การพัฒนาระบบจำลองการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

นาย พีรยุทธ แสงศิลป์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-639-218-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A MODELING SYSTEM OF HARMONIC CURRENT FLOW IN POWER SYSTEMS

Mr. Peerayuth Saengsilp

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 1997

ISBN 974-639-218-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบจำลองการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง
โดย	นาย พีรยุทธ แสงศิลป์
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ไชยะ แช่มช้อย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ไชยะ แช่มช้อย)

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

.....กรรมการ
(นาย พงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์)

พีรยุทธ แสงศิลป์ : การพัฒนาระบบจำลองการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง (DEVELOPMENT OF A MODELING SYSTEM OF HARMONIC CURRENT FLOW IN POWER SYSTEMS) อ. ที่ปรึกษา : อ. ไชยะ แช่มช้อย ; 145 หน้า. ISBN 974-639-218-2

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้แบบจำลองของสายส่งพลังงานไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่มีอยู่ในระบบตามแบบจำลองของ CIGRE การวิเคราะห์ทำโดยการสร้างเมตริกซ์ความนำ (Y_{BUS}) ที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการวิเคราะห์ทีละความถี่ จากนั้นจึงคำนวณหาค่าแรงดันบัส (V_{BUS}) ที่ความถี่ฮาร์มอนิกนั้น ๆ โดยกำหนดให้แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมีคุณสมบัติเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก

ระบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมานี้ สามารถใช้วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกได้ทั้งขนาดและทิศทางการไหล โดยคำนึงถึงเงื่อนไขต่าง ๆ ที่มีผลต่อการไหลของกระแสฮาร์มอนิก เช่น ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า รูปแบบการต่อชุดขดลวดของหม้อแปลง ตำแหน่งที่ติดตั้งและขนาดของตัวคาปาซิเตอร์ ตลอดจนตำแหน่งที่ติดตั้ง ขนาด และค่าความถี่ที่ต้องการกรองของตัวกรองฮาร์มอนิก

ระบบจำลองนี้ ยังสามารถใช้วิเคราะห์หาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน (THD_V) ที่บัสต่าง ๆ ได้ด้วย ทำให้สามารถวิเคราะห์สมรรถนะของระบบไฟฟ้าในเรื่องฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับมาตรฐานสากลต่าง ๆ ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา พ.ศ. 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

3971238421: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: HARMONIC CURRENT FLOW / SIMULATION
PEERAYUTH SAENGSILP : DEVELOPMENT OF A MODELING SYSTEM OF HARMONIC CURRENT FLOW IN POWER SYSTEMS. THESIS ADVISOR : CHAIYA CHAMCHOY 145 pp. ISBN 974-639-218-2

This thesis emphasizes on the harmonic current flow in electrical power system using CIGRE's model of transmission line and other electrical components existed in the power systems. The procedure is firstly done by forming admittance matrix (Y_{BUS}) at each required harmonic frequency. Then calculate bus voltage (V_{BUS}) at that frequency by assuming harmonic sources as harmonic current sources.

Developed software can analyze harmonic current flow, both in harmonic current amplitude and direction of the flow by taking all conditions that will affect the flow into account, e.g. impedance of power system, configuration of transformer winding, size and location of capacitor bank and also location, size and tuning frequency of harmonic filters.

Furthermore, the software can evaluate total harmonic voltage distortion (THD_v) at various busses. This leads to an assessment of harmonic performance in electrical power system compared to international standards.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา พ.ศ. 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ไชยะ แช่มช้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์และ คุณพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

อนึ่ง เนื่องจากทุนการศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิตทั้งหมดนี้ ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย ที่ได้เล็งเห็นความสำคัญต่อการศึกษาระดับสูงของนิสิตนักศึกษา ซึ่งจะเป็นการวางรากฐานที่สำคัญอันจะนำไปสู่การพัฒนาของประเทศไทยอย่างแท้จริง

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบพระคุณบิดา - มารดาที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา และทุก ๆ ท่านที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

พีรยุทธ แสงศิลป์

พฤษภาคม 2541

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ณ

บทที่

1. บทนำ..... 1

1.1 แนวเหตุผล..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 3

1.3 ขอบเขตโครงการวิทยานิพนธ์..... 3

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน..... 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์..... 4

2. การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง..... 6

3. แบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง..... 16

3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 16

3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า..... 17

3.3 สายส่งพลังงานไฟฟ้า..... 20

3.4 โหลด..... 26

3.5 คาปาซิเตอร์..... 27

3.6 ตัวกรองฮาร์มอนิก..... 27

3.7 คอนเวอร์เตอร์..... 28

4. การคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบจำลอง 35

4.1 การคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิก..... 35

4.1.1 ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านอุปกรณ์และค่าความผิดเพี้ยนทาง

ฮาร์มอนิกรวมของกระแสของอุปกรณ์ต่าง ๆ 39
4.1.2 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสและค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวม ของแรงดันที่บัส 39
4.1.3 ฮาร์มอนิกสเปคตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสและกระแสฮาร์มอนิก ที่ไหลผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ 40
4.2 การคำนวณโหลดโฟล์ว 41
4.3 โครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 43
4.4 การป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบจำลอง 45
4.4.1 การสร้างแผนภาพเส้นเดี่ยว 45
4.4.2 การดึงข้อมูลจากฐานข้อมูล 54
5. ตัวอย่าง ผลการคำนวณ และการวิเคราะห์ 56
5.1 ระบบ 5 บัส 56
5.1.1 กรณีพื้นฐาน 56
5.1.2 กรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก 57
5.1.3 กรณีที่มีตัวกรองฮาร์มอนิก 61
5.1.4 กรณีที่มีตัวกรองฮาร์มอนิกอยู่ที่บัสที่ 5 71
5.1.5 กรณีที่มีหม้อแปลงไฟฟ้า 75
5.1.6 กรณีที่มีคาปาซิเตอร์ 77
5.2 ระบบ IEEE 14 บัส 82
5.2.1 ข้อมูลของระบบ 82
5.2.2 กรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก 84
5.2.3 กรณีที่มีตัวกรองฮาร์มอนิก 86
5.3 ระบบ IEEE 30 บัส 89
5.3.1 ข้อมูลของระบบ 89
5.3.2 การวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกเมื่อแหล่งกำเนิดกระแส ฮาร์มอนิกมากกว่า 1 แหล่ง 90
5.3.2.1 กรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกตัวที่ 1 ที่ บัสที่ 14 91
5.3.2.2 กรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกตัวที่ 2 ที่ บัสที่ 15 93
5.3.2.3 กรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกตัวที่ 1 ที่ บัสที่ 14

และตัวที่ 2 ที่ บัสที่ 15..... 95
5.3.2.4 กรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 2 ตัวและมีตัวกรอง ที่บัสที่ 14..... 97
5.3.2.5 กรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 2 ตัวและมีตัวกรอง ที่บัสที่ 15..... 99
5.3.2.6 กรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 2 ตัวและมีตัวกรอง ที่บัสที่ 12 101
5.4 สรุป..... 104
6. สรุปและข้อเสนอแนะ 106
รายการอ้างอิง..... 108
ภาคผนวก..... 109
ก. ระบบ 5 บัสที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก..... 110
ข. ระบบ 14 บัสที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก 119
ประวัติผู้เขียน..... 145

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

3.1 ค่า tanψ, เทียบกับ S_n 18

3.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของสาย ACSR 25

4.1 รูปภาพอุปกรณ์ต่าง ๆ 45

5.1 (ก) ค่าแรงดันเริ่มต้นและค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 56

5.1 (ข) ค่าอิมพีแดนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์รั่วลงดินของสายส่ง 57

5.2 ข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์ที่บัส 2 58

5.3 ข้อมูลตัวอย่างของระบบทดสอบ

5.3 (ก) ข้อมูลบัส 58

5.3 (ข) ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 58

5.3 (ค) ข้อมูลโหลด 58

5.3 (ง) ข้อมูลของสายส่งพลังงานไฟฟ้า 58

5.4 แรงดันบัสที่ได้จากโปรแกรม 59

5.5 กระแสฮาร์มอนิกที่คอนเวอร์เตอร์ปล่อยออกมา 59

5.6 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในบัสที่ 2 60

5.7 (ก) ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ($\times 10^{-7}$) ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่บัสที่ 2 โดยตัวกรองตั้งความถี่ไว้เพื่อกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และขนาดพิกัดของคาปาซิเตอร์ในตัวกรองฮาร์มอนิกเท่ากับ 1 MVar 63

5.7 (ข) ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ($\times 10^{-7}$) ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่บัสที่ 2 โดยตัวกรองตั้งความถี่ไว้เพื่อกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และขนาดพิกัดของคาปาซิเตอร์ในตัวกรองฮาร์มอนิกเท่ากับ 10 MVar 64

5.8 (ก) ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ($\times 10^{-7}$) ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่บัสที่ 2 โดยตัวกรองตั้งความถี่ไว้เพื่อกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 และขนาดพิกัดของคาปาซิเตอร์ในตัวกรองฮาร์มอนิกเท่ากับ 1 MVar 65

5.8 (ข) ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ($\times 10^{-7}$) ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่บัสที่ 2

โดยตัวกรองตั้งความถี่ไว้เพื่อกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 และขนาดพิกัดของ
คาปาซิเตอร์ในตัวกรองฮาร์มอนิกเท่ากับ 10 MVar..... 66
5.9 (ก) ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ($\times 10^{-7}$) ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่บัสที่ 2
โดยตัวกรองตั้งความถี่ไว้เพื่อกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 และขนาดพิกัดของ
คาปาซิเตอร์ในตัวกรองฮาร์มอนิกเท่ากับ 1 MVar..... 67
5.9 (ข) ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ($\times 10^{-7}$) ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่บัสที่ 2
โดยตัวกรองตั้งความถี่ไว้เพื่อกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 และขนาดพิกัดของ
คาปาซิเตอร์ในตัวกรองฮาร์มอนิกเท่ากับ 10 MVar..... 68
5.10 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ทีบัสที่ 5
เมื่อมีตัวกรองฮาร์มอนิกขนาด 1 MVar..... 72
5.11 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ทีบัสที่ 5
เมื่อมีตัวกรองฮาร์มอนิกขนาด 10 MVar..... 73
5.12 ข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์แบบไม่เป็นรูปแบบ..... 75
5.13 ค่า THD_V และปริมาณกระแสฮาร์มอนิก ($\times 10^{-7}$) ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่บัส 5. 76
5.14 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่บัสที่ 3
เทียบกับกระแสจากคอนเวอร์เตอร์..... 78
5.15 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่บัสที่ 3 เมื่อมีคาปาซิเตอร์
ขนาด 10 MVar เทียบกับกระแสจากคอนเวอร์เตอร์..... 79
5.16 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่บัสที่ 3 เมื่อมีคาปาซิเตอร์
ขนาด 50 MVar เทียบกับกระแสจากคอนเวอร์เตอร์..... 80
5.17 (ก) ข้อมูลของบัสในระบบ IEEE 14 บัส..... 82
5.17 (ข) ข้อมูลของสายส่งในระบบ IEEE 14 บัส 83
5.18 แรงดันบัสที่ความถี่หลักมูลที่ได้จากการคำนวณ..... 84
5.19 ข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์ที่บัส 3..... 84
5.20 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่ บัสที่ 3 เทียบกับ
กระแสจากคอนเวอร์เตอร์..... 85
5.21 เปรียบเทียบแรงดันเมื่อเพิ่มตัวกรองฮาร์มอนิก..... 86
5.22 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่ บัสที่ 3 เมื่อเพิ่มตัวกรอง
ฮาร์มอนิกเทียบกับกระแสจากคอนเวอร์เตอร์..... 87

5.23 แรงดันที่บัสของระบบ IEEE 30 บัส 89
5.24 ข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์ในระบบ IEEE 30 บัส 90
5.25 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่ บัสที่ 14 เทียบกับ
กระแสของคอนเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 92
5.26 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่ บัสที่ 14 เทียบกับ
กระแสของคอนเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 94
5.27 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่ บัสที่ 14
เมื่อมีคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ตัว 96
5.28 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่ บัสที่ 14
เมื่อมีคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ตัว และมีตัวกรองฮาร์มอนิกที่ บัสที่ 14 98
5.29 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่ บัสที่ 14
เมื่อมีคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ตัว และมีตัวกรองฮาร์มอนิกที่ บัสที่ 15 100
5.30 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่ บัสที่ 14
เมื่อมีคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ตัว และมีตัวกรองฮาร์มอนิกที่ บัสที่ 12 102
5.31 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในกรณีต่าง ๆ 103
5.32 เปรียบเทียบค่าแรงดันบัสและค่า THD_V ในกรณีต่าง ๆ 103

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

2.1 ระบบตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หาการไหลของกระแสฮาร์มอนิก..... 6

2.2 วงจรสมมูลของระบบตัวอย่างในรูปที่ 2.1..... 6

2.3 ระบบตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หาการไหลของกระแสฮาร์มอนิก..... 8

2.4 วงจรสมมูลจากรูปที่ 2.3 เพื่อสร้าง Y_{BUS}..... 8

2.5 เมื่อมีคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้า..... 9

2.6 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.5..... 10

2.7 ระบบไฟฟ้าเมื่อมีตัวกรองฮาร์มอนิก..... 12

2.8 วงจรสมมูลของวงจรรูปที่ 2.7..... 13

3.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล..... 16

3.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิก..... 17

3.3 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า..... 17

3.4 วงจรสมมูลของเน็ทเวิร์คลำดับศูนย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส..... 19

3.5 วงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้น..... 21

3.6 วงจรสมมูลของสายส่งระยะปานกลาง..... 21

3.7 วงจรสมมูลของสายส่งระยะยาว..... 21

3.8 ตัวอย่างการหาค่าความเหนี่ยวนำ..... 23

3.9 สายควบแบบต่าง ๆ..... 24

3.10 แบบจำลองของโหลดตามแบบ CIGRE และแบบ R//L..... 26

3.11 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก..... 28

3.12 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส..... 29

3.13 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสตามทฤษฎี..... 29

3.14 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ที่มีการกระเพื่อม ของไฟฟ้ากระแสตรง..... 32

3.15 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ที่มีการกระเพื่อม

ของไฟฟ้ากระแสตรง..... 32
3.16 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 ในคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ที่มีการกระเพื่อม
ของไฟฟ้ากระแสตรง..... 33
3.17 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 13 ในคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ที่มีการกระเพื่อม
ของไฟฟ้ากระแสตรง..... 33
3.18 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก..... 34
4.1 ระบบตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หาการไหลของกระแสฮาร์มอนิก..... 35
4.2 วงจรสมมูลที่ความถี่ฮาร์มอนิกของระบบในรูปที่ 4.1..... 36
4.3 ขั้นตอนการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิก..... 38
4.4 ตัวอย่างฮาร์มอนิกสเปคตรัมของแรงดันที่บัส..... 40
4.5 การคำนวณโหลดโฟล์วแบบนิวตัน - ราฟสัน โดยใช้ Y_{BUS}..... 42
4.6 แผนผังการทำงานของโปรแกรม..... 44
4.7 หน้าจอให้ผู้ใช้เลือกทิศทางของบัส..... 46
4.8 หน้าจอให้ผู้ใช้ระบุข้อมูลที่จำเป็นของบัส..... 46
4.9 หน้าจอให้ผู้ใช้เลือกทิศทางของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 47
4.10 หน้าจอให้ผู้ใช้ระบุข้อมูลที่จำเป็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 47
4.11 หน้าจอให้ผู้ใช้เลือกทิศทางของโหลด..... 48
4.12 หน้าจอให้ผู้ใช้ระบุข้อมูลที่จำเป็นของโหลด..... 48
4.13 หน้าจอให้ผู้ใช้เลือกทิศทางของหม้อแปลงไฟฟ้า..... 49
4.14 หน้าจอให้ผู้ใช้ระบุข้อมูลที่จำเป็นของหม้อแปลงไฟฟ้า..... 49
4.15 หน้าจอให้ผู้ใช้เลือกทิศทางของคอนเวอร์เตอร์..... 50
4.16 หน้าจอให้ผู้ใช้ระบุข้อมูลที่จำเป็นของคอนเวอร์เตอร์..... 50
4.17 หน้าจอให้ผู้ใช้เลือกทิศทางของคาปาซิเตอร์..... 51
4.18 หน้าจอให้ผู้ใช้ระบุข้อมูลที่จำเป็นของคาปาซิเตอร์..... 51
4.19 หน้าจอให้ผู้ใช้เลือกทิศทางของตัวกรองฮาร์มอนิก..... 52
4.20 หน้าจอให้ผู้ใช้ระบุข้อมูลที่จำเป็นของตัวกรองฮาร์มอนิก..... 52
4.21 หน้าจอให้ผู้ใช้ระบุข้อมูลที่จำเป็นของสายส่งพลังงานไฟฟ้า..... 53
4.22 ตัวอย่างไดอาแกรมเส้นเดียวที่สร้างขึ้นมา..... 54
4.23 ข้อมูลตัวอย่างของระบบ IEEE 14 บัส..... 55

5.1 ระบบตัวอย่าง 5 บัส 57
5.2 กระแสฮาร์มอนิกที่คอนเวอร์เตอร์ปล่อยออกมา 60
5.3 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในบัสที่ 2 61
5.4 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในบัสที่ 2 เมื่อมีตัวกรองฮาร์มอนิก
จากตารางที่ 5.7 (ก) กรณีที่ 10 62
5.5 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในบัสที่ 2 เมื่อไม่มีตัวกรองฮาร์มอนิก 69
5.6 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในบัสที่ 2 เมื่อมีตัวกรองฮาร์มอนิก
จากตารางที่ 5.7 (ก) กรณีที่ 10 69
5.7 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในบัสที่ 2 เมื่อมีตัวกรองฮาร์มอนิก
จากตารางที่ 5.7 (ข) กรณีที่ 10 69
5.8 ระบบ 5 บัสเมื่อมีตัวกรองฮาร์มอนิกที่บัสที่ 5 71
5.9 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในบัสที่ 2 เมื่อไม่มีตัวกรองฮาร์มอนิก 74
5.10 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในบัสที่ 2 เมื่อมีตัวกรองฮาร์มอนิก
ขนาด 1 MVar 74
5.11 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในบัสที่ 2 เมื่อมีตัวกรองฮาร์มอนิก
ขนาด 10 MVar 74
5.12 ระบบตัวอย่างเมื่อมีหม้อแปลงไฟฟ้าที่บัสที่ 5 75
5.13 ตำแหน่งติดตั้งคาปาซิเตอร์ 77
5.14 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ที่บัสที่ 3 เมื่อไม่มีคาปาซิเตอร์ 81
5.15 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ที่บัสที่ 3 เมื่อมีคาปาซิเตอร์ขนาด 10 MVar 81
5.16 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ที่บัสที่ 3 เมื่อมีคาปาซิเตอร์ขนาด 50 MVar 81
5.17 ระบบ IEEE 14 บัส 82
5.18 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ที่ บัสที่ 3 86
5.19 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ที่บัสที่ 3 เมื่อเพิ่มตัวกรองฮาร์มอนิก 88
5.20 ตำแหน่งที่ติดตั้งของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองตัว 90
5.21 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เมื่อมีคอนเวอร์เตอร์ 1 ที่ บัสที่ 14 91
5.22 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เมื่อมีคอนเวอร์เตอร์ 2 ที่ บัสที่ 15 93
5.23 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เมื่อมีคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ตัว 95
5.24 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เมื่อมีคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ตัว

และมีตัวกรองที่ บัสที่ 14 97
5.25 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เมื่อมีคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ตัว
และมีตัวกรองที่ บัสที่ 15..... 99
5.26 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เมื่อมีคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ตัว
และมีตัวกรองที่ บัสที่ 12.....101
5.27 การหาทิศทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิก.....104

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย