การประเมินหาระดับความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังแรงดันปานกลาง

นาย ดลธนา วราชิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-106-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16952650

ASSESSMENT OF CURRENT AND VOLTAGE DISTORTION IN MEDIUM VOLTAGE POWER SYSTEMS

Mr. Dontana Warachit

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 974-333-106-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินหาระดับความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังแรงดันปานกลาง
โดย	นาย ดลธนา วราชิต
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ไชยะ แช่มช้อย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---------- ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

---------- อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ไชยะ แช่มช้อย)

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

---------- กรรมการ
(นาย พงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์)

ดลธนา วราชิต : การประเมินความผิดเพี้ยนแรงดันและกระแสในระบบแรงดันปานกลาง (ASSESSMENT OF CURRENT AND VOLTAGE DISTORTION IN MEDIUM VOLTAGE POWER SYSTEMS) อ. ที่ปรึกษา : อ. ไชยะ แซ่มช้อย ; 201 หน้า
ISBN 974-333-106-9

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษาการประเมินระดับจำกัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังแรงดันปานกลางตามมาตรฐาน IEC 1000-3-6 การวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายจะใช้วิธีการประมาณค่าแบบต่างๆ 5 แบบโดยพิจารณาถึงผลของรูปแบบโครงข่ายของระบบไฟฟ้า คุณสมบัติของผู้ใช้ไฟฟ้า ตลอดจนอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า เช่น ชุดตัวเก็บประจุ โดยใช้แบบจำลองของ CIGRE แทนระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่างๆ การวิเคราะห์ทำกับระบบไฟฟ้าตัวอย่างในมาตรฐาน และ ระบบไฟฟ้าตัวอย่างของการไฟฟ้านครหลวง ผลการวิเคราะห์ที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าระดับจำกัดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าพบว่ามีระดับที่แตกต่างกันมากทั้งนี้ขึ้นกับวิธีการประมาณค่า ตำแหน่งและขนาดของผู้ใช้ไฟฟ้า และการเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ ในระบบไฟฟ้าด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต ดลธนา วราชิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา พ.ศ. 2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4070273621: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: HARMONIC CURRENT VOLTAGE LIMITS / ASSESSMENT
DONTANA WARACHIT : ASSESSMENT OF CURRENT AND VOLTAGE DISTORTION IN MEDIUM VOLTAGE POWER SYSTEMS. THESIS ADVISOR : CHAIYA CHAMCHOY 201 pp. ISBN 974-333-106-9

This thesis emphasizes on the assessment of current and voltage distortion in medium voltage power system , following IEC 1000-3-6 standard. The level of harmonic currents in each order at individual customer will be evaluated by applying 5 approximation methods using CIGRE models to represent an electrical system and equipment. The calculations will consider effects of an electrical network, customer's characteristic, and all the equipment connected to the system such as capacitor bank. The system in the IEC standard and Metropolitan Electrical Authority(MEA) have been analyzed. It is found that the result from the calculations and the harmonic limits from MEA are significantly different. This is because of the approximation method, location and size of customers and resonant condition in the system.

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต	Dontana Warachit
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	Ch. Chamchoy
ปีการศึกษา	พ.ศ. 2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ไชยะ แช่มช้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

อนึ่ง เนื่องจากทุนการศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิตทั้งหมดนี้ ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย ที่ได้เล็งเห็นความสำคัญต่อการศึกษาระดับสูงของนิสิตนักศึกษา ซึ่งจะเป็นการวางรากฐานที่สำคัญอันจะนำไปสู่การพัฒนาของประเทศไทย อย่างแท้จริง

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา – มารดา ที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา และเพื่อน พี่ ทุก ๆ ท่าน และ สิ่งศักดิ์สิทธิ์ ที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ดลธนา วราชิต

กันยายน 2542

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฒ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 แนวเหตุผล 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตโครงงานวิทยานิพนธ์ 2

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 3

2. หลักการประเมินเกณฑ์ฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEC 4

2.1.นิยามเบื้องต้น 4

2.1.1 ระดับความเข้ากันได้(Compatibility levels) 4

2.1.2 ระดับฮาร์มอนิกที่วางแผนโดยผู้จ่ายไฟฟ้า(Planning levels) 5

2.1.3 คุณภาพแรงดัน(Voltage Quality) 6

2.1.4 กฎการรวม(summation law) 7

2.1.4.1 กฎการรวมแบบที่ 1 7

2.1.4.2 กฎการรวมแบบที่ 2 8

2.2 หลักการคำนวณค่าจำกัดการแพร่ (Emission Limits)ตามหลักการมาตรฐาน IEC.. 9

2.2.1 ระดับที่ 1 ประเมินค่าความผิดเพี้ยนที่ปล่อยสู่ระบบอย่างง่าย 9

2.2.2 ระดับที่ 2 ประเมินค่าความผิดเพี้ยนที่ปล่อยสู่ระบบไฟฟ้า
โดยคิดปัจจัยรูปแบบโครงข่ายจริงของระบบไฟฟ้า 10

2.2.2.1 การคำนวณค่าความสามารถยอมรับฮาร์มอนิกของภาระทั้งหมด 11

2.2.2.1.1 ค่าความสามารถยอมรับแรงดันฮาร์มอนิกของ
ภาระทั้งหมดประมาณแบบที่1 11

หน้า

2.2.2.1.2 ค่าความสามารถยอมรับแรงดันฮาร์มอนิกของ
ภาระทั้งหมดประมาณแบบที่2 13
2.2.2.2 ค่าระดับจำกัดการแพร่ฮาร์มอนิกของแต่ละ
ผู้ใช้ไฟฟ้า(Individual emission limits) 14
2.2.2.2.1 ค่าระดับจำกัดการแพร่ฮาร์มอนิกของแต่ละ
ผู้ใช้ไฟฟ้าประมาณแบบที่ 1 15
2.2.2.2.2 ค่าระดับจำกัดการแพร่ฮาร์มอนิกของแต่ละ
ผู้ใช้ไฟฟ้าประมาณแบบที่ 2 15
2.2.2.2.3 ค่าระดับจำกัดการแพร่ฮาร์มอนิกของแต่ละ
ผู้ใช้ไฟฟ้าประมาณแบบที่ 3 16
2.2.3 ระดับที่ 3 การยอมรับค่าความผิดเพี้ยนที่ปล่อยสู่ระบบไฟฟ้าใน
กรณีพิเศษหรือระดับล่อแหลม 19
3. ตัวอย่างการประยุกต์เพื่อประเมินค่าระดับจำกัดฮาร์มอนิกตาม
มาตรฐาน IEC 22
3.1 รูปแบบโครงข่ายระบบไฟฟ้าตัวอย่างและสมมติฐาน 22
3.2 การคำนวณค่าระดับจำกัดการแพร่ฮาร์มอนิกของแต่ละ
ผู้ใช้ไฟฟ้าประมาณแบบที่ 1 24
3.3 การคำนวณค่าระดับจำกัดการแพร่ฮาร์มอนิกของแต่ละ
ผู้ใช้ไฟฟ้าประมาณแบบที่ 2 25
3.4 การคำนวณค่าระดับจำกัดการแพร่ฮาร์มอนิกของแต่ละ
ผู้ใช้ไฟฟ้าประมาณแบบที่ 3 26
3.4.1 การนิยามกลุ่มฮาร์มอนิกไหลสู่สายป้อน 27
3.4.2 การคำนวณหาค่าแรงดันฮาร์มอนิกตอบสนองของระบบไฟฟ้า 27
3.4.3 การคำนวณค่ากระแสจำกัด 29
3.5 บทสรุปผลการคำนวณ 30
4 การพัฒนาโปรแกรม 32
4.1.วัตถุประสงค์ของโปรแกรม 32
4.2.แบบจำลองของอุปกรณ์ (Harmonic modelling) 32
4.2.1 สายป้อน (Feeder) 33
4.2.2 แบบจำลองตัวเก็บประจุ (Capacitor) 33
4.2.3 แบบจำลองของภาระเชิงเส้น(Linear Load) 34

หน้า

4.3.แผนผังโครงสร้างโปรแกรม..... 35
4.3.1 ส่วนการติดต่อกับผู้ใช้งาน..... 36
4.3.2 ส่วนการแปลงแบบจำลอง..... 36
4.3.3 ส่วนวิเคราะห์ระบบโครงข่ายระบบไฟฟ้า..... 37
4.3.4 ส่วนวิเคราะห์ระบบฮาร์มอนิก..... 40
4.4 รูปแบบโปรแกรม..... 40
4.4.1 ส่วนจัดการโครงการ(Project Manager)..... 40
4.4.2 ส่วนกำหนดค่าระดับวางแผน(Planning level)..... 41
4.4.3 ส่วนกำหนดรูปแบบของสถานีไฟฟ้าย่อย (Main substation)..... 42
4.4.4 ส่วนกำหนดรูปแบบโครงข่ายของระบบไฟฟ้า (Network diagram)..... 43
4.4.5 ส่วนแสดงผลค่ายอมรับความผิดเพี้ยนของภาระทั้งหมด (Global contribution)..... 44
4.4.6 ส่วนแสดงผลค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิก (limits)..... 45
5. ตัวอย่างผลการคำนวณ และ การวิเคราะห์ผล..... 46
5.1 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าตัวอย่าง..... 46
5.2 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยดูผลกระทบจากการติดตั้งตัวเก็บประจุ..... 54
5.2.1 ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 600 kVAr แรงดันพิกัด 20 kV..... 55
5.2.2 ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 6000 kVAr แรงดันพิกัด 20 kV..... 61
5.3 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยดูผลของอิมพีแดนซ์ของสายป้อน..... 68
5.3.1 กรณีที่จุดเชื่อมต่อกับสายป้อนของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายห่างกัน 1 กิโลเมตร... 68
5.3.2 กรณีที่จุดเชื่อมต่อกับสายป้อนของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายห่างกัน 10 กิโลเมตร...68
5.3.3 ผลสรุปการเปรียบเทียบผลของอิมพีแดนซ์ของสายป้อน..... 69
5.4 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยดูผลของขนาดของผู้ใช้ไฟฟ้า..... 73
5.5 กรณีศึกษาจากระบบไฟฟ้าจริงของการไฟฟ้านครหลวง..... 81
5.5.1 วิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยแยกตามสายป้อน..... 86
5.5.1.1 ผลการวิเคราะห์ สายป้อน PR411สำหรับกรณีที่ 1..... 86
5.5.1.2 ผลการวิเคราะห์ สายป้อน PR433 บางส่วนสำหรับกรณีที่ 1..... 92
5.5.2 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกกับอันดับที่ฮาร์มอนิก..... 98
5.5.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกกับกรณีต่าง ๆ..103

หน้า

5.5.4 การวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกผู้ใช้ไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าสูงสุดและน้อยสุดในระบบไฟฟ้าสำหรับกรณีที่1 113
6. ข้อสรุปและเสนอแนะ 117
รายการอ้างอิง 119
ภาคผนวก 120
ก. ผลคำนวณค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกจากหัวข้อที่ 5.1 122
ข. กราฟแสดงผลคำนวณค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกจากหัวข้อที่ 5.1 134
ค. แผนผังระบบไฟฟ้าการเชื่อมต่อของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายของสถานีไฟฟ้าย่อยแพรกษา 137
ง. คุณสมบัติของสายป้อน 185 mm^2 ชนิด Spaced Aerial Cable(ASC) 150
จ. ผลคำนวณค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายของสถานีไฟฟ้าย่อยแพรกษา 150
ประวัติผู้เขียน 201

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 ระดับความเข้ากันได้สำหรับแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำและปานกลาง (ในรูป % ของแรงดันปกติของระบบ)..... 5

2.2 ค่าตัวอย่างของค่าวางระดับฮาร์มอนิกที่วางแผนโดยผู้จ่ายไฟฟ้า(Planning levels) ในระบบไฟฟ้ากำลังแรงดันต่ำ ,ปานกลาง,สูง (ในรูปของร้อยละของแรงดันปกติ)..... 6

2.3 ค่าที่แสดงค่าปัจจัยหลากหลาย(diversity factor k_{hj})สำหรับกรณีอุปกรณ์ทั่วไป..... 8

2.4 แสดงผลสรุปค่าปัจจัยเอ็กซ์โปเน้นสำหรับฮาร์มอนิก..... 8

2.5 แสดงค่าปัจจัยความถ่วง(Weighting factors)สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ผลิตฮาร์มอนิกในแต่ละชนิด..... 10

2.6 ผลการคำนวณสามารถยอมรับแรงดันฮาร์มอนิกของภาระทั้งหมดในระบบแรงดันต่ำและปานกลาง 13

3.1 ผลการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่จุด PCC ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละสายป้อน หน่วย Ω..... 24

3.2 ผลการคำนวณค่ากระแสจำกัดประมาณแบบที่ 1 ที่จุด PCC ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละสาย..... 25

3.3 ผลการคำนวณค่ากระแสจำกัดประมาณแบบที่ 2 ที่จุด PCC ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละสายป้อน หน่วย %..... 26

3.4 ค่ากระแสฮาร์มอนิกอ้างอิงสมมติ..... 27

3.5 แรงดันฮาร์มอนิกตอบสนองเมื่อใช้กลุ่มฮาร์มอนิกสมมติกำลังไฟฟ้าคงที่..... 28

3.6 ผลการคำนวณค่ากระแสจำกัดประมาณแบบที่ 2 ที่จุด PCC ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละสายป้อน หน่วย % ของกระแสภาระของแต่ละผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าอนุญาต = 500 KVA 29

3.7 ผลสรุปการคำนวณ ทั้ง 3 วิธีการประเมิน..... 30

5.1 ค่าระดับวางแผน..... 47

5.2 ผลคำนวณค่า ความสามารถยอมรับฮาร์มอนิกของภาระทั้งหมด..... 47

5.3 การแบ่งกรณีสำหรับการคำนวณค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับหัวข้อที่ 5.1.. 48

5.4 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุ 600 kVAr ที่จุด 1.. 55

5.5 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุ 600 kVAr ที่จุด 2.. 55
5.6 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุ 600 kVAr ที่จุด 3. 56
5.7 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุ 600 kVAr ที่จุด 4. 56
5.8 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุ 600 kVAr ที่จุด 5..... 57
5.9 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุ 600 kVAr ที่จุด 6..... 57
5.10 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุ 6000 kVAr ที่จุดที่ 1..... 61
5.11 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุ 6000 kVAr ที่จุดที่ 2..... 61
5.12 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุ 6000 kVAr ที่จุดที่ 3..... 62
5.13 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุ 6000 kVAr ที่จุดที่ 4..... 62
5.14 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิก เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 6000 kVAr ที่จุดที่ 5..... 63
5.15 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุ 6000 kVAr ที่จุดที่ 6..... 63
5.16 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับ หัวข้อที่ 5.3.1..... 68
5.17 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับหัวข้อที่ 5.3.2..... 68
5.18 กำลังไฟฟ้าตกลงกับผู้จ่ายไฟฟ้าแต่ละกรณี..... 73
5.19 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกกรณีที่ 1 หัวข้อที่5.4..... 73
5.20 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกกรณีที่ 2 หัวข้อที่5.4..... 74
5.21 ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกรณีที่ 1 และ 2 และหัวข้อที่ 5.4..... 75
5.22 ข้อมูลมิเตอร์ที่ใช้ในการวัดข้อมูลในระบบศึกษา..... 82
5.23 ดัชนีของผู้ใช้ไฟฟ้าบนสายป้อน PR434..... 88
5.24 ผลการวิเคราะห์ผู้ใช้ไฟฟ้าใกล้และไกลจากสถานีไฟฟ้าย่อยของแต่ละสายป้อน สำหรับกรณีที่ 1..... 93

5.25 ผลการวิเคราะห์ผู้ใช้ไฟฟ้าใกล้และไกลจากสถานีไฟฟ้าย่อยของแต่ละสายป้อน สำหรับกรณีที่ 2 94
5.26 ผลการวิเคราะห์ผู้ใช้ไฟฟ้าใกล้และไกลจากสถานีไฟฟ้าย่อยของแต่ละสายป้อน สำหรับกรณีที่ 3 95
5.27 ผลการวิเคราะห์ผู้ใช้ไฟฟ้าใกล้และไกลจากสถานีไฟฟ้าย่อยของแต่ละสายป้อน สำหรับกรณีที่ 4 96
ก.1 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าจำกัดฮาร์มอนิกในกรณีที่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่ด้านแรงดันสูงมีค่า 2500 MVA และ ค่า F_{MV} = 0.4 122
ก.2 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าจำกัดฮาร์มอนิกในกรณีที่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่ด้านแรงดันสูงมีค่า 2500 MVA และ ค่า F_{MV} = 0.6 123
ก.3 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าจำกัดฮาร์มอนิกในกรณีที่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่ด้านแรงดันสูงมีค่า 2500 MVA และ ค่า F_{MV} = 0.8 124
ก.4 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าจำกัดฮาร์มอนิกในกรณีที่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่ด้านแรงดันสูงมีค่า 2500 MVA และ ค่า F_{MV} = 1.0 125
ก.5 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าจำกัดฮาร์มอนิกในกรณีที่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่ด้านแรงดันสูงมีค่า 1000 MVA และ ค่า F_{MV} = 0.4 126
ก.6 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าจำกัดฮาร์มอนิกในกรณีที่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่ด้านแรงดันสูงมีค่า 1000 MVA และ ค่า F_{MV} = 0.6 127
ก.7 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าจำกัดฮาร์มอนิกในกรณีที่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่ด้านแรงดันสูงมีค่า 1000 MVA และ ค่า F_{MV} = 0.8 128
ก.8 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าจำกัดฮาร์มอนิกในกรณีที่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่ด้านแรงดันสูงมีค่า 1000 MVA และ ค่า F_{MV} = 1.0 129
ก.9 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าจำกัดฮาร์มอนิกในกรณีที่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่ด้านแรงดันสูงมีค่า 4000 MVA และ ค่า F_{MV} = 0.4 130
ก.10 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าจำกัดฮาร์มอนิกในกรณีที่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่ด้านแรงดันสูงมีค่า 4000 MVA และ ค่า F_{MV} = 0.6 131
ก.11 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าจำกัดฮาร์มอนิกในกรณีที่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่ด้านแรงดันสูงมีค่า 4000 MVA และ ค่า F_{MV} = 0.8 132
ก.12 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าจำกัดฮาร์มอนิกในกรณีที่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่ด้านแรงดันสูงมีค่า 4000 MVA และ ค่า F_{MV} = 1.0 133
จ.1.1) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 สำหรับกรณีที่ 1 153
จ.1.2) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 สำหรับกรณีที่ 1 156

จ.1.3) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 สำหรับกรณีที่ 1..... 159
จ.1.4) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 สำหรับกรณีที่ 1..... 162
จ.2.1) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 สำหรับกรณีที่ 2..... 165
จ.2.2) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 สำหรับกรณีที่ 2..... 168
จ.2.3) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 สำหรับกรณีที่ 2..... 171
จ.2.4) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 สำหรับกรณีที่ 2..... 174
จ.3.1) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 สำหรับกรณีที่ 3..... 177
จ.3.2) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 สำหรับกรณีที่ 3..... 180
จ.3.3) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 สำหรับกรณีที่ 3..... 183
จ.3.4) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 สำหรับกรณีที่ 3..... 186
จ.4.1) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 สำหรับกรณีที่ 4..... 189
จ.4.2) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 สำหรับกรณีที่ 4..... 192
จ.43) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 สำหรับกรณีที่ 4..... 195
จ.4.4) ผลการคำนวณค่าระดับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 สำหรับกรณีที่ 4..... 198

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

2.1 รูปแสดงแนวคิดเบื้องต้นคุณภาพแรงดันด้วยสถิติทางเวลาและสถานที่ของระบบทั้งหมด 7
2.2 กราฟของโหลดของระบบแรงดันปานกลางและต่ำ 14
2.3 รูปแผนผังสรุปขั้นตอนการประเมินตามมาตรฐาน IEC 1000-3-6 20
3.1 รูปโครงข่ายระบบจำหน่ายแรงดัน 20 KV 23
4.1 รูปวงจรสมมูลของสายป้อนโดยคิดผลของฮาร์มอนิก 33
4.2 รูปวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุโดยคิดผลของฮาร์มอนิก 33
4.3 รูปแบบจำลองของภาระตามแบบ R//L 34
4.4 รูปแบบความสัมพันธ์ของโครงสร้างโปรแกรม 34
4.5 รูปความสัมพันธ์ของส่วนรับข้อมูล และ แสดงผลข้อมูล 35
4.6 แผนผังการทำงานของส่วนการแปลงแบบจำลอง 36
4.7 แผนผังส่วนวิเคราะห์ระบบโครงข่ายระบบไฟฟ้า 38
4.8 แผนผังการทำงานส่วนวิเคราะห์ระบบฮาร์มอนิก 39
4.9 ส่วนจัดการโครงการ 41
4.10 ส่วนกำหนดค่าระดับวางแผน 41
4.11 ส่วนเพิ่มหรือแก้ไขค่าระดับวางแผน 42
4.12 ส่วนกำหนดรูปแบบสถานีไฟฟ้าย่อย 42
4.13 ส่วนกำหนดค่าปัจจัยบนสถานีไฟฟ้าย่อยและบัสหลัก 43
4.14 ส่วนกำหนดรูปแบบโครงข่ายระบบไฟฟ้า 44
4.15 ส่วนแสดงผลค่ายอมรับความผิดเพี้ยนของภาระทั้งหมด 44
4.16 ส่วนแสดงผลค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิก 45
5.1 แผนผังโครงข่ายของผู้ใช้ไฟฟ้าเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า 46
5.2 กราฟค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย 48
5.3 กราฟเปรียบเทียบค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรด้านแรงสูงและ F_{MV} แยกแต่ละวิธีประมาณ 49
5.4 กราฟค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5เทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรด้านแรงสูงและ F_{MV} แยกผู้ใช้ไฟฟ้าต้นทางและปลายทาง 51
5.5 แผนผังโครงข่ายของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับกรณีติดตั้งตัวเก็บประจุ 54

5.6 ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อตัวเก็บประจุ600 kVAr ที่ตำแหน่งต่าง ๆ..... 58
5.7 ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุ6000 kVAr ที่ตำแหน่งต่าง ๆ 64
5.8 ค่าฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์เปรียบเทียบกับตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ 6000 kVAr..... 66
5.9 กราฟเปรียบเทียบค่าระดับจำกัดกระแสเมื่อระยะห่างของจุดเชื่อมต่อแตกต่างกัน..... 69
5.10 กราฟเปรียบเทียบค่าระดับจำกัดกระแสเทียบตามวิธีการประมาณ..... 71
5.11 กราฟเปรียบเทียบค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยการประมาณแบบ
ต่าง ๆ สำหรับกรณีที่ 1 หัวข้อที่ 5.4..... 74
5.12กราฟเปรียบเทียบค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยการประมาณแบบต่าง ๆ
สำหรับกรณีที่ 2 หัวข้อที่ 5.4..... 75
5.13 ค่าเปรียบเทียบระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ตามกรณีของหัวข้อที่ 5.4. 77
5.14 แผนผังของสถานีไฟฟ้าย่อยแพรกษา..... 81
5.15 กราฟค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ของผู้ใช้ไฟฟ้า
ที่ต่อกับสายป้อน PR411..... 86
5.16 กราฟเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์หน้ามิเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้า
แต่ละรายบนสายป้อน PR411..... 86
5.17 กราฟค่าฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของผู้ใช้ไฟฟ้า PM094753 เปรียบเทียบ
กับอันดับที่ของฮาร์มอนิก..... 87
5.18 กราฟเปรียบเทียบค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกกับมาตรฐานของ
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค..... 88
5.19 กราฟค่าฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของผู้ใช้ไฟฟ้า PM116734 เปรียบเทียบ
กับอันดับที่ของฮาร์มอนิก..... 89
5.20 กราฟเปรียบเทียบค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกกับมาตรฐานของ
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค..... 90
5.21 กราฟเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์หน้ามิเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย
บนสายป้อน PR433 บางส่วน..... 92
5.22 กราฟเปรียบเทียบค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ของผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่อ
กับสายป้อน PR433..... 92
5.23 กราฟค่าฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของผู้ใช้ไฟฟ้า PM112453
เปรียบเทียบอันดับที่ฮาร์มอนิก..... 93
5.24 กราฟเปรียบเทียบค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้า PM112453
กับมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค..... 94

5.25 กราฟค่าฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของผู้ใช้ไฟฟ้า PM062726
เปรียบเทียบอันดับที่ฮาร์มอนิก..... 95
5.26 กราฟเปรียบเทียบค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้า PM062726
กับมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค..... 96
5.27 กราฟค่าฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายตามอันดับที่
ฮาร์มอนิกบนสายป้อน PR434..... 98
5.28 กราฟค่าฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์เทียบตามอันดับฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้า
บางราย บนสายป้อน PR434..... 100
5.29 ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย
บนสายป้อน PR34..... 100
5.30 แผนผังแสดงผู้ใช้ไฟฟ้าใกล้และไกลสถานีไฟฟ้าย่อย..... 104
5.31 ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ของผู้ใช้ไฟฟ้า
บนสายป้อน PR411 เปรียบเทียบแต่ละกรณี..... 109
5.32 ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ของผู้ใช้ไฟฟ้า
บนสายป้อน PR412 เปรียบเทียบแต่ละกรณี..... 110
5.33 ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าพิกัดมากที่สุด..... 113
5.34 ค่าระดับจำกัดกระแสฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าพิกัดน้อยที่สุด..... 114
ข) กราฟการเปรียบเทียบระดับจำกัดกระแสเทียบของแต่ละผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละกรณี..... 135