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ(ฮาร์มอนิกที่เป็นพหุคูณของ3ลำดับคี่)..... 44

4.6 ค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม (THD)..... 44

4.7 ค่าจำกัดกระแสฮาร์มอนิกตาม IEEE Std.519-1992..... 45

4.8 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิก ตาม IEEE Std.519-1992..... 47

4.9 ขีดจำกัดของตัวเก็บประจุที่กำหนดโดยมาตรฐาน ANSI/IEEE 18-1992..... 48

4.10 ขีดจำกัดแรงดันของตัวเก็บประจุ ที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 60831-1 (1996)..... 48

5.1 ข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างที่ 1..... 65

5.2 ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก Harmonic Load ของตัวอย่างที่ 1..... 65

5.3 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 1..... 65

5.4 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 1..... 66

5.5 ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบของตัวอย่างที่ 1..... 66

5.6 ข้อมูลการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 1..... 66

5.7 ข้อมูลช่วงของจุดปรับคลื่นของตัวอย่างที่ 1..... 67

5.8 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 1..... 67

5.9 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 1..... 67

5.10 ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบของตัวอย่างที่ 1..... 68

5.11 ขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5^{th} ของตัวอย่างที่ 1..... 68
5.12 ข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างที่ 2..... 71
5.13 ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก Harmonic Load ของตัวอย่างที่ 2..... 71
5.14 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 2..... 71
5.15 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 2..... 72
5.16 ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบของตัวอย่างที่ 2..... 72
5.17 ข้อมูลการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 2..... 72
5.18 ข้อมูลช่วงของจุดปรับคลื่นของตัวอย่างที่ 2..... 73
5.19 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 2..... 73
5.20 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 2..... 73
5.21 ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบของตัวอย่างที่ 2..... 74
5.22 ผลการวิเคราะห์การปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟตามตัวอย่างตารางที่ 3.3..... 74
5.23 ขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5^{th} ของตัวอย่างที่ 2..... 76
5.24 ขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7^{th} ของตัวอย่างที่ 2..... 76
5.25 ขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11^{th} ของตัวอย่างที่ 2..... 77
5.26 ข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างที่ 3..... 80
5.27 ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก Harmonic Load ของตัวอย่างที่ 3..... 80
5.28 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 3..... 80
5.29 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 3..... 81
5.30 ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบของตัวอย่างที่ 3..... 81
5.31 ข้อมูลการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 3..... 81
5.32 ข้อมูลช่วงของจุดปรับคลื่นของตัวอย่างที่ 3..... 82
5.33 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 3..... 82
5.34 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 3..... 82
5.35 ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบของตัวอย่างที่ 3..... 83
5.36 ผลการวิเคราะห์การปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟตามตัวอย่างตารางที่ 3.2..... 83
5.37 ขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5^{th} ของตัวอย่างที่ 3..... 84
5.38 ขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7^{th} ของตัวอย่างที่ 3..... 84

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

2.1 ภาพตัวของตัวเก็บประจุกำลังที่ใช้ปรับค่าตัวกระกอบกำลัง..... 5

2.2 ภาพตัวของตัวเหนี่ยวนำกำลัง..... 6

2.3 สามเหลี่ยมกำลัง..... 6

2.4 การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง..... 7

2.5 โครงสร้างของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว..... 9

2.6 วงจรสมมูลของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว..... 10

2.7 ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยวเทียบกับความถี่..... 11

2.8 ระบบไฟฟ้าที่ต่อตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก..... 16

3.1 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล..... 17

3.2 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิกใดๆ..... 18

3.3 ระบบไฟฟ้าตัวอย่าง..... 18

3.4 แบบจำลองของระบบไฟฟ้า..... 19

3.5 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า..... 20

3.6 แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้า..... 20

3.7 แบบจำลองของโหลดเชิงเส้น..... 21

3.8 แบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก..... 22

3.9 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุ(Capacitor)
เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า..... 23

3.10 ลักษณะการไหลของกระแสฮาร์มอนิกหลังจากติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก
(Harmonic Current Filter) ในระบบไฟฟ้า..... 25

3.11 ฟังก์ชันราคาลงทุนของตัวเก็บประจุ..... 27

3.12 การขยับค่าขนาดกำลังงานรีแอกทีฟของตัวกรองทุกลำดับ..... 28

3.13 ค่าขนาดกับราคาของตัวเหนี่ยวนำ..... 30

3.14 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก..... 37

3.15 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยวที่มีราคาต่ำที่สุด... 39
5.1 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบที่ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... 50
5.2 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... 51
5.3 หน้าจอหลักของตัวโปรแกรม..... 52
5.4 หน้าจอรับข้อมูลต่างๆ ของตัวโปรแกรม..... 53
5.5 หน้าจอรับข้อมูลโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก..... 54
5.6 หน้าจอรับข้อมูลเกี่ยวกับตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก..... 55
5.7 หน้าจอรับข้อมูลตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำที่แรงดัน 400 Volt..... 56
5.8 หน้าจอรับข้อมูลตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำที่แรงดัน 525 Volt..... 56
5.9 ผลวิเคราะห์ระบบก่อนติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก..... 57
5.10 ผลวิเคราะห์ระบบก่อนติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก(ต่อ)..... 58
5.11 ผลวิเคราะห์ระบบหลังติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก..... 58
5.12 ผลวิเคราะห์ระบบหลังติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก(ต่อ)..... 59
5.13 ผลขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ ลำดับต่างๆ..... 59
5.14 กราฟความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกของแรงดันที่ลำดับต่างๆ ด้านแรงดันสูง..... 60
5.15 กราฟแรงดันฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ ด้านแรงดันสูง..... 61
5.16 กราฟความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกของกระแสที่ลำดับต่างๆ ด้านแรงดันสูง..... 61
5.17 กราฟกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ ด้านแรงดันสูง..... 62
5.18 หน้าจอแสดงค่าจำกัดของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกของการไฟฟ้าฯ..... 63
5.19 หน้าจอแสดงค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิก IEC 1000-2-2 และ 1000-2-4..... 63
5.20 หน้าจอแสดงค่าจำกัดของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก IEEE Std. 519- 1992..... 64
5.21 ไดอะแกรมตัวอย่างโรงงานที่ 1..... 64
5.22 สเปคตรัมของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันที่จุดต่อร่วมตัวอย่างที่ 1..... 69
5.23 สเปคตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมตัวอย่างที่ 1..... 69
5.24 สเปคตรัมของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสที่จุดต่อร่วมตัวอย่างที่ 1..... 70
5.25 สเปคตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมตัวอย่างที่ 1..... 70
5.26 สเปคตรัมของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันที่จุดต่อร่วมตัวอย่างที่ 2..... 77
5.27 สเปคตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมตัวอย่างที่ 2..... 78

5.28 สเปคตรัมของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสที่จุดต่อร่วมตัวอย่างที่ 2..... 78
5.29 สเปคตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมตัวอย่างที่ 2..... 79
5.30 สเปคตรัมของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันที่จุดต่อร่วมตัวอย่างที่ 3..... 85
5.31 สเปคตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมตัวอย่างที่ 3..... 85
5.32 สเปคตรัมของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสที่จุดต่อร่วมตัวอย่างที่ 3..... 86
5.33 สเปคตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมตัวอย่างที่ 3..... 86