วงจรกรองกำลังแอกทีฟขนานสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้รีเคอร์ซีฟดีเอฟทีและควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ

นาย ประจวบ บุญศรีรัมย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า   ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2570-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A PARALLEL 3 PHASE 4 WIRE ACTIVE FILTER USING RECURSIVE DFT AND REPETITIVE CURRENT CONTROL

Mr. Prachuab Boonsriram

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
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2002
ISBN 974-17-2570-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรกรองกำลังแอกทีฟขนานสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้รีเคอร์ซีฟดีเอฟทีและการควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ
โดย	นายประจวบ บุญศรีรัมย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิทิต)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประจวบ บุญศรีรัมย์ : วงจรกรองกำลังแอกทีฟขนานสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้รีเคอร์ซีฟดีเอฟทีและการควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ. (A PARALLEL 3 PHASE 4 WIRE ACTIVE FILTER USING RECURSIVE DFT AND REPETITIVE CURRENT CONTROL) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์, 112หน้า. ISBN 974-17-2570-1.

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สายเพื่อลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในสายเฟสและสายนิวทรัล โดยได้ปรับปรุงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีให้สามารถใช้ได้กับวงจรที่เป็นแบบ 3 เฟส 4 สายและพัฒนาวิธีการสร้างกระแสชดเชยฮาร์มอนิกด้วยการควบคุมแบบวิธีทำซ้ำ ซึ่งข้อดีของการนำการควบคุมกระแสโดยวิธีนี้มาใช้กับวงจรกรองแอกทีฟคือสามารถสร้างกระแสชดเชยที่มีหลายความถี่ได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้วิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรกรองแอกทีฟและศึกษาคุณสมบัติการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธีการที่นำเสนอ ผลการจำลองการทำงานและผลการทดสอบวงจรโดยรวมแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวงจรกรองที่นำเสนอ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.วิศวกรรมไฟฟ้า.............................. ลายมือชื่อนิสิต...
สาขาวิชา.วิศวกรรมไฟฟ้า............................ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.......................................
ปีการศึกษา 2545 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม...............................

4270407621 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD: ACTIVE FILTER / RECURSIVE DFT / REPETITIVE CONTROL / 3 PHASE 4 WIRE / HARMONIC

PRACHUAB BOONSRIRAM : A PARALLEL 3 PHASE 4 WIRE ACTIVE FILTER USING RECURSIVE DFT AND REPETITIVE CURRENT CONTROL THESIS ADVISOR : Dr.SOMBOON SANGWONGWANICH, 113 pp. ISBN 974-17-2570-1.

This thesis presents a 3 phase 4 wire parallel active filter which can be used to eliminate the harmonic currents in the phase and neutral conductors. The proposed active filter detects the harmonic currents using a newly modified recursive DFT algorithm applicable to a 3 phase 4 wire system. A new current control method based on the repetitive control is also introduced so that the active filter can produce harmonic currents of multiple frequencies accurately. Stability of the active filter and their harmonic elimination performance are then studied, and the feasibility of the proposed active filter is confirmed by simulation and experimental results.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department..ELECTRICAL ENGINEERING.....Student's signature..

Field of study..ELECTRICAL ENGINEERING...Advisor's signature..

Academic year.....2002.................................Co-advisor's signature..

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างยิ่งของอาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำความรู้ตลอดจนความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา และรุ่นพี่รุ่นน้องรวมถึงเพื่อนร่วมรุ่นในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ให้วิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบันตลอดจนเงินทุนวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังและอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์จากบริษัท เอ. พี. วาย. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้า ตลอดจนญาติพี่น้อง ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษา ให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย……………………………………………………………………………ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ…………………………………………………………………....จ
กิตติกรรมประกาศ……………………………………………………………………...…..ฉ
สารบัญเรื่อง……………………………………………………………………………...ช
สารบัญตาราง…………………………………………………………...…...…...….ญ
สารบัญภาพ ...……………...………………………………………………………...………ฏ
บทที่
1 บทนำ………………………………………………………………………………..1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา……………………………………...……1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย……………………………………………………….……3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย ………………………………………………………………....3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ……………………………………………………...…4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ………………………………………………………...…5
2 ทฤษฎีการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองแอกทีฟ……………………………....………..6
2.1 ตำแหน่งการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก ……………………………………………..6
2.1.1 การตรวจจับกระแสด้านโหลด……………...……………………………………6
2.1.2 การตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย…………………..…………………………..7
2.2 ทฤษฎีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบต่างๆ………………………………...……..9
2.2.1 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ……....10
2.2.2 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีวงจรกรองบนแกนหมุน……...………..14
2.2.2.1 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ……………………………...…14
2.2.2.2 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ……………………………..16
2.3 การคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีสำหรับระบบ 3เฟส 4สาย......21
2.3.1 การคำนวณหาฮาร์มอนิกในกระแสเฟสด้วยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟที………………....21
2.3.2 การคำนวณหาฮาร์มอนิกในสายนิวทรัล……………………………………..……22
2.4 กระแสชดเชยฮาร์มอนิก…………………………………………………………………24
2.4.1 การชดเชยแบบกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมด………………………………………..24
2.4.2 การชดเชยแบบกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะบางอันดับ………………………...…24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 การควบคุมแบบวิธีทำซ้ำและเสถียรภาพของการควบคุม……………………………………26
3.1 การสร้างและควบคุมกระแสชดเชย……………………………………………………..26
3.2 ตัวควบคุมแบบทำซ้ำ…………………………………………………………………….28
3.2 ผลการจำลองการทำงาน……………………………………………………………..….34
4 การออกแบบตัวควบคุม PI สำหรับควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง………………………...37
4.1 การควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง……………………………………………………..37
4.2 การออกแบบส่วนควบคุมระดับแรงดันกึ่งกลางบัส……………………………………..41
5. โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ…………………………........……………..45
5.1 ฮาร์ดแวร์ของระบบ……………………………………………………………..…………46
4.2.1 ส่วนของระบบกำลัง……….……………………………………………….......46
4.2.2 ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์……………………………………………………46
4.2.3 ส่วนการตรวจจับสัญญาณต่างๆ และส่วนควบคุม…………………….………..47
4.2.3.1 ภาคการตรวจจับสัญญาณต่างๆ…………………………………….…47
4.2.3.2 ภาคการควบคุม…………………………………………………..……..48
5.2 ซอฟต์แวร์ของระบบ……………………………………………………………..………...49
6 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ…...………………………..……………………………53
6.1 กรณีโหลดสมดุล……………………………………………………………………………...52
6.1.1 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 5 ซีเควนซ์ลบ……………………..……..54
6.1.2 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 7 ซีเควนซ์บวก……………………...…56
6.1.3 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 11 ซีเคนซ์ลบ………………………..…..58
6.1.4 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 13 ซีเควนซ์บวก………………………...60
6.1.5 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 17 ซีเควนซ์ลบ…………………..………62
6.1.6 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 19 ซีเควนซ์บวก………………………...64
6.1.7 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกในสายเฟสหมดทุกอันดับ…………………………..…66
6.2 กรณีโหลดไม่สมดุล……………………………………………………………………...68
6.2.1กรณีกำจัดฮาร์มอนิกซีเควนซ์บวกหรือลบ……………………….………………68
6.2.1.1 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 5 ซีเควนซ์บวกและลบในสายเฟส….69
6.2.1.2 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 7 ซีเควนซ์บวกและลบในสายเฟส….71
6.2.1.3 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 11 ซีเควนซ์บวกและลบในสายเฟส..71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.1.4 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 13 ซีเควนซ์บวกและลบในสายเฟส..75

6.2.1.5 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 17 ซีเควนซ์บวกและลบในสายเฟส..77

6.2.1.5 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 19 ซีเควนซ์บวกและลบในสายเฟส..79

6.2.2 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกซีเควนซ์ศูนย์…………………………………..………..…81

6.2.2.1 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 3ในสายเฟสและสายนิวทรัล……...81

6.2.2.2 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 9ในสายเฟสและสายนิวทรัล……...83

6.2.2.3 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 15ในสายเฟสและสายนิวทรัล…….85

7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ…………………...………………………………….……….82

รายการอ้างอิง………………………………………………………………………………83

ภาคผนวก……………………………………………………………………………………..84

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์………………………………………………………………….89

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 มาตรฐานข้อกำหนดฮาร์มอนิกIEC 1000-3-2 …………………………………...…………..4
7.1 เปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกกรณีโหลดสมดุลและกำจัดฮาร์มอนิกหมดทุกอันดับ………..87
7.2 เปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกกรณีโหลดสมดุลและกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ…………88
7.3 เปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกกรณีโหลดไม่สมดุลและกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับในสายเฟส……………………………………………………..…………………………..88
7.4 เปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกกรณีโหลดไม่สมดุลและกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับในสายเฟสและสายนิวทรัล………………..…………………..………………………………..88

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

1.1 วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบ 3 เฟส 3 สาย 1
1.2 วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบ 3 เฟส 4 สาย 3
2.1 วงจรสมมูล 1 เฟสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านโหลด 6
2.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านโหลด 7
2.3 วงจรสมมูล 1 เฟสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย 8
2.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย 8
2.5 ความสัมพันธ์ของแกนอ้างอิง u, v, w กับแกนอ้างอิง (α, β) 10
2.6 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ 13
2.7 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิงซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ 50 Hz 14
2.8 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับโดยใช้วิธีวงจรกรองบนแกนหมุน 15
2.9 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิง ซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ hω 16
2.10 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h โดยใช้วงจรกรองบนแกนหมุน 17
2.11 ลักษณะของสัญญาณอ้างอิงสำหรับการทำ DFT แบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ 19
2.12 การทำ Recursive DFT บนแกนหมุน 20
2.13 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในสายเฟส 21
2.14 การหมุนแกนเพื่อคำนวณฮาร์มอนิกในสายเฟส 22
2.15 การหมุนแกนเพื่อคำนวณหาค่าฮาร์มอนิกในสายนิวทรัล 23
2.16 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรัล 23
2.17 การคำนวณกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย 24
2.18 การคำนวณกระแสฮาร์มอนิกแบบกำจัด 24
2.19 การตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับการชดเชยเฉพาะบางอันดับ 25
3.1 การเชื่อมต่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟเข้ากับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 27
3.2 แผนภาพแสดงวงรอบการควบคุมกระแส 27
3.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมกระแสวิธีทำซ้ำ 28
3.4 ระบบควบคุมแบบทำซ้ำ 28
3.5 ระบบควบคุมสมมูลของระบบควบคุมแบบทำซ้ำ 30
3.6 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ $1+P(z)$ 31
3.7 ผลตอบสนองเชิงขนาดและเฟสของวงจรกรองผ่านต่ำแบบ Linear Phase FIR 33
3.8 แผนภาพโบเดของ $Q(z)$ และ $1+P(z)$ เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของการควบคุมแบบทำซ้ำ 33

บทที่ หน้า

3.9 กระแสโหลดเฟส *w* ที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิก....................................34

3.10 กระแสจากแหล่งจ่าย....................................34

3.11 วงรอบการควบคุมกระแสเมื่อเพิ่มค่าอัตราขยาย $K = 60$....................................35

3.12 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $K = 60$....................................35

4.1 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง....................................38

4.2 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ในการออกแบบ....................................38

4.3 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรงหลังจากประมาณเป็นระบบเชิงเส้น....................................39

4.4 ช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยายและช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง.....41

4.5 การไหลของกระแสซีเควนซ์ศูนย์เพื่อควบคุมแรงดันจุดกึ่งกลางบัส....................................42

4.6 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแรงดันจุดกึ่งกลางบัส....................................42

4.7 ช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยายและช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง....44

5.1 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน 3 เฟส 4 สาย....................................45

5.2 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์และส่วนวงจรควบคุมของวงจรกรองแอกทีฟ....................................46

5.3 ส่วนตรวจจับสัญญาณกระแส....................................47

5.4 วงจรตรวจจับแรงดันบัสไฟตรงและแรงดันจุดกึ่งกลางบัส....................................48

5.5 วงจรตรวจจับแรงดันไฟสลับ....................................48

5.6 ภาพรวมการตรวจจับ การควบคุมและการทำงานของระบบ....................................50

5.7 บล็อกไดอะแกรมของซอฟต์แวร์ส่วนแปลงแกนของแรงดัน....................................51

5.8 บล็อกไดอะแกรมของซอฟต์แวร์ส่วนคำนวณกระแสฮาร์มอนิก....................................51

5.9 บล็อกไดอะแกรมของซอฟต์แวร์ส่วนควบคุมแรงดันไฟตรง....................................51

5.10 บล็อกไดอะแกรมของซอฟต์แวร์ส่วนควบคุมกระแสและคำนวณแรงดันคำสั่ง....................................52

6.1 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 5 ซีเควนซ์ลบ เมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$....................................54

6.2 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 5 ซีเควนซ์ลบเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$....................................55

บทที่ หน้า

6.3 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 7 ซีเควนซ์บวกเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด K =60 56

6.4 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 7 ซีเควนซ์บวกและอัตราขยายค่าความผิดพลาด K = 60 57

6.5 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 11 ซีเควนซ์ลบเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด K = 60 58

6.6 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 11 ซีเควนซ์ลบและอัตราขยายค่าความผิดพลาด K = 60 59

6.7 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ13 ซีเควนซ์บวกเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด K = 60 60

6.8 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 13 ซีเควนซ์บวกและอัตราขยายค่าความผิดพลาด K = 60 61

6.9 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ17 ซีเควนซ์ลบเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด K = 60 62

6.10 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 17 ซีเควนซ์ลบและอัตราขยายค่าความผิดพลาด K = 60 63

6.11 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ19 ซีเควนซ์บวกเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด K = 60 64

บทที่ หน้า

6.12 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 19 ซีเควนซ์บวกและอัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$ 65

6.13 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกทุกอันดับในสายเฟสเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$ 66

6.14 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดฮาร์มอนิกทุกอันดับในสายเฟสและอัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$ 67

6.15 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 5 อันดับบวกและลบในสายเฟส เมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 69

6.16 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 5 ซีเควนซ์บวกและลบเมื่ออัตราขยายค่า-ความผิดพลาด $K = 60$ 70

6.17 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 7 อันดับบวกและลบในสายเฟส เมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 71

6.18 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 7 ซีเควนซ์บวกและลบเมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 72

6.19 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 11 อันดับบวกและลบในสายเฟส เมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 73

6.20 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 11 ซีเควนซ์บวกและลบเมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 74

บทที่ หน้า

6.21 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 13 อันดับบวกและลบในสายเฟส เมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 75

6.22 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 13 ซีเควนซ์บวกและลบเมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 76

6.23 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 17 อันดับบวกและลบในสายเฟส เมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 77

6.24 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 17 ซีเควนซ์บวกและลบเมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 78

6.25 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 19 อันดับบวกและลบในสายเฟส เมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 79

6.26 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 19 ซีเควนซ์บวกและลบเมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 80

6.27 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 3 ในสายเฟสและในสายนิวทรัล เมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 81

6.28 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 3 ในสายเฟสและในสายนิวทรัล เมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 82

6.29 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 9 ในสายเฟสและในสายนิวทรัล เมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 83

6.30 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจาก

บทที่ หน้า

แหล่งจ่ายกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 9 ในสายเฟสและในสายนิวทรัล เมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 84

6.31 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 15 ในสายเฟสและในสายนิวทรัล เมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 85

6.32 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 15 ในสายเฟสและในสายนิวทรัล เมื่ออัตราขยาย-ค่าความผิดพลาด $K = 60$ 86

ก.1 วงจรสมมูล 1 เฟสของระบบเมื่อต่อวงจรกรองกระแสความถี่การสวิตช์ 93

ก.2 ลักษณะสมบัติของวงจรกรองกระแสความถี่การสวิตช์ 96

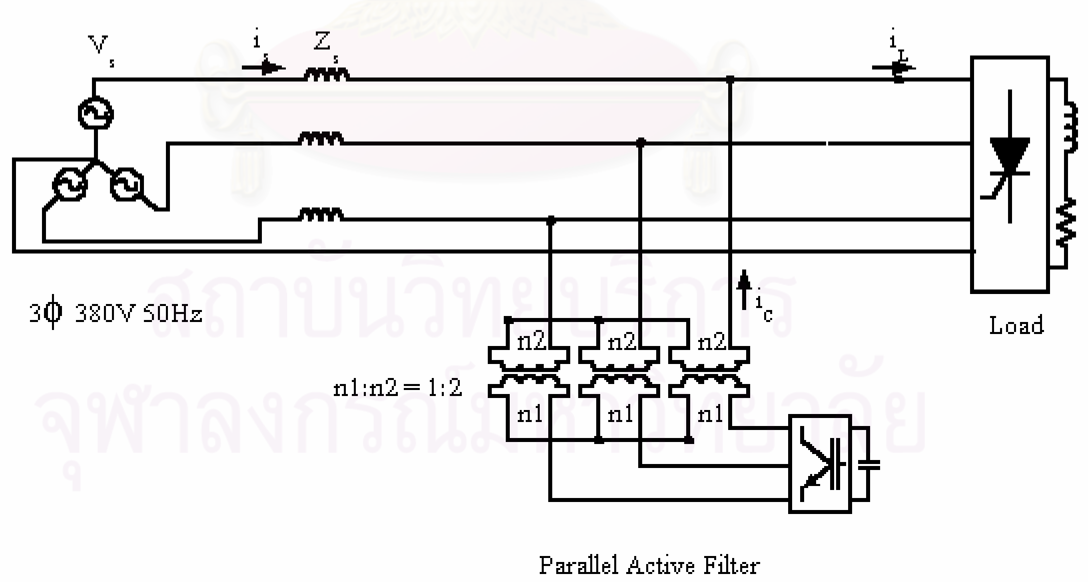
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นปัญหาที่เติบโตควบคู่ไปกับการพัฒนาของอุตสาหกรรม การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกที่นิยมใช้ก็คือการใช้วงจรกรองพาสซีฟต่อขนานกับโหลดซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาได้เนื่องจากเกิดการเรโซแนนซ์กับระบบไฟฟ้ากำลังและมีข้อจำกัดอย่างอื่นด้วย(สรรชิพงษ์ โฆษิตเกษม, 2540) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกอีกหลายวิธี เช่น การใช้วงจรกรองแอกทีฟต่อขนานหรืออนุกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังหรือต่อเป็นแบบแอกทีฟผสมพาสซีฟหรือการต่อแบบไฮบริด ซึ่งวงจรกรองต่างๆเหล่านี้ส่วนใหญ่จะเป็นการแก้ปัญหาให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส 3 สาย โดยมีวงจรเป็นดังรูปที่ 1.1 อย่างไรก็ดีการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมหรือระบบจำหน่ายทั่วไปมักจะเป็นระบบ 3 เฟส 4 สายซึ่งมีฮาร์มอนิกอันดับสามปะปนอยู่ด้วย ก่อให้เกิดปัญหากระแสเกินในสายนิวทรัลหรือที่ขั้วต่อของหม้อแปลงระบบจำหน่ายเป็นผลให้เกิดการร้อนเกิน การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส 4 สายไม่สามารถใช้วงจรกรองแอกทีฟแบบที่มี 3 สายโดยไม่มีสายต่อกับตัวนำนิวทรัลได้ เพราะว่ากระแสฮาร์มอนิกบางส่วนในสายเฟสจะไม่ถูกชดเชยและขนาดของกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลก็ไม่ได้ลดลง(Thierry Thomas et al., 1996)



รูปที่ 1.1 วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบ 3 เฟส 3 สาย

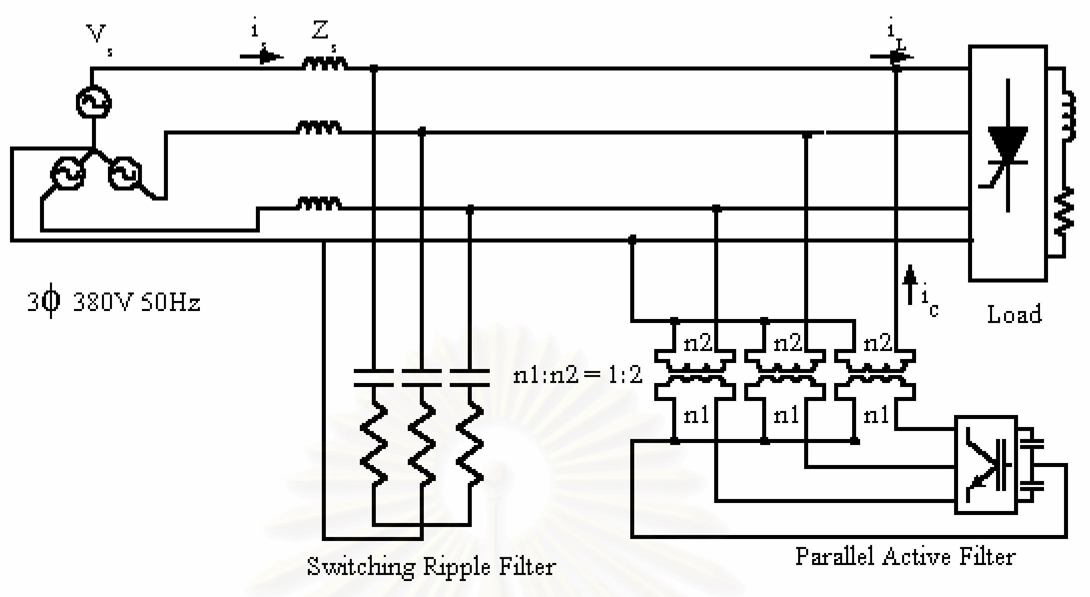
งานวิจัยเกี่ยวกับการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลนั้นได้มีการนำเสนอมาแล้วอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น

Conor A. Quinn et al. 1993 ได้นำเสนอการใช้วงจรกรองแอกทีฟแบบ 1 เฟส 4 ตัวโดย 3 ตัวต่อระหว่างเฟสกับสายนิวทรัลเพื่อชดเชยฮาร์มอนิกโดยแยกการควบคุมอิสระจากกันแล้วยังมีการนำผลรวมของกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้ในแต่ละเฟสมาเป็นกระแสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์สำหรับชดเชยที่สายนิวทรัลด้วย การควบคุมกระแสในงานวิจัยนี้ใช้การควบคุมแบบฮิสเทอริซิส การใช้อินเวอร์เตอร์ที่แยกอิสระจากกันหลายตัวทำให้กำลังรวมของอินเวอร์เตอร์มีขนาดใหญ่ ซึ่งถ้าหากนำไปใช้จริงก็จะมีต้นทุนสูง นอกจากนี้การที่มีการควบคุมกระแสจากวงจรกรองแอกทีฟทั้ง 4 สาย ก็อาจจะทำให้เกิดการขัดแย้งกันเองได้เนื่องจากค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการควบคุมกระแสแต่ละส่วน

Girish Kamath et al. 1994 ได้พัฒนางานวิจัยของ Conor A. Quin เพื่อลดขนาดกำลังของวงจรกรองแอกทีฟ โดยใช้อินเวอร์เตอร์เพียง 2 ชุดเท่านั้นคือ อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกซีเควนซ์บวกและซีเควนซ์ลบ ร่วมกับอินเวอร์เตอร์แบบ 1 เฟส ใช้สำหรับการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกซีเควนซ์ศูนย์ อินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้เชื่อมโยงเข้ากับระบบกำลังโดยต่อผ่านหม้อแปลงแบบ zig-zag delta ขนาดกำลังของวงจรกรองจะลดลงได้เนื่องจากการแยกอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายกระแสซีเควนซ์ศูนย์ออกมาต่างหาก อินเวอร์เตอร์ตัวนี้ต่อระหว่างจุดนิวทรัลของหม้อแปลงกับสายนิวทรัลของระบบทำให้สามารถใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีพิกัดแรงดันต่ำแต่กระแสสูง งานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้อินเวอร์เตอร์ 2 ตัวซึ่งไม่เหมาะสมและไม่สะดวกในการนำไปใช้งานจริง

Prasad N. Enjeti et al. 1994 ได้นำเสนอการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลโดยการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยตรงจากสายนิวทรัลแล้วใช้สัญญาณที่ตรวจจับได้นี้เป็นกระแสคำสั่งโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์ การกำจัดฮาร์มอนิกในงานวิจัยนี้จะกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลเท่านั้นส่วนฮาร์มอนิกในสายเฟสก็ยังคงไม่ถูกกำจัดแต่อย่างใด

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้เราจะนำเสนอวงจรกรองแอกทีฟสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย โดยใช้แบบที่สายนิวทรัลต่อกับจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านโหลด 3 สาย โดยมีวงจรเป็นดังรูปที่ 1.2 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในสายเฟสนั้นจะใช้วิธีการตรวจจับแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีซึ่งมีข้อดีก็คือมีการคำนวณที่ง่ายและให้ผลการคำนวณรูปคลื่นเป็นขนาดและเฟสของฮาร์มอนิกที่เราต้องการกำจัด อย่างไรก็ตามการตรวจจับด้วยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีที่นำเสนอในอดีตไม่สามารถนำมาใช้ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวตรัลได้โดยตรง เราจึงจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลขึ้นมาโดยประยุกต์มาจากหลักการการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในสายเฟส



รูปที่ 1.2 วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบ 3 เฟส 4 สาย

นอกจากนี้เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ของวงจรกรองแอกทีฟต้องจ่ายกระแสฮาร์มอนิกซึ่งมีลักษณะเป็นสัญญาณรายคาบและมีหลายความถี่ปะปนกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราจะนำเสนอการควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ(Repetitive Control) ซึ่งตัวควบคุมแบบนี้จะมีขั้วกระจายอยู่ที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆ จึงทำให้สามารถควบคุมกระแสที่เป็นสัญญาณรายคาบได้

ในท้ายสุดเราจะทดสอบคุณสมบัติของวงจรกรองแอกทีฟที่ได้พัฒนาขึ้น โดยทดสอบกับโหลดซึ่งประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสอย่างละหนึ่งชุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาออกแบบและสร้างวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานเพื่อใช้ในวงจรไฟฟ้ากำลังแบบ 3 เฟส 4 สาย โดยใช้วิธีตรวจจับกระแสแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีทางด้านโหลดและควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

พัฒนาและสร้างต้นแบบวงจรกรองแอกทีฟที่มีการตรวจจับสัญญาณแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีสำหรับใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสี่สาย 380 โวลต์ โดยมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสขนาด 1.5 kVA และวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสขนาด 0.25 kVA หนึ่งชุด โหลดแต่ละชุดจ่ายกระแสด้านออกคงตัว โดยวงจรกรองแอกทีฟสามารถที่จะกำจัดฮาร์มอนิกอันดับต่ำกว่า 19 ได้ตามต้องการ

และจะต้องทำให้กระแสฮาร์มอนิกในระบบกำลังในอันดับที่ต้องการกำจัดเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 1000-3-2 Class A ซึ่งการที่เลือกใช้มาตรฐาน IEC 1000-3-2 เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่มีการใช้อย่างแพร่หลายและใช้ได้ง่ายคือเราจะทราบค่ากระแสฮาร์มอนิกที่สอดคล้องตามมาตรฐานได้จากการเทียบสัดส่วนจากค่ากระแสฐาน 16 A ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มาตรฐานข้อกำหนดฮาร์มอนิก IEC 1000-3-2 Class A

Harmonic order N	Maximum permissible Harmonic current (A)
Odd harmonics	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
15 < n < 39	0.15 (15/n)
Even harmonics	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
8 < n < 40	0.23 (8/n)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

1. ศึกษาคุณสมบัติของวงจรกรองแอกทีฟแบบต่าง ๆ

2. ศึกษาคุณสมบัติของการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีต่าง ๆ

3.ใช้คอมพิวเตอร์จำลองการทำงานของวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย ที่มีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีและใช้การควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การทำงานโดยในด้านเสถียรภาพและผลตอบสภาวะชั่วครู่

4. สร้างต้นแบบวงจรกรองแอกทีฟสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย 380 โวลต์ที่ใช้การตรวจจับสัญญาณแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีและควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ

5. ศึกษาและปรับปรุงฮาร์ดแวร์ของวงจรกรองแอกทีฟ
6. ทำการทดสอบวงจรทั้งหมดและทดลองใช้งาน
7. ประเมินผลและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เทคนิคใหม่ในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเพื่อใช้สำหรับระบบกำลัง 3 เฟส 4 สาย
2. ได้หลักการออกแบบการควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ
3. ผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองแอกทีฟ

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงรายละเอียดของหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 คือวงจรกรองแอกทีฟในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นแบบ 3 เฟส 4 สาย โดยการตรวจจับฮาร์มอนิกทางด้านโหลด ดังนั้นในบทนี้เราจึงแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วนคือ

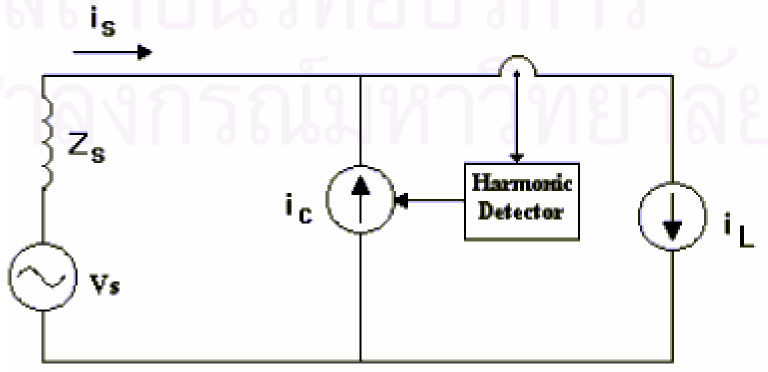
1. ตำแหน่งการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก
2. ทฤษฎีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบต่างๆ
3. การคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย

2.1 ตำแหน่งการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

วงจรกรองแอกทีฟโดยทั่วไป จะทำการตรวจจับกระแสเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าฮาร์มอนิกได้ในสองลักษณะคือ

2.1.1 การตรวจจับกระแสด้านโหลด

การตรวจจับกระแสในลักษณะนี้มีวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในกรณีที่โหลดมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแสหรือมีอิมพีแดนซ์สูง การทำงานของวงจรกรองจะมีลักษณะเป็นแบบวงรอบเปิดดังแสดงตามรูปที่ 2.2 ซึ่งในกรณีเช่นนี้เราสามารถคำนวณหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดจากกระแสโหลด และสามารถใช้เป็นคำสั่งกระแสชดเชยได้โดยตรง การตรวจจับในลักษณะนี้ทำให้วงจรกรองแอกทีฟประพฤติตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแส (F. Z. Peng, 1992)



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูล 1 เฟสของวงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านโหลด

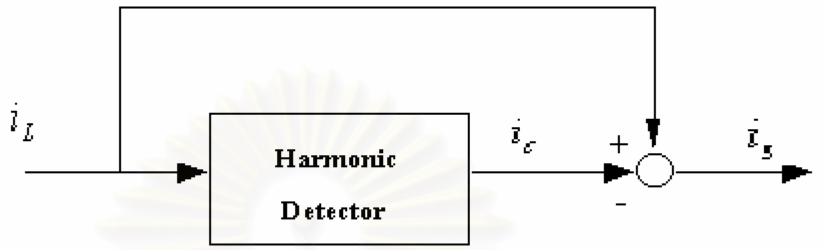
โดยที่ V_s คือ แรงดันแหล่งจ่าย

Z_s คือ อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย

i_s คือ กระแสแหล่งจ่าย

i_L คือ กระแสโหลด

i_c คือ กระแสชดเชยที่จ่ายโดยวงจรกรองแอกทีฟ



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านโหลด

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งโหลด มีข้อดีคือ ง่าย ไม่ซับซ้อนและให้คุณสมบัติการกรองที่ดีในกรณีที่การตรวจจับมีลักษณะที่เป็นอุดมคติ แต่ก็มีข้อเสียเช่นกันคือ ในทางปฏิบัติแล้วเราจะไม่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้หมดเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ตรวจจับกระแส

2.1.2 การตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย

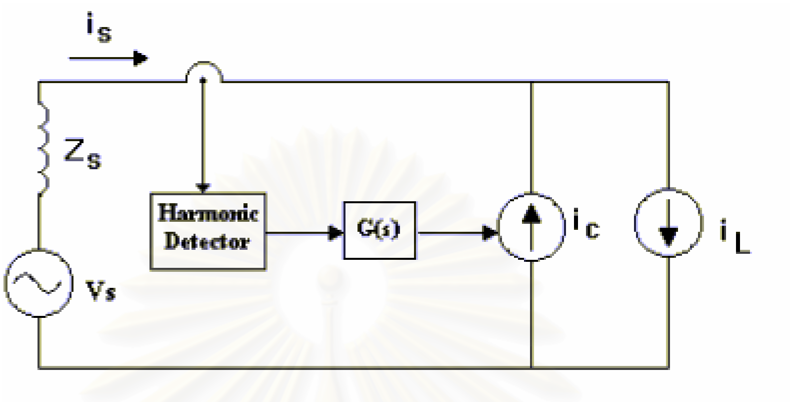
สำหรับการตรวจจับกระแสลักษณะนี้ วงจรกรองแอกทีฟจะอาศัยการป้อนกลับเพื่อควบคุมกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายให้มีค่าน้อยที่สุด โดยมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.3 และมีลักษณะการทำงานเป็นแบบวงรอบปิดดังรูปที่ 2.4 ในกรณีนี้คำสั่งกระแสชดเชยจะไม่ได้มาจากกระแสฮาร์มอนิก ที่แหล่งจ่ายโดยตรง แต่จะมีการคูณฟังก์ชันควบคุมเข้ากับกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้แล้วจึงใช้เป็นคำสั่งกระแสชดเชยเพื่อจ่ายออกไปโดยมีเป้าหมายการควบคุมเพื่อทำให้กระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายมีค่าต่ำ

ฟังก์ชันควบคุม G(s) จะทำให้วงจรกรองแอกทีฟประพฤติตัวเป็นอิมพีแดนซ์เสมือนที่มีค่าแปรตามความถี่ในลักษณะต่างๆกัน (สรรค์ธิพงษ์ โฆษิตเกษม, 2540) ซึ่งสามารถเลือกได้หลายหลายแบบโดยจะให้ผลแตกต่างกันไป อาทิเช่น

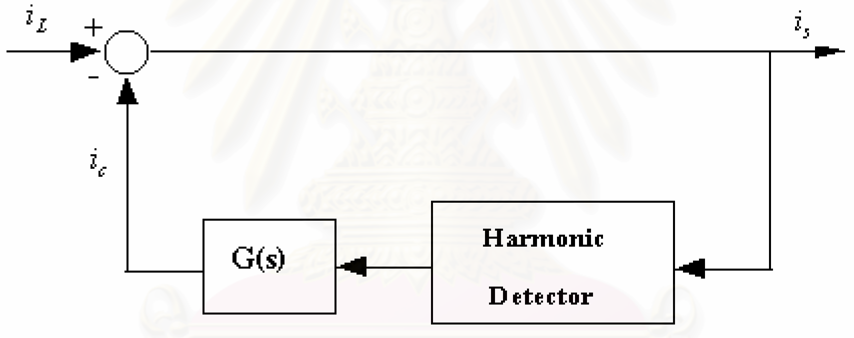
1. $G(s) = k$ เมื่อ k เป็นค่าคงตัว วงจรกรองแอกทีฟจะประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด

2. G(s) = $\frac{kTs}{1+Ts}$ เมื่อ k และ Ts เป็นค่าคงตัว วงจรกรองแอกทีฟจะประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับความต้านทานและมีลักษณะเฟสนำหน้าที่ความถี่ที่ต้องการกำจัด

การออกแบบฟังก์ชันควบคุมที่เหมาะสมจะทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ผลตามต้องการ



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูล 1 เฟสของวงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย

ข้อดีของการตรวจจับลักษณะนี้คือความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายจะไม่มีผลต่อคุณสมบัติการกำจัดฮาร์มอนิก เนื่องจากในสภาวะอยู่ตัวกระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายจะเป็นศูนย์ ถึงแม้อัตราขยายของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสจะผิดพลาดก็ไม่มีผลต่อการกำจัดฮาร์มอนิก ดังนั้นการเลือกอุปกรณ์ตรวจจับกระแสก็ไม่จำเป็นต้องมีความแม่นยำสูง อย่างไรก็ตามเนื่องจากระบบทำงานในลักษณะวงรอบปิด ดังนั้นเราจะต้องคำนึงถึงผลของเสถียรภาพของระบบด้วย

ในงานวิจัยนี้ เราจะเลือกใช้การตรวจจับกระแสทางด้านโหลด เนื่องจากง่ายและไม่ต้องพิจารณาเรื่องเสถียรภาพในการตรวจจับ

2.2 ทฤษฎีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบต่างๆ

รูปคลื่นกระแสซึ่งมีลักษณะเป็นสัญญาณรายคาบสามารถแตกเป็นผลรวมของกระแสองค์ประกอบความถี่มูลฐานกับกระแสองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆซึ่งมีค่าความถี่เป็นจำนวนเท่า(อันดับ)ที่ลงตัวของความถี่มูลฐาน ดังนั้นในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ไม่ต้องการวงจรกรองกำลังแอกทีฟเราจะต้องสามารถทำการตรวจจับแยกเอาสัญญาณฮาร์มอนิกที่ต้องการออกมา เพื่อทำการสร้างกระแสชดเชยไปหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกในองค์ประกอบนั้นๆ

ในกรณีที่ระบบเป็นแบบ 3 เฟส 3 สาย ซึ่งกระแส 3 เฟส ไม่มีความเป็นอิสระระหว่างกัน การพิจารณาตรวจจับฮาร์มอนิกแยกกันทีละเฟสอย่างอิสระกัน จะเป็นการทำงานที่ซ้ำซ้อนและยังยุ่งยากโดยไม่จำเป็น ในที่นี้เราจะใช้วิธีการพิจารณาตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกจากสเปซเวกเตอร์ 2 เฟส ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงภาพรวมของกระแส 3 เฟสได้ ซึ่งกระแสในรูปสเปซเวกเตอร์นี้ก็สามารถแยกออกได้เป็นผลรวมขององค์ประกอบมูลฐานกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกต่างๆได้เช่นกัน ดังแสดงตามสมการที่ (2.1)

$$\vec{i}\,(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} Ih \cdot e^{jh\omega t} \qquad (2.1)$$

เมื่อ $\vec{i}\,(t)$ คือสเปซเวกเตอร์กระแส h คืออันดับของฮาร์มอนิก Ih คือขนาดและเฟสขององค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ h ω คือความถี่มูลฐาน เราสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่าง Symmetrical Component ของกระแส 3 เฟสกับกระแสสเปซเวกเตอร์ได้ดังนี้คือ

- กระแสซีเควนซ์ศูนย์ : กรณีระบบ 3 เฟส 3 สายจะไม่มีกระแสซีเควนซ์นี้
- กระแสซีเควนซ์บวก : เมื่อแปลงเป็นสเปซเวกเตอร์จะกลายเป็นเวกเตอร์ขนาดคงที่ หมุนไปในทิศทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ของฮาร์มอนิกนั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับพจน์ $Ih \cdot e^{jh\omega t}$ เมื่อ h มีค่าเป็นบวกนั่นเอง
- กระแสซีเควนซ์ลบ : เมื่อแปลงเป็นสเปซเวกเตอร์จะกลายเป็นเวกเตอร์ขนาดคงที่ หมุนไปในทิศตามเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ของฮาร์มอนิกนั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับพจน์ $Ih \cdot e^{jh\omega t}$ เมื่อ h มีค่าเป็นลบนั่นเอง

การมองกระแส 3 เฟสเป็นสเปซเวกเตอร์นี้ทำให้เราสามารถพัฒนาวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกแบบใหม่โดยมองจากสเปซเวกเตอร์ได้โดยเราสามารถตรวจจับโดยแยกแยะได้ทั้งความถี่และซีเควนซ์ ซึ่งมีประโยชน์ในการเลือกตรวจจับและกำจัดเฉพาะบางฮาร์มอนิกและบางซีเควนซ์เมื่อระบบมีฮาร์มอนิกเฉพาะบางอันดับและบางซีเควนซ์ ตัวอย่างเช่น ในระบบ 3 เฟส 3 สายสมดุลโดยทั่วไป ซึ่งมีฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 5 ซีเควนซ์ลบ อันดับ 7 ซีเควนซ์บวก อันดับ 11 ซีเควนซ์ลบ

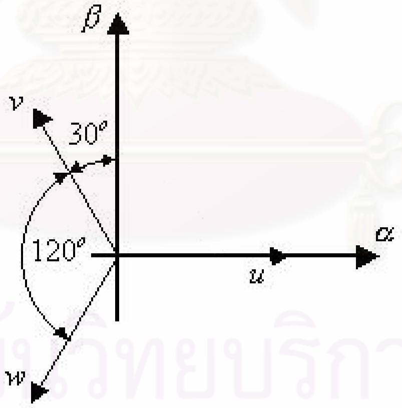
อันดับ 13 ซีเควนซ์บวก เช่นนี้เรื่อยไป เราสามารถเลือกตรวจจับเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 5 ซีเควนซ์ลบและฮาร์มอนิกอันดับ 7 ซีเควนซ์บวกซึ่งเป็นฮาร์มอนิกหลักของระบบ ซึ่งจะทำให้วงจรกรองแอกทีฟที่ใช้มีขนาดเล็กลงได้ เพราะไม่ต้องจ่ายกระแสฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆ เพิ่มเติม

วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่นิยมกันทั่วไปได้แก่ วิธีการซึ่งอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ (H. Akagi, 1983) และวิธีการหมุนแกนอ้างอิง

2.2.1 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ

โดยทั่วไปวิธีการนี้จะใช้ตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟส 3 สาย ซึ่งจะให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกถูกต้องเมื่อแหล่งจ่ายมีรูปคลื่นแรงดันเป็นไซน์และมีความสมดุล มิฉะนั้นจะเกิดความผิดพลาดได้ นอกจากนี้การตรวจจับฮาร์มอนิกวิธีนี้ยังเหมาะสมเฉพาะกับวงจรกรองแอกทีฟที่ชดเชยฮาร์มอนิกทุกอันดับ เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกที่คำนวณได้จะประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกทุกอันดับปนกันอยู่โดยไม่สามารถแยกตรวจจับเฉพาะอันดับที่ต้องการได้

เนื่องจากสัญญาณ 3 เฟส (u, v, w) ที่ไม่อิสระต่อกันสามารถนิยามให้อยู่ในแกนอ้างอิง 2 แกนที่ตั้งฉากกัน $(\alpha-\beta)$ ได้ดังรูปที่ 2.5 และเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของการแปลงแกนอ้างอิงได้ดังสมการที่ (2.2)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของแกนอ้างอิง u,v,w กับแกนอ้างอิง $(\alpha-\beta)$

$$\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\end{bmatrix} = A\begin{bmatrix}1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2}\\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u\\ v\\ w\end{bmatrix} \tag{2.2}$$

โดยที่ A เป็นค่าคงที่

เมื่อพิจารณาเรื่องการอนุรักษ์พลังงานนั่นคือ กำลังเมื่ออยู่ในแกนอ้างอิง $(\alpha - \beta)$ ยังคงเท่ากับกำลังเมื่ออยู่ในแกนอ้างอิง (*u, v, w*) แล้วพบว่า $A = \sqrt{\frac{2}{3}}$ ดังนั้นสมการที่ (2.2) สามารถเขียนได้ใหม่เป็นสมการที่ (2.3)

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

ขั้นตอนในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก เริ่มแรกเราจะต้องแปลงกระแส (i) และแรงดัน (e) 3 เฟส(*u, v, w*) มาเป็นสเปซเวกเตอร์บนแกน $\alpha - \beta$ โดยใช้สมการที่ (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ

$$\bar{i} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\bar{e} = \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

โดยที่ “$(\bar{\bullet})$” แสดงถึงปริมาณสเปซเวกเตอร์ $(\bullet)_\alpha$ และ $(\bullet)_\beta$ คือองค์ประกอบของสเปซเวกเตอร์บนแกน α และ β ตามลำดับ และตัวห้อย *u, v, w* หมายถึงปริมาณในเฟส *u, v, w* ตามลำดับ เราจะนำกระแสและแรงดันที่เป็นสเปซเวกเตอร์มาหาค่ากำลังขณะใดๆ (Instantaneous Power) โดยที่ p คือกำลังงานจริงขณะใดๆของระบบ 3 เฟสที่จ่ายจากแหล่งไปสู่โหลด มีค่าเท่ากับผลคูณสเกลล่า (Dot Product) ของ $\bar{e}$ กับ $\bar{i}$ ตามสมการที่ (2.6) ส่วน q คือกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ (Instantaneous Reactive Power) เป็นกำลังที่ถ่ายทอดกันเองระหว่างเฟสทั้ง 3 ของแหล่งจ่ายโดยไม่ทำให้เกิดกำลังสุทธิไปสู่โหลด มีค่าเท่ากับขนาดของผลคูณเวกเตอร์ (Cross Product) ของ $\bar{e}$ กับ $\bar{i}$ ตามสมการที่ (2.7)

$$p = \bar{e} \cdot \bar{i} \quad (2.6)$$

$$q = \left\| \bar{e} \times \bar{i} \right\| \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.6) และ (2.7) เราสามารถแสดงค่ากำลังงานจริงขณะใดๆ (p) และค่ากำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ (q) ของระบบ 3 เฟสในของรูปเมตริกซ์ได้ ดังสมการที่ (2.8) หรือ (2.9)

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ i_\beta & -i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

สมการที่ (2.8) เหมาะสำหรับใช้กับแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วนสมการที่ (2.9) จะใช้กับแหล่งจ่ายกระแส จากสมการที่ (2.8) เมื่อดีเทอร์มีแนนท์ของเมตริกซ์ไม่เป็นศูนย์ เราสามารถคำนวณค่ากระแสจากค่ากำลังงานขณะใดๆ ได้ดังสมการที่ (2.10)

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & -e_\beta \\ e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

ค่ากำลังงานจริงขณะใดๆ (p) และค่ากำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ (q) มีองค์ประกอบทั้งที่เป็นไฟตรงและไฟสลับดังต่อไปนี้(Mauricio Aredes, 1995)

- องค์ประกอบไฟตรง $(\bar{p},\bar{q})$ เกิดจากกระแสที่มีความถี่และซีเควนซ์ตรงกับแรงดัน ยกตัวอย่างเช่นกระแสความถี่มูลฐานซีเควนซ์บวกกับแรงดันความถี่มูลฐานซีเควนซ์บวกเหมือนกัน หรือกระแสฮาร์มอนิก 5 ซีเควนซ์ลบกับแรงดันฮาร์มอนิก 5 ซีเควนซ์ลบ เป็นต้น
- องค์ประกอบไฟสลับ $(\tilde{p},\tilde{q})$ เกิดจากกระแสที่มีความถี่หรือซีเควนซ์ไม่ตรงกับแรงดัน

ดังนั้นในกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายสมดุลและไม่มีฮาร์มอนิก องค์ประกอบไฟตรงของ p และ q จะเกิดจากเฉพาะกระแสความถี่มูลฐานซีเควนซ์บวกเท่านั้น และองค์ประกอบไฟสลับของ p และ q จะเกิดมาจากกระแสความถี่มูลฐานซีเควนซ์ลบ (ในกรณีที่โหลดไม่สมดุล) หรือเกิดจากกระแสฮาร์มอนิกเท่านั้น ในกรณีหลังนี้เราสามารถตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้โดยกรองแยกเอาองค์ประกอบไฟสลับออกมาด้วยวงจรกรองผ่านสูงซึ่งเมื่อเรานำองค์ประกอบนี้ไปแปลงกลับเป็นกระแสโดยใช้สมการที่ (2.11) ก็จะได้กระแสฮาร์มอนิกในรูปของสเปซเวกเตอร์

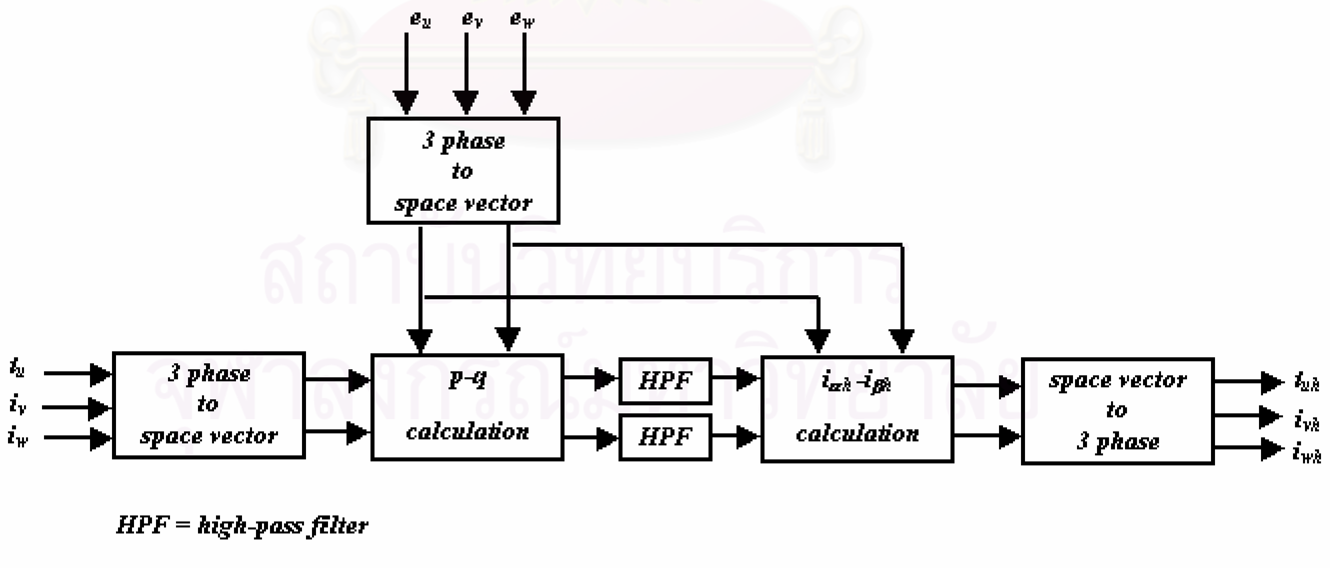
$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & -e_\beta \\ e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

โดยที่ $i_{\alpha h}$ และ $i_{\beta h}$ คือองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกบนแกน α และ β ตามลำดับ ค่ากระแสฮาร์มอนิกในรูปสเปซเวกเตอร์สามารถนำไปแปลงกลับเป็นกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟสตามสมการที่ (2.12)

$$\begin{bmatrix} i_{uh} \\ i_{hv} \\ i_{wh} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \qquad (2.12)$$

โดยที่ i_{uh} i_{vh} และ i_{wh} คือค่าของกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟสของเฟส u v และ w ตามลำดับ หลักการคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกตามวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ตามรูปที่ 2.6 ในกรณีที่โหลดมีความไม่สมดุล เราจะต้องมีหลักการเพิ่มเติมในการกำจัดกระแสความถี่มูลฐานซีเควนซ์ลบออกไปซึ่งจะไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้ อย่างไรก็ตามการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีนี้ยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายประการคือ

- แรงดันแหล่งจ่ายต้องมีความสมดุล
- เมื่อมีฮาร์มอนิกอันดับต่ำในระบบ การกรองแยกเอาองค์ประกอบเหล่านั้นออกมาจากองค์ประกอบความถี่มูลฐานจะทำได้ยาก
- ไม่สามารถแยกตรวจจับเฉพาะบางฮาร์มอนิกได้



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ

2.2.2การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีวงจรกรองบนแกนหมุน

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีการนี้เราสามารถที่จะตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับหรือตรวจจับเฉพาะอันดับที่ต้องการก็ได้

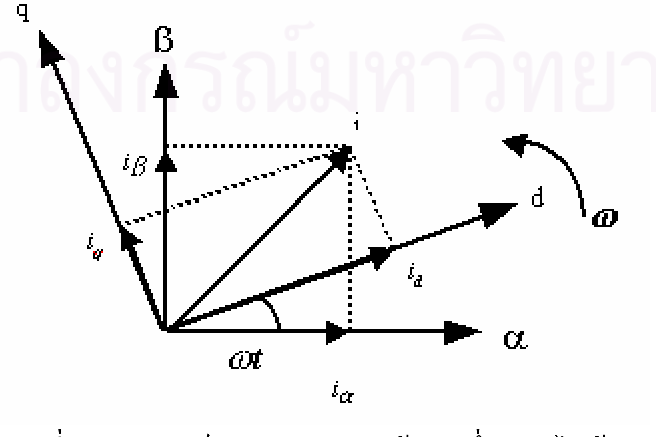
2.2.2.1 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้มีหลักการสำคัญคือต้องกรองเอาสัญญาณกระแสความถี่มูลฐานทิ้งไปและเก็บเอาไว้เฉพาะสัญญาณกระแสฮาร์มอนิก โดยจะเริ่มจากแปลงกระแส 3 เฟสไปเป็นสเปซเวกเตอร์ จากนั้นจะแปลงกระแสสเปซเวกเตอร์บนแกน α-β ไปอยู่บนแกนหมุน d-q ขององค์ประกอบความถี่มูลฐานดังแสดงในรูปที่ 2.7 การแปลงเวกเตอร์กระแสไปอยู่บนแกนหมุน d-q ที่ความถี่ 50 Hz สามารถทำได้โดยการคูณเวกเตอร์กระแสด้วย $e^{-j\omega t}$ เมื่อ ω คือค่าความถี่มูลฐานในหน่วย rad/s เราสามารถเขียนสมการการแปลงให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.13)

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

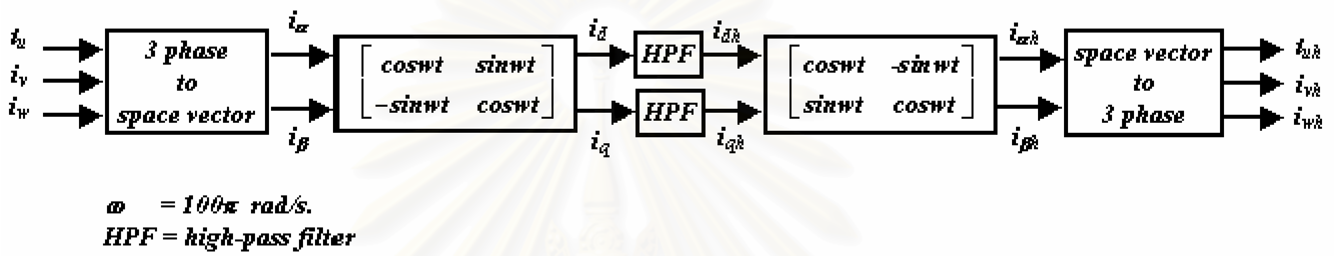
โดยที่ i_d และ i_q คือองค์ประกอบของกระแสบนแกนหมุน d และ q ตามลำดับ บนแกนหมุน d-q กระแสความถี่มูลฐานอันดับบวกจะกลายมาเป็นสัญญาณกระแสตรงส่วนกระแสฮาร์มอนิกอื่นๆจะกลายเป็นสัญญาณกระแสสลับ เราสามารถกรองแยกเอาเฉพาะสัญญาณกระแสสลับออกมาได้โดยใช้วงจรกรองผ่านสูง จากนั้นจึงทำการแปลงกระแสบนแกน d-q กลับไปเป็นกระแสสเปซเวกเตอร์บนแกน α-β โดยการคูณด้วย $e^{j\omega t}$ ซึ่งสามารถแสดงในรูปเมตริกซ์ดังสมการที่ (2.14)

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \tag{2.14}$$



รูปที่ 2.7 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิงซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ 50 Hz

โดยที่ i_{dh} และ i_{qh} คือองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d และ q ตามลำดับ จากกระแสฮาร์มอนิกในรูปสเปซเวกเตอร์เมื่อแปลงกลับมาเป็นกระแสในระบบ 3 เฟสก็จะได้กระแสฮาร์มอนิกตามต้องการ ในกรณีที่โหลดมีกระแสความถี่มูลฐานซีเควนซ์ลบอยู่ด้วยเราก็ต้องใช้หลักการนี้เพื่อกรองเอาสัญญาณกระแสความถี่มูลฐานอันดับลบทิ้งไปโดยจะใช้การแปลงไปอยู่บนแกนหมุนของกระแสความถี่มูลฐานอันดับลบแทนแล้วจึงกรองเอากระแสองค์ประกอบมูลฐานอันดับลบซึ่งจะเป็นกระแสตรงบนแกนหมุนทิ้งไป ขั้นตอนการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในกรณีที่กระแสไม่มีองค์ประกอบความถี่มูลฐานอันดับลบแสดงโดยสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.8 (สรรค์ชิพงษ์ โฆษิตเกษม, 2540)



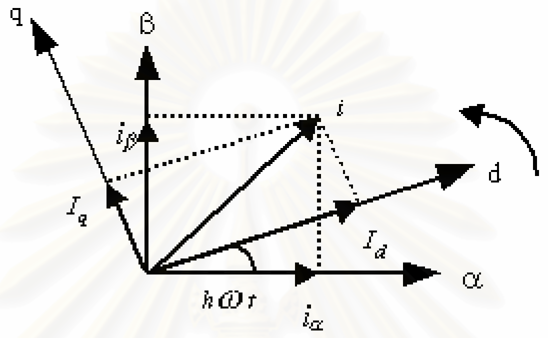
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับโดยใช้วิธีวงจรกรองบนแกนหมุน

โดยวิธีการนี้จะเห็นได้ว่าเรายังคงสามารถตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องแม้ว่าแรงดันด้านแหล่งจ่ายจะมีฮาร์มอนิกหรือความไม่สมดุล อย่างไรก็ดีความถี่ของระบบไฟฟ้าอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยเสมอดังนั้นการแปลงแกนให้ได้ความถี่ตรงกับความถี่มูลฐานของระบบจริงย่อมต้องมีความผิดพลาดเกิดขึ้นซึ่งการตรวจจับก็จะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้โดยมีค่ามากน้อยขึ้นอยู่กับความผิดเพี้ยนของความถี่ในการแปลงแกนและคุณลักษณะการกรองของวงจรกรองผ่านสูงที่ใช้ ยิ่งวงจรกรองผ่านสูงมีการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายและเฟสมากในย่านความถี่ต่ำความคลาดเคลื่อนเมื่อความถี่ผิดเพี้ยนก็จะมาก เราอาจต้องมีการทำเฟสล็อกลูปเพื่อให้ได้ความถี่การแปลงแกนมีความถูกต้องมากขึ้น

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยทฤษฏีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆซึ่งใช้แรงดันเป็นตัวคูณในการหาค่า p และ q นั้น ในความเป็นจริงแล้วก็จะมีความคล้ายคลึงกับการแปลงแกนนั่นเอง เพียงแต่ใช้เวกเตอร์แรงดันแทน $e^{j\omega t}$ ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดปัญหาความถี่ ω ที่ใช้ในการแปลงแกนไม่ตรงกับความถี่ระบบกำลังแต่ก็จะมีปัญหาอื่นแทนดังได้กล่าวมาแล้ว การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกนในกรณีที่ระบบมีฮาร์มอนิกอันดับต่ำปนอยู่ก็ยังคงมีปัญหาเช่นเดียวกับการใช้ทฤษฏีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆคือการกรองแยกกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่ำเหล่านั้นออกจากกระแสองค์ประกอบความถี่มูลฐานจะทำได้ยาก

2.2.2.2 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ (N. Nanaumi,1996) (A. Salem nia,1996)

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับกระทำได้โดยแปลงกระแสใน 3 เฟสไปเป็นสเปซเวกเตอร์ จากนั้นเราจะแปลงสเปซเวกเตอร์ของกระแสไปอยู่บนแกนหมุนที่ความถี่ฮาร์มอนิกในอันดับและซีเควนซ์ที่ต้องการตรวจจับโดยการคูณด้วย $e^{-jh\omega t}$ เมื่อ h คืออันดับและซีเควนซ์ของฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับ (ยกตัวอย่างเช่น h = -5 หมายถึงฮาร์มอนิกที่ 5 ซีเควนซ์ลบ) และ ω คือค่าความถี่มูลฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยสมการการแปลงแกนหมุนที่อยู่ในรูปเมตริกซ์แสดงได้ดังสมการที่ (2.15)



รูปที่ 2.9 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิง ซึ่งหมุนไปด้วยความถี่

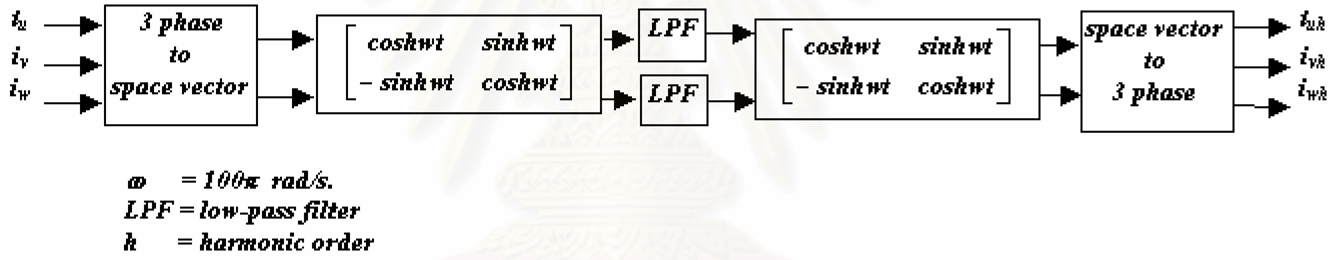
$$\begin{bmatrix} i_{d'} \\ i_{q'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(h\omega t) & \sin(h\omega t) \\ -\sin(h\omega t) & \cos(h\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

โดยที่ $i_{d'}$ และ $i_{q'}$ คือองค์ประกอบของกระแสบนแกน d' และ q' ซึ่งหมุนด้วยความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ h ตามลำดับ เมื่อแปลงแกนกระแสแล้วกระแสฮาร์มอนิกที่มีอันดับและซีเควนซ์เดียวกับแกนหมุนจะกลายเป็นสัญญาณกระแสตรง ซึ่งเราจะกรองเอาสัญญาณส่วนนี้เก็บเอาไว้โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำ ส่วนกระแสฮาร์มอนิกอื่นๆรวมทั้งกระแสความถี่มูลฐานจะกลายเป็นองค์ประกอบกระแสสลับบนแกนหมุนนี้และจะถูกกรองทิ้งไป จากนั้นเราจึงทำการแปลงกระแสฮาร์มอนิกที่กรองเก็บไว้ได้ในรูปกระแสตรงกลับมาอยู่บนแกนนิ่งโดยใช้สมการที่ (2.16)

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(h\omega t) & -\sin(h\omega t) \\ \sin(h\omega t) & \cos(h\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d'h} \\ i_{q'h} \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

โดยที่ $i_{d'h}$ และ $i_{q'h}$ คือองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d' และ q' ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการแปลงสเปซเวกเตอร์ของกระแสฮาร์มอนิกไปเป็นกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟส ก็จะได้กระแสฮาร์มอนิกในอันดับและซีเควนซ์ที่ต้องการ หลักการคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกตา

มที่กล่าวมาสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.10 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีนี้จะยังคงมีปัญหาในการกรองแยกเอาความถี่ ฮาร์มอนิกที่อยู่ใกล้กันออกมาได้ยากเช่นเดียวกับวิธีการตรวจจับโดยใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ และวิธีการแปลงแกนหมุนแบบตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ กล่าวคือ หากเราใช้วงจรกรองผ่านต่ำแบบอันดับ 1 เป็น $\frac{\omega_c}{s+\omega_c}$ เมื่อ ω_c คือความถี่หักมุม ถ้าเราใช้ความถี่หักมุมค่าสูงซึ่งจะให้การตรวจจับฮาร์มอนิกมีผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ที่เร็วแต่การกรองทิ้งความถี่ที่อยู่ใกล้เคียงกับความถี่ที่จะตรวจจับและความถี่มูลฐานจะทำได้ไม่ดี ในขณะที่เมื่อใช้ความถี่หักมุมค่าต่ำการกรองทิ้งความถี่ที่ไม่ต้องการจะทำได้ดีแต่อย่างไรก็ตามตัวตรวจจับจะมีผลตอบสภาวะชั่วครู่ที่ช้า ดังนั้นจากปัญหาที่กล่าวมาเราสามารถสรุปได้ว่าการตรวจจับฮาร์มอนิกโดยวิธีการใช้วงจรกรองบนแกนหมุนจะไม่สามารถมีคุณลักษณที่ดีในการกรองแยกกระแสความถี่ที่ต้องการออกจากกระแสความถี่อื่นๆพร้อมกันกับการมีผลตอบสภาวะชั่วครู่ที่เร็วได้



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h
โดยใช้วงจรกรองบนแกนหมุน

2.2.2.3 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟที

นอกจาก 2 วิธีดังกล่าวข้างต้นการวิเคราะห์สเปกตรัมยังอาจทำได้ด้วยวิธีอื่น ซึ่งวิธีหนึ่งก็คือการทำ Recursive Discrete Fourier Transform (รีเคอร์ซีฟดีเอฟที) ซึ่งเป็นวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ วิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีมีคุณลักษณะที่ดีคือ

- ทำการคำนวณสเปกตรัมโดยเลือกทำเฉพาะบางความถี่
- มีการคำนวณที่ไม่มากและไม่ยุ่งยากซับซ้อน ถ้าเราทำการคำนวณค่าสเปกตรัมที่เฉพาะบางความถี่

- สามารถคำนวณได้ในแบบ Real-Time คือ สามารถคำนวณปรับค่า DFT ได้ทันทีหลังจากสุ่มค่าสัญญาณเข้ามาใหม่
- ตัวตรวจจับที่ได้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายเพื่อการวิเคราะห์ได้
- สามารถนำไปใช้กับวงจรกรองแอกทีฟทั้งแบบที่กำจัดฮาร์มอนิกทุกอันดับหรือเฉพาะบางอันดับก็ได้
- มีผลตอบสนองรวดเร็วและมีการปรับค่าสัญญาณขาออกทันทีที่มีการสุ่มข้อมูลกระแสเข้ามาใหม่
- ค่าที่ได้จากการทำรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีจะเป็นสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการโดยตรง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นคำสั่งกระแสชดเชยได้

ในขณะที่วิธีการคำนวณ DFT ที่นิยมใช้กันมากคือเทคนิค Fast Fourier Transform (FFT) ซึ่งมีข้อแตกต่างจากวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีดังนี้คือ

<u>ข้อดีการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยการทำ FFT</u>

- ให้ค่า Fourier Transform ของทุกสเปกตรัมอย่างแม่นยำ สามารถแยกแยะกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่ใกล้กันได้ดี

<u>ข้อด้อยการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยการทำ FFT</u>

- มีการคำนวณที่มากและยุ่งยาก
- ผลลัพธ์จากการคำนวณที่ได้จะเป็นข้อมูลขนาดและเฟสของกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด ไม่ใช่สัญญาณกระแสโดยตรง จึงต้องมีการคำนวณสร้างสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการจากข้อมูลเหล่านี้อีกทีหนึ่ง
- ตัวตรวจจับไม่เป็นเชิงเส้นยากต่อการวิเคราะห์
- มีผลตอบที่ค่อนข้างช้าคือประมาณ 2 คาบเวลาของความถี่มูลฐาน 50 Hz โดยใช้ 1 คาบแรกสำหรับเก็บข้อมูลและอีกประมาณ 1 คาบสำหรับการคำนวณและสร้างกระแสชดเชย

การตรวจจับกระแสด้วยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีมีหลักการและแนวคิดในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกดังนี้คือ สัญญาณรายคาบแบบเวลาไม่ต่อเนื่องสามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลรวมของเทอม $e^{\frac{j2\pi h}{N}}$ โดยที่ h= 0,1,-1,2,-2 ... ,N-1 และ N คือจำนวนข้อมูลต่อคาบ ดังแสดงตามสมการที่ (2.17) ซึ่งก็คืออยู่ในรูปผลรวมขององค์ประกอบความถี่ต่างๆ

$$g(k) = \sum_{h=0}^{N-1} G_h \cdot e^{\frac{j2\pi hk}{N}} \tag{2.17}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ G_h คือค่า DFT ของฮาร์มอนิกอันดับที่ h และ g(k) เป็นสัญญาณเข้ามีคาบเท่ากับ N

สเปซเวกเตอร์ของกระแสในระบบกำลัง 3 เฟสจะถูกสุ่มค่าเข้ามาและนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบที่ความถี่ต่างๆได้ด้วยวิธีการทำ DFT เราสามารถคำนวณ DFT ของสัญญาณรายคาบแบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังสมการที่ (2.18)

$$G_h = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} g(k)\cdot W^{-hk} \qquad (2.18)$$

เมื่อ $W = e^{\frac{j2\pi}{N}}$

ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ตรวจจับเข้ามาอย่างต่อเนื่องเราจะต้องทำการเลื่อนกรอบข้อมูล N จุดไปตามเวลาเพื่อนำข้อมูล ณ จุดเวลาใหม่มาใช้ เราสามารถหาค่า DFT ณ จุดเวลาที่ k ได้ดังสมการที่ (2.19) คือ

$$G_h(k) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} g(k-i)W^{hi} \qquad (2.19)$$

การทำ DFT ในลักษณะนี้เราเรียกว่า Running DFT ซึ่งจะวิเคราะห์ข้อมูลตั้งแต่จุดที่ k-N+1 จนถึงจุดปัจจุบันคือ k โดยเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่เลื่อนไปกับกรอบคือ W^{hi} ดังแสดงได้รูปที่ 2.11

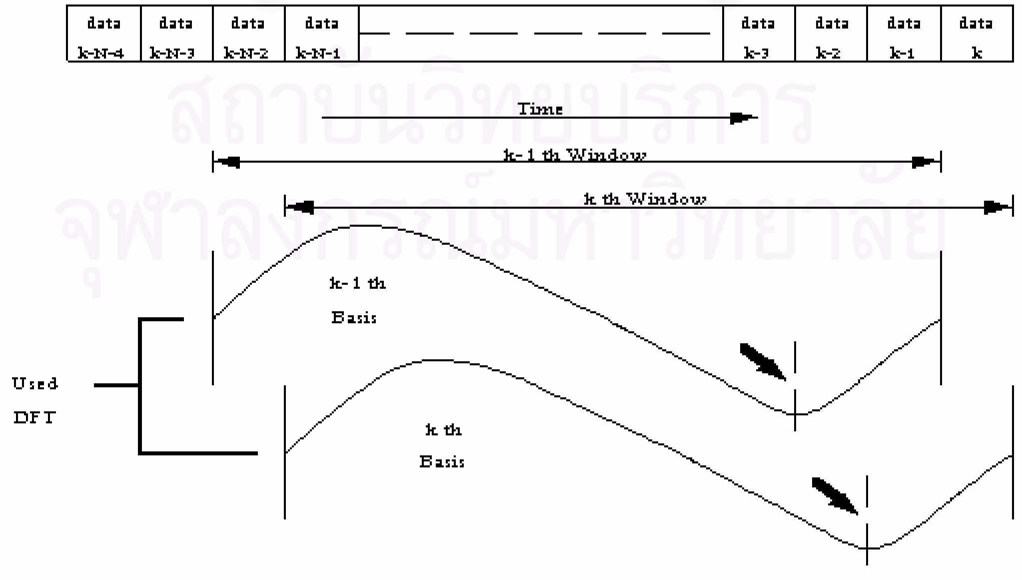
จากสมการที่ (2.19) เราสามารถเขียนเป็นสมการรีเคอร์ซีฟ ได้ดังสมการที่ (2.20)

$$G_h(k) = \frac{1}{N}(g(k) - g(k-N)) + W^h G_h(k-1) \qquad (2.20)$$

และหาฟังก์ชันโอนย้าย ใน z โดเมนได้ดังสมการที่ (2.19)

$$\hat{D}_h(z) = \frac{\hat{G}_h(z)}{\hat{g}(z)} = \frac{1}{N}\frac{1-z^{-N}}{1-W^h z^{-1}} \qquad (2.21)$$

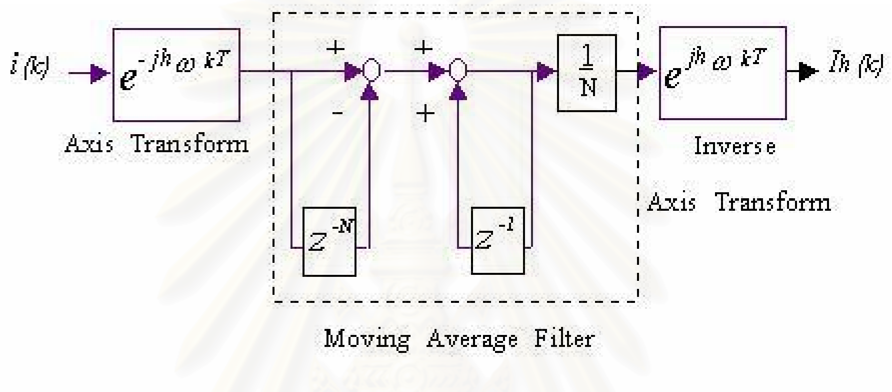
โดยที่ “$\hat{.}$” แสดงถึงตัวแปรหรือฟังก์ชันโอนย้ายใน z โดเมน



รูปที่ 2.11 ลักษณะของสัญญาณอ้างอิงสำหรับการทำ DFT แบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อเราพิจารณาการทำรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีตามสมการที่ (2.21)แล้ว จะพบว่าตัวตรวจจับจะทำงานได้อย่างถูกต้องเมื่อขั้วและศูนย์อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วยพอดีและขั้วต้องตัดกับศูนย์พอดีที่ความถี่ที่ต้องการตรวจจับ ในกรณีของศูนย์ของ $1 - z^{-N}$นั้นเราสามารถทำให้อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วยได้อย่างถูกต้อง แต่สำหรับขั้วของ $1^{\circ} W^{-h} z^{-1}$ อาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่ง W^{-h}เนื่องจากสัมประสิทธิ์ W^{-h}เป็นตัวเลขอตรรกยะ ผลของความคลาดเคลื่อนนี้จะทำให้ผลตอบสนองต่อขนาดของฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับผิดพลาดไป เพื่อแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนนี้ เราจะเปลี่ยนการคำนวณรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีจากการคำนวณบนแกนนิ่งมาคำนวณบนแกนอ้างอิงซึ่งหมุนด้วยความถี่ฮาร์มอนิกแทน โดยมีการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การทำรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีบนแกนหมุน

โดยที่ $\omega = 100\pi \ rad/sec$

h คืออันดับของฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับ

เมื่อคำนวณรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีบนแกนอ้างอิงหมุนแล้วเราสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้าย $\hat{D}_h(z)$ บนแกนอ้างอิงหมุนได้ใหม่เป็นสมการที่ (2.22)

$$\hat{D}'_h(z) = \frac{1}{N}\frac{1-z^{-N}}{1-z^{-1}} \tag{2.22}$$

เราสามารถทำการคำนวณสมการที่(2.22)ได้โดยไม่มีความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์เหมือนในกรณีของการคำนวณบนแกนนิ่ง

2.3 การคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย

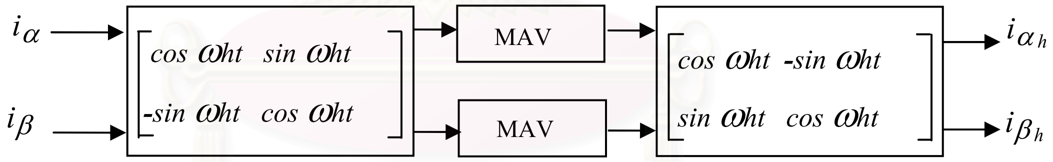
การตรวจจับและคำนวณกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สายซึ่งมีโหลดไม่สมดุลจะแตกต่างจากระบบ 3 เฟส 3 สาย เนื่องจากจะมีกระแสไหลในสายนิวทรัลจึงจะต้องมีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลด้วย ในระบบ 3 เฟส 4 สาย กระแสทั้ง 3 เฟสจะมีอิสระอิสระต่อกัน ไม่เหมือนกับกรณี 3 เฟส 3 สาย ดังนั้นการพิจารณาแปลงกระแส 3 เฟสไปเป็นกระแสในรูปสเปซเวกเตอร์ จึงต้องใช้สมการที่ (2.23) แทนสมการที่ (2.4)

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_Z \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \tag{2.23}$$

องค์ประกอบของสเปซเวกเตอร์กระแสในแกนอ้างอิง α, β, z จะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาฮาร์มอนิกโดยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีต่อไป อย่างไรก็ตามวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีที่มีการวิจัยมาก่อนหน้านี้จะสามารถประยุกต์ใช้กับระบบ 3 เฟส 3 สายเท่านั้น แต่ไม่สามารถนำมาใช้กับเวกเตอร์กระแสในสมการที่ (2.23) ได้โดยตรง เราจึงต้องพัฒนาวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีให้ใช้ได้กับระบบ 3 เฟส 4 สายดังต่อไปนี้

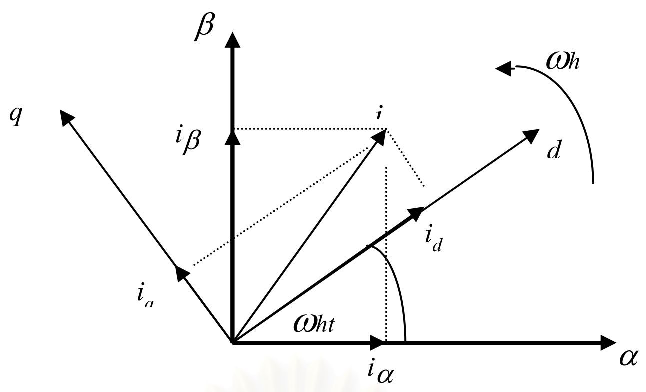
2.3.1 การคำนวณหาฮาร์มอนิกในกระแสเฟสด้วยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟที

การคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในสายเฟสมีวิธีการดังแสดงในรูปแบบตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในสายเฟส

โดยเราจะนำสัญญาณกระแสที่ได้จากการแปลงเป็นสเปซเวกเตอร์ในองค์ประกอบ α, β มาทำการแปลงไปเป็นสัญญาณกระแสที่อ้างอิงกับแกนอ้างอิง d, q ที่หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ฮาร์มอนิกดังที่แสดงในรูปที่ 2.14 และคำนวณได้ตามสมการที่ (2.24)



รูปที่ 2.14 การหมุนแกนเพื่อคำนวณฮาร์มอนิกในสายเฟส

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega ht & \sin \omega ht \\ -\sin \omega ht & \cos \omega ht \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2.24}$$

การย้ายแกนอ้างอิงดังกล่าวจะทำให้องค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เดิมมีความถี่เป็น $h\omega$ กลายไปเป็นสัญญาณไฟตรง ส่วนองค์ประกอบฮาร์มอนิกอื่นๆและองค์ประกอบมูลฐานก็จะกลายไปเป็นสัญญาณไฟสลับแทน

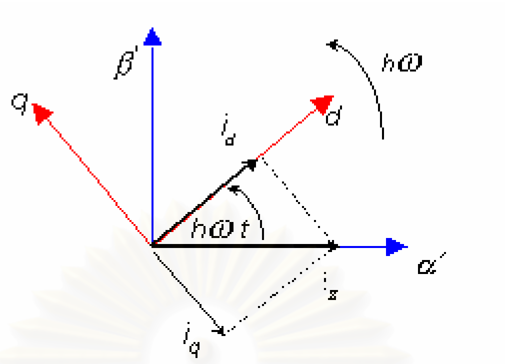
สัญญาณกระแส i_d , i_q ที่ได้ตามสมการที่ (2.24) จะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยโดยการผ่าน *Moving Average Filter (MAV)* เพื่อแยกเอาเฉพาะองค์ประกอบสัญญาณไฟตรงซึ่งก็คือขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เราต้องการตรวจจับนั่นเอง ส่วนสัญญาณความถี่ฮาร์มอนิกอื่นรวมทั้งองค์ประกอบมูลฐานที่ไม่ต้องการตรวจจับจะถูกกรองทิ้งไปทั้งหมด ขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ได้คือ i_{dh} , i_{qh} จะถูกนำมาแปลงกลับเป็นสัญญาณกระแสที่อ้างอิงกับแกนนิ่ง ได้เป็นสัญญาณกระแสฮาร์มอนิก $i_{\alpha h}$, $i_{\beta h}$ ดังแสดงในสมการที่ (2.25)

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega ht & -\sin \omega ht \\ \sin \omega ht & \cos \omega ht \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

2.3.2 การคำนวณหาฮาร์มอนิกในสายนิวทรัล

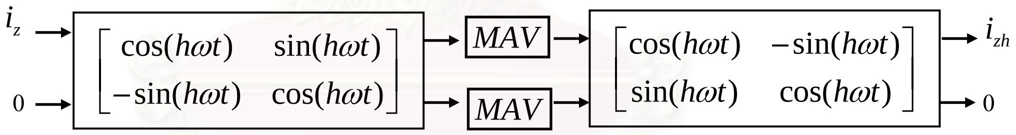
กระบวนการคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลจะคล้ายกับกระบวนการคำนวณในสายเฟส แต่มีข้อแตกต่างกันคือสัญญาณเข้าซีเควนซ์ศูนย์มีเพียงองค์ประกอบเดียวคือ i_z ซึ่งเป็นส่วนของกระแสที่ไหลในสายนิวทรัลไม่ได้เป็นเวกเตอร์ที่มี 2 เป็นองค์ประกอบ จึงไม่สามารถใช้การคำนวณเหมือนกับกรณีกระแสเฟสได้ ในที่นี้เราจะพิจารณาว่ากระแส i_z เป็นสัญญาณกระแสในแนวแกน α' เท่านั้น (ดูรูปที่ 2.15) ดังนั้นเพื่อให้เราสามารถใช้วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีเหมือนกับที่ใช้ในส่วนของกระแสเฟสได้ เราจึงต้องกำหนดให้

องค์ประกอบของสัญญาณเข้าอีกองค์ประกอบหนึ่งเป็นศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 2.16 กล่าวคือเราจะมองเสมือนว่ากระแส i_z เป็นสเปซเวกเตอร์ $\begin{bmatrix} i_z & 0 \end{bmatrix}^T$ แทน



รูปที่ 2.15 การหมุนแกนเพื่อคำนวณหาค่าฮาร์มอนิกในสายนิวทรัล

เมื่อทำการแปลงเวกเตอร์กระแส $\begin{bmatrix} i_z & 0 \end{bmatrix}^T$ ไปเป็นสัญญาณกระแสบนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความถี่ฮาร์มอนิกจะได้เป็นสัญญาณกระแส i_{zd} และ i_{zq} ตามลำดับ ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะถูกนำมาทำ *Moving Average* และแปลงกลับเป็นสัญญาณบนแกนอ้างอิงนิ่งเช่นเดียวกับการคำนวณฮาร์มอนิกในกระแสเฟสดังแสดงในรูปที่ 2.16 องค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิก i_{Zh} ที่คำนวณได้จะมีค่าอยู่บนแกน α' เท่านั้น



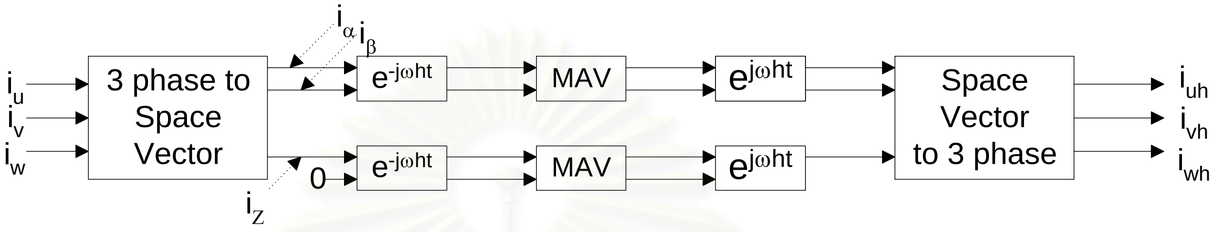
รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรัล

สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกที่ได้ทั้งหมดคือ $i_{\alpha h}$, $i_{\beta h}$ และ i_{zh} จะถูกนำมาแปลงกลับจากสเปซเวกเตอร์เป็นกระแสฮาร์มอนิก 3 เฟสที่ต้องการชดเชยโดยใช้เมตริกซ์ตามสมการที่ (2.26)

$$\begin{bmatrix} i_{cu}^* \\ i_{cv}^* \\ i_{cw}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \\ i_{zh} \end{bmatrix} \tag{2.26}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ i_c^* คือกระแสคำสั่งเพื่อชดเชยฮาร์มอนิก ข้อแตกต่างที่สำคัญอีกอันหนึ่งเมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สายคือวงจรไฟฟ้ากำลังแบบ 3 เฟส 4 สายมักจะเป็นวงจรที่มีโหลดไม่สมดุลซึ่งทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกในอันดับบวกและลบขึ้นพร้อมกันด้วย ดังนั้นการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกจะต้องตรวจจับทั้งส่วนที่เป็นกระแสฮาร์มอนิกอันดับบวกและกระแสอันดับลบพร้อมๆกัน บล็อกไดอะแกรมของการตรวจจับฮาร์มอนิกโดยรวมแสดงได้ดังรูปที่ 2.17

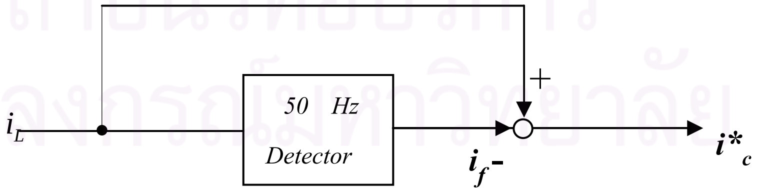


รูปที่ 2.17 ภาพรวมของการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย

2.4 กระแสชดเชยฮาร์มอนิก

การกำจัดกระแสฮาร์มอนิกสามารถทำได้ทั้งแบบกำจัดหมดและแบบกำจัดเฉพาะบางอันดับของฮาร์มอนิก

2.4.1 การชดเชยแบบกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมด การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในกรณีนี้คือเราจะตรวจจับเฉพาะองค์ประกอบที่ความถี่มูลฐาน กล่าวคือเราจะทำการแปลงสัญญาณสเปซเวกเตอร์บนแกน α, β ไปอยู่บนแกนอ้างอิง *d, q* ซึ่งหมุนที่ความถี่ *50 Hz* ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยที่ $\omega = 100\pi$ *rad/sec* สำหรับกระแสอันดับบวกและ $\omega = -100\pi$ *rad/sec* สำหรับกระแสอันดับลบ องค์ประกอบของกระแสที่ความถี่มูลฐานบนแกนหมุน *d,q* จะกลายเป็นสัญญาณไฟตรงซึ่งจะถูกแยกออกมาด้วยการคำนวณหา *Moving Average* สัญญาณที่ได้คือ i_f จะถูกนำมาลบออกจากกระแสโหลด i_l ส่วนที่เหลือก็จะเป็นกระแสฮาร์มอนิก i^*_c ดังแสดงในรูปที่ 2.18

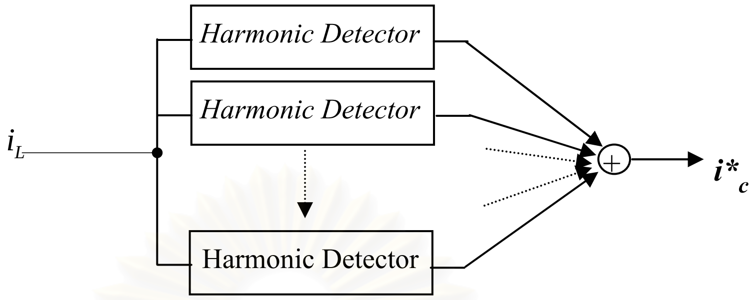


รูปที่ 2.18 การคำนวณกระแสฮาร์มอนิกแบบกำจัด

2.4.2 การชดเชยแบบกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะบางอันดับ หลักการของการกำจัดฮาร์มอนิกในกรณีนี้ก็คือแยกการตรวจจับเฉพาะฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับที่ต้องการกำจัดแล้วจึงนำสัญญาณที่ได้มารวมกัน

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เป็นสัญญาณฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดทั้งหมด โดยมีช่วงของฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับจะอยู่ระหว่างอันดับที่ 3 ถึง 19 การตรวจจับในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับการชดเชยเฉพาะบางอันดับ

บทที่ 3

การควบคุมแบบวิธีทำซ้ำและเสถียรภาพของการควบคุม

ในบทนี้เราจะนำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยฮาร์มอนิกแบบวิธีทำซ้ำเนื่องจากสัญญาณที่ต้องการควบคุมเป็นสัญญาณไซน์หลายความถี่ปะปนกัน โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบทำซ้ำและเสถียรภาพของวงรอบควบคุมกระแส ท้ายสุดจะแสดงผลการจำลองการทำงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติของการควบคุมแบบวิธีทำซ้ำ

3.1 การสร้างและควบคุมกระแสชดเชย

วงจรกรองแอกทีฟจะมีวงจรอินเวอร์เตอร์ทางด้านออกซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างกระแสชดเชย i_c ตามกระแสคำสั่ง i_c^* ที่คำนวณมาได้เพื่อจ่ายเข้าไปหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกในระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้เราจะใช้อินเวอร์เตอร์แบบควบคุมกระแส 3 เฟสที่มีสวิตช์ 6 ตัวและมีคาปาซิเตอร์เป็นตัวสร้างบัสไฟตรง อินเวอร์เตอร์จะต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งใช้ในการสร้างกระแส ดังแสดงในรูปที่ 3.1 อินเวอร์เตอร์จะสร้างแรงดันออก v เพื่อเอาชนะแรงดันของแหล่งจ่าย 3 เฟส e เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระบบมีค่าเพียงพอที่จะทำให้กระแสไหลเข้าสู่ระบบ 3 เฟสได้ตามต้องการตามสมการที่ (3.1) - (3.3) คำอธิบายข้างต้นสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.2

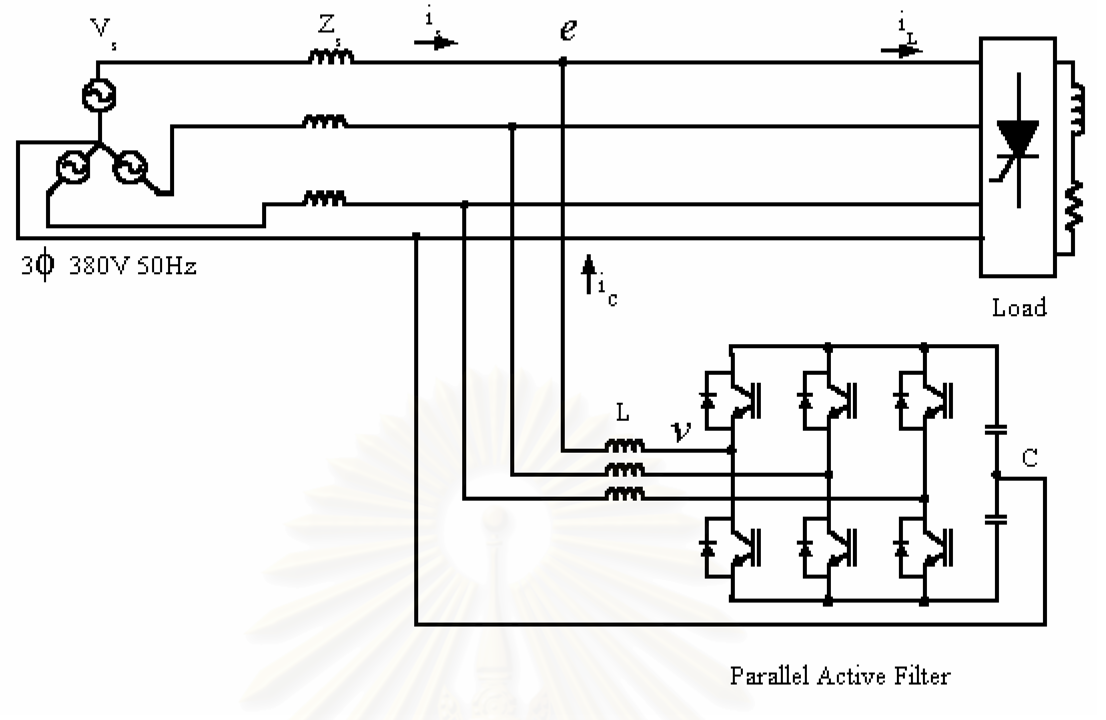
$$L\frac{di_{cu}}{dt} = v_u - e_u \tag{3.1}$$

$$L\frac{di_{cv}}{dt} = v_v - e_v \tag{3.2}$$

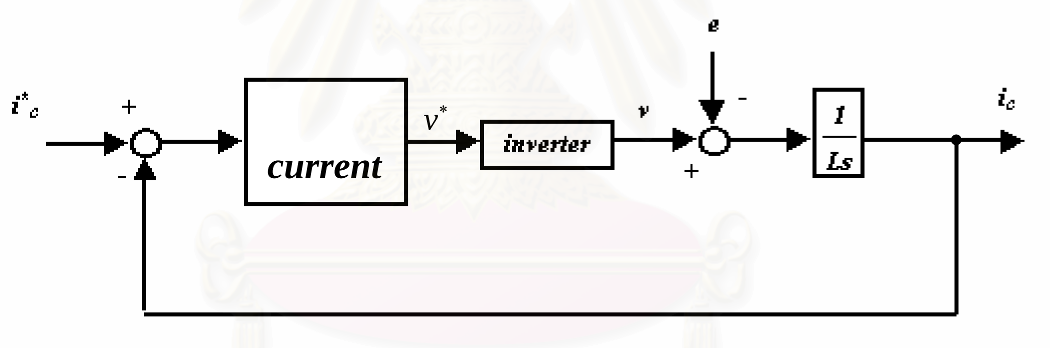
$$L\frac{di_{cw}}{dt} = v_w - e_w \tag{3.3}$$

โดยที่ i_c คือกระแสชดเชยจากวงจรกรองแอกทีฟ

L คือค่าตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้า



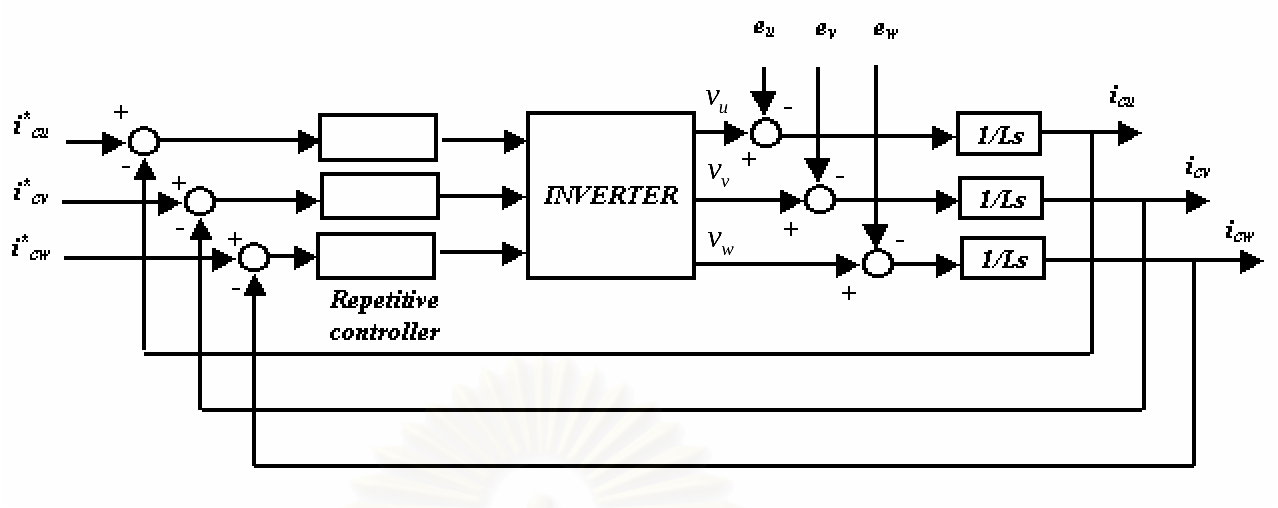
รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อวงจรกรองแอกทีฟเข้ากับระบบไฟฟ้า 3 เฟส



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงวงรอบการควบคุมกระแส

การสร้างกระแสชดเชยให้ได้ตามกระแสคำสั่งสามารถทำได้หลายแบบ แต่เนื่องจากกระแสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยสัญญาญไซน์หลายความถี่ปะปนกัน ถ้าเราใช้ตัวควบคุมกระแสแบบPI กระแสที่สร้างได้จริงในสถานะอยู่ตัวจะผิดพลาดจากกระแสคำสั่ง อันเนื่องมาจากอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ PI มีค่าจำกัดที่ความถี่ฮาร์มอนิก ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะใช้ควบคุมสัญญาณคำสั่งที่มีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์หลายความถี่ปะปนกัน ซึ่งมีหลักการทำงานแสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 3.3

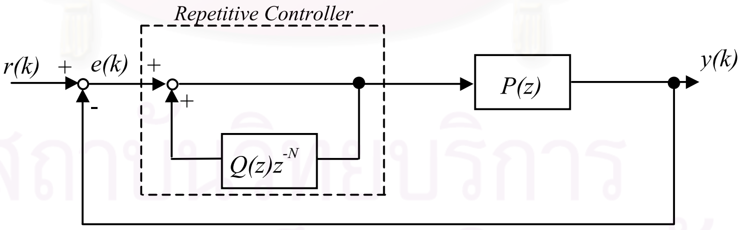
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมกระแสวิธีทำซ้ำ

<u>3.2 ตัวควบคุมแบบทำซ้ำ</u>

ระบบควบคุมแบบทำซ้ำสามารถเขียนให้อยู่ในรูปบล็อกไดอะแกรมของระบบในเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังรูปที่ 3.4 โดยที่ *P(z)* คือฟังก์ชันโอนย้ายของระบบซึ่งในที่นี้ก็คืออิมพีแดนซ์ที่เชื่อมโยงระหว่างวงจรกรองแอกทีฟกับสายกำลัง, *Q(z)* คือ วงจรกรองผ่านต่ำเพื่อรักษาเสถียรภาพของวงรอบควบคุม, *r(k)* คือสัญญาณอ้างอิง, *y(k)* คือสัญญาณด้านออก, *e(k)* คือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการตามรอย (สกุลรัตน์ ศิริพันธ์โนน, 2543)



รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมแบบทำซ้ำ

ฟังก์ชันโอนย้ายของระบบจากสัญญาณอ้างอิง *r(k)* ไปยังค่าความผิดพลาด *e(k)* เป็นไปตามสมการที่ (3.4)

$$H(z) = \frac{E(z)}{R(z)} = \frac{1}{1 + \dfrac{P(z)}{1 - Q(z) \cdot z^{-N}}} \tag{3.4}$$

โดยที่ *E(z), R(z)* คือผลการแปลง *Z* ของ *e(k)* และ r*(k)* ตามลำดับ กำหนดให้สัญญาณอ้างอิงมีคาบเป็น *N* หรือ *r(k)=r(k+N)* สำหรับทุกค่า *k* ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูริเยร์ได้ดังสมการที่ (3.5)

$$r(k)=\sum_{h=0}^{N-1} c_h \cdot e^{j(\frac{2\pi h}{N})k} \tag{3.5}$$

โดยที่ c_h คือสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูริเยร์ ดังนั้นเราสามารถพิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ของสมการที่ (3.4) ที่ความถี่ ω ใดๆได้โดยการแทนค่าตามสมการที่ (3.6)

$$H(j\omega)=H(z)\Big|_{z=e^{j\omega T}} \tag{3.6}$$

ในกรณีที่ *Q(z)*=1 และฟังก์ชันโอนย้าย *P(z)* เสถียร เราจะได้ว่า

$$H(j(\frac{2\pi}{NT}).h)=0, \qquad h=0,1,...,N-1 \tag{3.7}$$

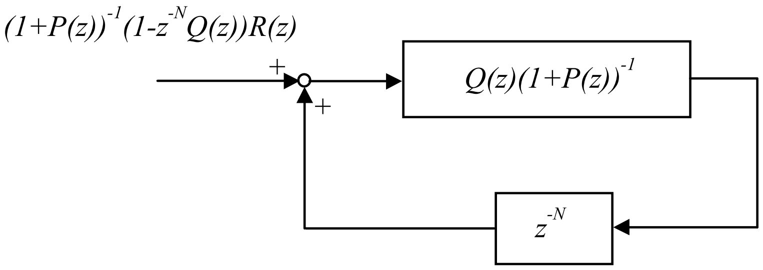
กล่าวคือ $H(j\omega)$ มีค่าเป็นศูนย์ที่ทุกๆความถี่ฮาร์มอนิก ดังนั้นจากสมการที่ (3.4) และ (3.7) จะพบว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณอ้างอิงที่เป็นรายคาบจะถูกตัวควบคุมแบบทำซ้ำกำจัดหมดไป แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเราไม่สามารถที่ทำให้อินเวอร์เตอร์กำจัดค่าความผิดพลาดที่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกใดๆได้ทุกอันดับ เพราะเราต้องคำนึงถึงเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบด้วยซึ่งจะทำให้เราต้องใส่วงจรกรองผ่านต่ำ $Q(z)\neq 1$ เข้าไปในวงรอบของการควบคุม ในกรณีที่ *Q(z)* เป็นวงจรกรองผ่านต่ำเราจะสามารถกำจัดค่าความผิดพลาดได้เฉพาะในส่วนที่มีความถี่อยู่ในย่านผ่านต่ำของวงจรกรอง *Q(z)* เท่านั้น

<u>การวิเคราะห์เสถียรภาพ</u>

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบในรูปที่ 3.4 เราจะพิจารณาส่วนป้อนกลับที่เป็นวงรอบปิด จากรูปที่ 3.4 เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.8)

$$E(z)=z^{-N}Q(z)(1+P(z))E(z)+(1+P(z))^{-1}(1-z^{-N}Q(z))R(z) \tag{3.8}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ระบบควบคุมสมมูลของระบบควบคุมแบบทำซ้ำ

สมการที่ (3.8) สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.5 โดยอาศัยทฤษฎีอัตราขยายค่าเล็ก (Small Gain Theorem) เราจะพบว่าถ้า

1. $(1+P(z))^{-1}$ มีเสถียรภาพ และ (3.9)

2. $\left|Q(z)(1+P(z))^{-1}\right|_{z=e^{j\omega T}} < 1$ สำหรับทุกค่า ω (3.10)

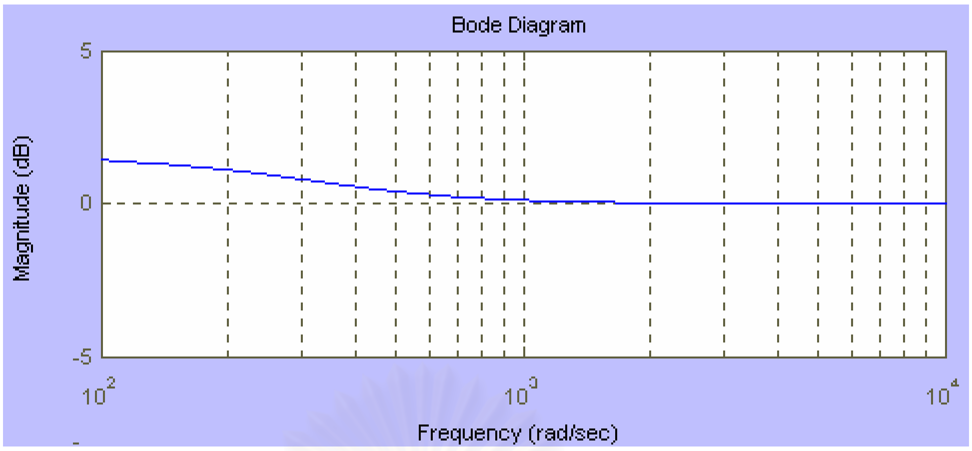
ระบบจะมีเสถียรภาพ (Shinji Hara et. al, 1988)

สมการที่ (3.10) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\left|Q(z)\right|_{z=e^{j\omega T}} < \left|1+P(z)\right|_{z=e^{j\omega T}} \quad \text{สำหรับทุกค่า } \omega \qquad (3.11)$$

สำหรับระบบในวิทยานิพนธ์นี้ $P(z) = zT/[z(L+rT)-L]$ เมื่อ L และ r เป็นค่าความเหนี่ยวนำ18 mH และความต้านทาน 5 Ohm เชื่อมโยงระหว่างวงจรกรองแอกทีฟกับสายกำลัง ตามลำดับ ดังนั้นผลตอบสนองเชิงความถี่ของ $|1+P(z)|$ จึงเป็นดังรูปที่ 3.6 สมการ (3.11) ชี้ให้เห็นว่าถ้าเราเลือกวงจรกรองผ่านต่ำ *Q(z)* ที่มีอัตราขยายต่ำกว่า $|1+P(z)|$ ในทุกย่านความถี่ ระบบจะมีเสถียรภาพ ในทางตรงข้ามกันถ้าเลือกวงจรกรองผ่านต่ำ *Q(z)* ที่มีอัตราขยายมากกว่า $|1+P(z)|$ ที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งระบบจะมีโอกาสขาดเสถียรภาพได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ 1+P(z)

วงจรกรองผ่านต่ำในระบบเวลาไม่ต่อเนื่องมีอยู่ 2 ประเภทคือแบบ IIR (Infinite Impulse Response) และแบบ FIR (Finite Impulse Response) ซึ่งในการที่จะรักษาเสถียรภาพของระบบนั้นเราสามารถเลือกใช้ได้ทั้ง 2 แบบ แต่เมื่อคำนึงถึงความต้องการกำจัดค่าความผิดพลาดให้หมดไป วงจรกรองผ่านต่ำแบบ IIR จะไม่เหมาะเนื่องจากสัญญาณที่ออกจากวงจรกรองผ่านต่ำแบบ IIR จะมีการเลื่อนเฟสแบบไม่เชิงเส้นทำให้รูปคลื่นสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองเกิดความเพี้ยนไปจากสัญญาณเดิม ส่งผลให้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำสร้างคำสั่งที่จะไปชดเชยผิดพลาด แต่ในกรณีที่เราเลือกใช้วงจรกรองผ่านต่ำแบบ FIR สัญญาณที่ออกจากวงจรกรองผ่านต่ำนี้จะมีเฟสเลื่อนไปเป็นแบบเชิงเส้นรูปคลื่นสัญญาณจึงยังคงเดิมเพียงแต่มีการล้าหลังทางเวลาเท่านั้น ซึ่งเวลาล้าหลังสามารถแก้ไขได้โดยการชดเชยเฟสในตัวควบคุมแบบทำซ้ำ ดังนั้นตัวควบคุมแบบทำซ้ำจะสามารถกำจัดค่าความผิดพลาดให้หมดไปได้อย่างมีเสถียรภาพ ในที่นี้เราจึงเลือกใช้วงจรกรองผ่านต่ำแบบ FIR ซึ่งมีขั้นตอนในการออกแบบดังนี้

1.กำหนดลักษณะต่างๆของวงจรกรองผ่านต่ำ

cut off frequency, fc	1000 Hz
sampling frequency, fs	10 kHz

2.เลือกชนิดของ Window

การเลือกชนิดของ Window มีความสัมพันธ์กับค่า Stop Band attenuation ซึ่ง Window ที่นิยมใช้คือ Hamming Window ดังแสดงในสมการที่ (3.12)

$$w(n) = 0.54 + 0.46\cos(\frac{2*\pi*n}{M}) \qquad (3.12)$$

โดยที่ M = จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง

$$n:(-M/2) \le n \le (M/2)$$

ในที่นี้เราเลือกจำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองเป็น 10

3. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองผ่านต่ำ

ค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองผ่านต่ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.13)

$$h(n) = h_d(n) * w(n) \tag{3.13}$$

โดยที่

$$h_d(n) = \begin{cases} \dfrac{\sin(2*\pi*n*fc)}{n*\pi} & ;n \neq 0 \\ 2*fc & ;n = 0 \end{cases} \tag{3.14}$$

เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการ (3.13) ก็จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองผ่านต่ำทั้งหมดจำนวน 11 ตัว ซึ่งจะสมมาตรรอบจุด h(0)

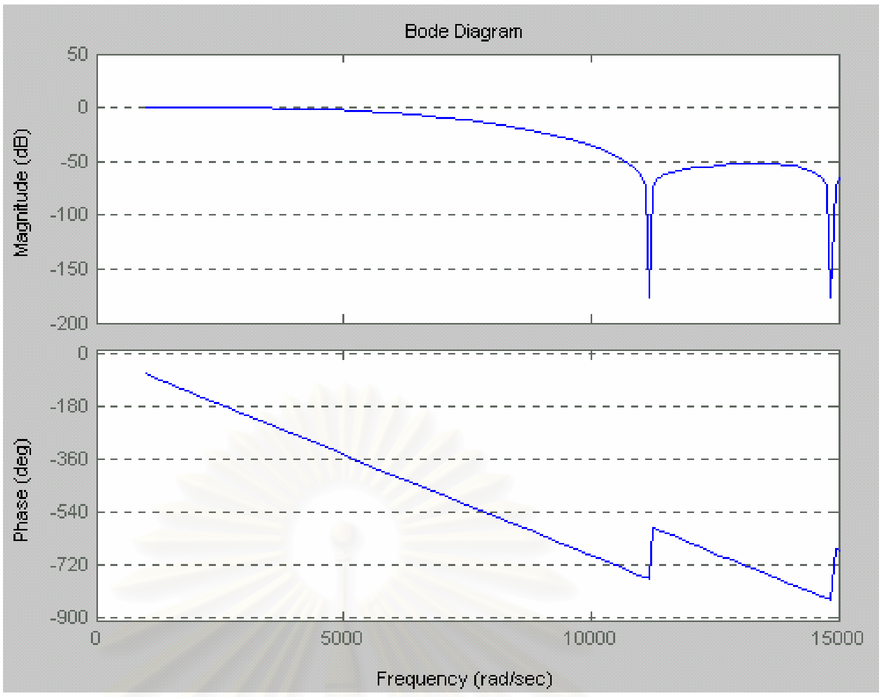
ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรกรองแบบ FIR โดยทั่วไปจะมีรูปเป็นดังสมการที่ (3.15)

$$Q(z) = \sum_{-M/2}^{M/2} h(n) * z^{-n+M/2} \tag{3.15}$$

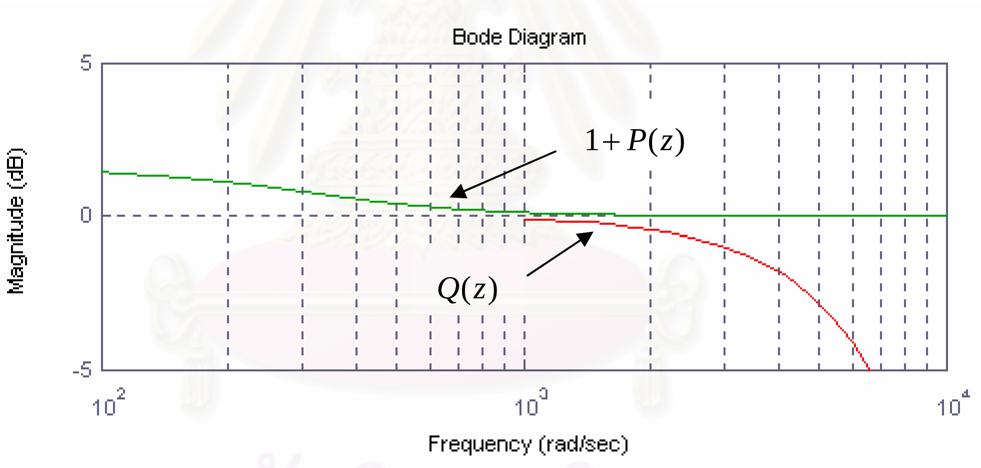
เมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.14) ลงไปในสมการที่ (3.15) ก็จะได้สมการของวงจรกรองผ่านต่ำที่เราออกแบบในสมการที่ (3.16)

$$\begin{aligned} Q(z) = {} & 0.0000 + 0.0078z^{-1} + 0.0401z^{-2} + 0.1033z^{-3} + 0.1707z^{-4} \\ & + 0.2000z^{-5} + 0.1707z^{-6} + 0.1033z^{-7} + 0.0401z^{-8} + 0.0078z^{-9} \\ & + 0.0000z^{-10} \end{aligned} \tag{3.16}$$

ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองในสมการที่ (3.16) แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพตามสมการที่ (3.11) จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองเชิงขนาดและเฟสของวงจรกรองผ่านต่ำแบบ Linear Phase FIR



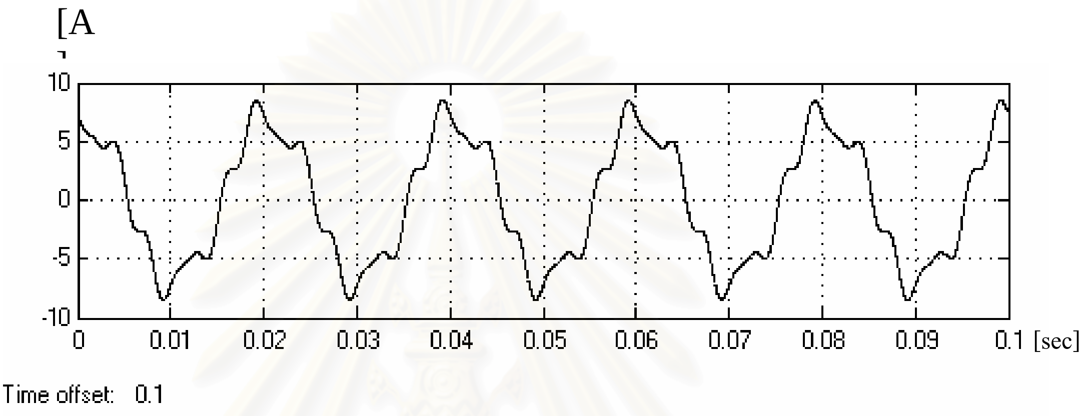
รูปที่ 3.8 แผนภาพโบเดของ $Q(z)$ และ $1+P(z)$ เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของการควบคุมแบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

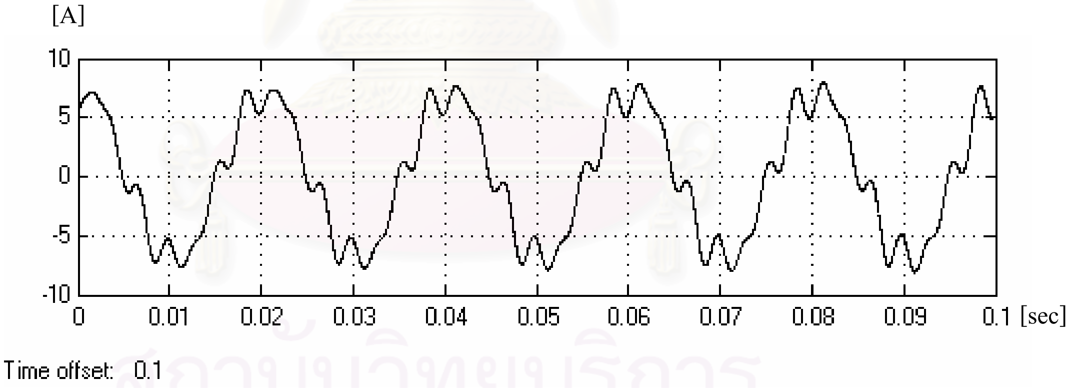
จากรูปที่ 3.8 เราพบว่าวงจรกรองผ่านต่ำ $Q(z)$ จะมีอัตราขยายต่ำกว่า $|1+P(z)|$ ทุกย่านความถี่ดังนั้นระบบจะมีเสถียรภาพ

3.3 ผลการจำลองการทำงาน

เราจะตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์นี้โดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB with SIMULINK กำหนดเวลาในการสุ่มค่าเป็น 100 μs โดยการจำลองให้ระบบจ่ายกำลังให้กับโหลดแบบสามเฟสและโหลดแบบหนึ่งเฟสโดยโหลดหนึ่งเฟสต่อที่เฟส w กระแสที่โหลดเฟส w เป็นดังรูปที่ 3.9 และกำหนดความถี่ตัด (cut off frequency) ของวงจรกรองผ่านต่ำเป็น 1 kHz จะได้ผลของกระแสจากแหล่งจ่ายเฟส w เป็นดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นกระแสโหลดเฟส w ที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิก

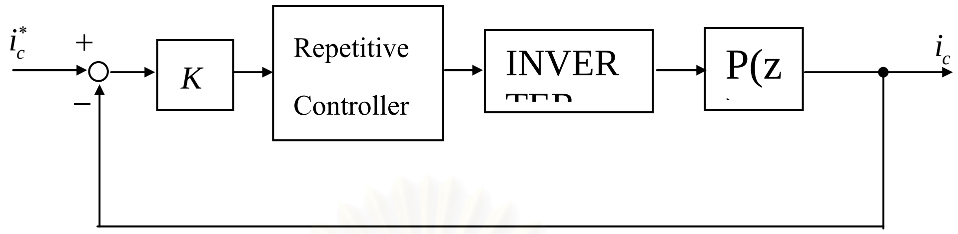


รูปที่ 3.10 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อวงจรกรองแอกทีฟทำงานโดยที่ความถี่ตัดของ Q(z) = 1 kHz

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการจำลองการทำงานพบว่ากระแสที่แหล่งจ่ายในรูปที่ 3.10 มีรูปร่างใกล้เคียงกับไซน์มากขึ้นแต่ยังคงมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากวงจรกรองผ่านต่ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปทำให้อัตราขยายของการควบคุมที่ย่านความถี่สูงมีค่าลดลง นั่นคือยังมีความผิดพลาดของการควบคุมอยู่ เราสามารถลดค่าความผิดพลาดของการควบคุมได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง (K) เพื่อขยายค่าความผิดพลาดก่อนเข้าวงรอบของการควบคุมกระแส

แบบทำซ้ำ เมื่อเพิ่มค่าอัตราขยายนี้ วงรอบของการควบคุมกระแสก็จะเปลี่ยนไปเป็นดังรูปที่ 3.11 ดังนั้นสมการที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพจึงต้องเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังแสดงในสมการที่ (3.17)



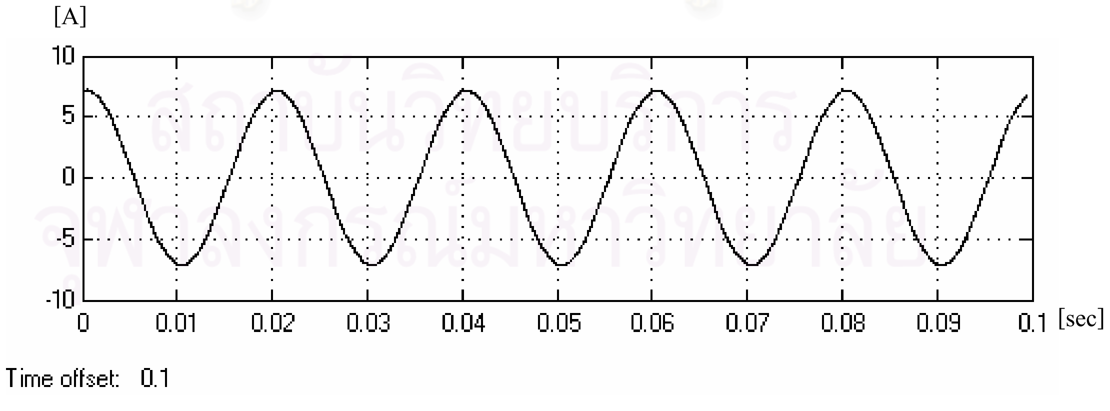
รูปที่ 3.11 วงรอบการควบคุมกระแสเมื่อเพิ่มค่าอัตราขยาย K

$$|Q(z)|_{z=e^{j\omega T}} < |1+K*P(z)|_{z=e^{j\omega T}} \quad \text{สำหรับทุกค่า } \omega \qquad (3.17)$$

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอัตราขยายสามารถเพิ่มได้ถึงค่าจำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากระบบควบคุมวงรอบปิดที่มีอัตราขยายสูงมากๆ จะขาดเสถียรภาพเพราะขั้วของระบบอาจอยู่นอกวงกลมหนึ่งหน่วยใน z-plane ได้

จากการวิเคราะห์เราพบว่าค่าของอัตราขยายสูงสุดที่สามารถนำมาใช้ได้สำหรับระบบโดยที่การควบคุมยังคงมีเสถียรภาพคือ $K=$ 350 แต่เพื่อความปลอดภัยในแง่เสถียรภาพ ในเชิงปฏิบัติเราจะเลือกใช้ค่า $K = 60$

เราจะจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบลักษณะของกระแสที่แหล่งจ่ายเมื่อเพิ่มค่าอัตราขยายให้กับวงรอบควบคุม โดยได้ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเฟส w เมื่อ $K = 60$

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราขยาย K เข้าไปตัวควบคุมกระแสจะมีอัตราขยายสูงขึ้น ทำให้วงจรกรองแอกทีฟสร้างกระแสชดเชยได้ถูกต้องและกระแสแหล่งจ่ายจะมีเพียงองค์ประกอบความถี่มูลฐานเท่านั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุม PI สำหรับควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง และแรงดันจุดกึ่งกลางบัส

การควบคุมระดับแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบ 3 เฟส 4 สาย นอกจากจะต้องควบคุมระดับแรงดันบัสทั้งหมดให้มีค่าเป็นไปตามที่ต้องการแล้วยังต้องควบคุมระดับแรงดันกึ่งบนและกึ่งล่างให้มีค่าเท่ากันด้วย ดังนั้นในบทนี้เราจะนำเสนอการออกแบบการควบคุมเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

4.1 การควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง

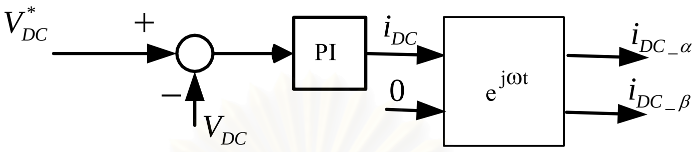
4.2 การควบคุมระดับแรงดันจุดกึ่งกลางบัส

4.1 การควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง

จากทฤษฏีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ (ดูบทที่2) จะพบว่ากำลังงานส่วนที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกนั้นจะเป็นองค์ประกอบไฟสลับ($\tilde{p}$ และ $\tilde{q}$) ดังนั้นค่ากำลังงานที่ไหลเข้าออกจากอินเวอร์เตอร์ของวงจรกรองแอกทีฟใน 1 คาบเวลาจึงมีค่าเป็นศูนย์ ด้วยเหตุนี้เองส่วนของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวงจรกรองแอกทีฟจึงไม่จำเป็นต้องมีวงจรเรียงกระแสเพื่อจ่ายกำลังงานให้กับตัวเก็บประจุไฟตรงเหมือนอินเวอร์เตอร์ทั่วไป อย่างไรก็ตามวงจรอินเวอร์เตอร์ในทางปฏิบัติจะมีกำลังสูญเสีย อันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ เช่น กำลังสูญเสียจากการสวิตช์ กำลังสูญเสียขณะนำกระแสของสวิตช์กำลัง ฯลฯ ทำให้แรงดันไฟตรงที่ตัวเก็บประจุมีค่าลดลงได้ ดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดึงเอากำลังงานจากแหล่งจ่ายของการไฟฟ้าเข้ามาเพื่อชดเชยกำลังสูญเสียและทำให้เราสามารถควบคุมแรงดันไฟตรงให้มีค่าเฉลี่ยคงที่และสูงเพียงพอต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้ โดยอินเวอร์เตอร์จะทำการสร้างแรงดันเพื่อให้วงจรกรองแอกทีฟสร้างกระแสที่ความถี่มูลฐานที่มีเฟสเดียวกันกับแรงดัน เพื่อที่จะดึงพลังงานเข้าสู่ระบบ พลังงานที่ถูกดึงเข้าสู่ะบบจะถูกนำไปสะสมในตัวเก็บประจุทำให้ค่าระดับแรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงขึ้น ในขณะเดียวกันถ้าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด วงจรกรองแอกทีฟจะสร้างกระแสที่ความถี่มูลฐานที่มีเฟสตรงกันข้ามกับแรงดัน เพื่อที่จะจ่ายพลังงานออกไปจากอินเวอร์เตอร์ทำให้แรงดันบัสไฟตรงมีค่าลดลง ดังนั้นเราสามารถเขียนส่วนการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ตามบล็อกไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยจะป้อนกลับค่าแรงดันบัสไฟตรง V_{dc} เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง V_{dc}^* และควบคุมผ่านตัวควบคุม PI ซึ่งจะกำหนดค่ากระแสคำสั่ง i_{DC} ที่จำเป็นในการควบคุมแรงดัน โดยกระแส i_{DC}

นี้จะเป็นองค์ประกอบในแนวแกน d เมื่อพิจารณาบนแกนหมุนที่ความถี่หลักมูล ซึ่งแนวแกน d ชี้ในทิศทางเดียวกันกับสเปซเวกเตอร์แรงดัน $\vec{e}$ ค่ากระแสคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงนี้จะถูกนำไปรวมกับกระแสฮาร์มอนิกที่คำนวณได้ก่อนหน้าเป็นกระแสคำสั่งสำหรับอินเวอร์เตอร์ต่อไป

(กิติพจน์ สิทธิเลิศพิศาล, 2539)



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง

ในการออกแบบตัวควบคุม PI จะเริ่มจากการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บประจุเป็นบล็อกไดอะแกรมซึ่งเมื่อรวมกับบล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุม PI และวงจรกรองสัญญาณรบกวนแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยที่ในการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บประจุเราจะอาศัยสมการพลังงานดังแสดงในสมการที่ (4.1)

$$P_{charge-}P_{loss} = E_m(t)i_{dc}(t) = v_{dc}(t)C_{dc}\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{2}C_{dc}\frac{d(v^2{}_{dc})}{dt} \qquad (4.1)$$

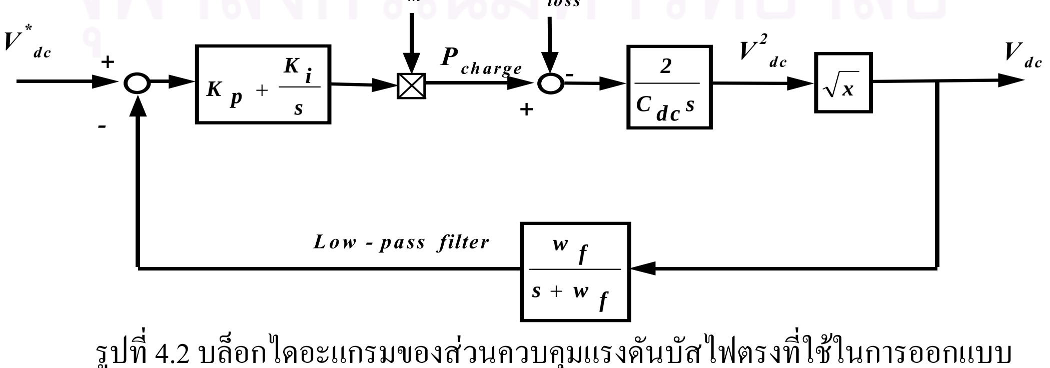
โดยที่ P_{charge} คือ ค่ากำลังงานที่ไหลเข้าอินเวอร์เตอร์

P_{loss} คือ ค่ากำลังงานสูญเสียต่าง ๆ ของอินเวอร์เตอร์

i_{dc} คือ ค่ากระแสที่ไหลเข้าออกจากอินเวอร์เตอร์

C_{dc} คือ ตัวเก็บประจุไฟตรง

E_m คือ ขนาดของสเปซเวกเตอร์แรงดัน $\vec{e}$ ของแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ในการออกแบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

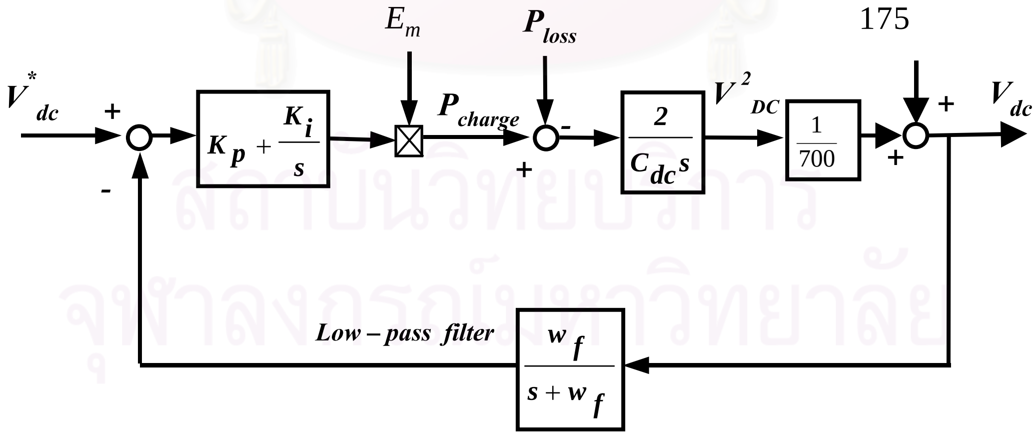
จากบล็อกไดอะแกรมจะพบว่ามีส่วนของการถอดรากที่สองซึ่งเป็นส่วนที่ไม่เชิงเส้น ทำให้เกิดความยุ่งยากในการออกแบบ ดังนั้นเราจึงจะทำการประมาณระบบให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้น (linearization) ในช่วงการทำงานแคบ ๆ โดยจะใช้อนุกรมเทย์เลอร์ถึงอันดับที่ 1 ในการประมาณการถอดรากที่สองให้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ณ จุดทำงานที่ $\sqrt{x_o} = v_{dc} = 350$ V ซึ่งสามารถแสดงดังนี้คือ

$$\begin{aligned} y(x) = \sqrt{x} = \sqrt{x_0 + \Delta x} &\approx \sqrt{x_0} + \frac{d\sqrt{x}}{dx}\bigg|_{x=x_0} \cdot \Delta x \\ &\approx \sqrt{x_0} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} \cdot \Delta x \\ &\approx \sqrt{x_0} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} \cdot (x - x_0) \end{aligned} \tag{4.2}$$

เมื่อแทนค่า $\sqrt{x_0} = 350$ V ลงในสมการที่ (4.2) จะได้

$$\begin{aligned} y(x) &\approx 350 + \frac{1}{700}(x - 350^2) \\ &\approx 175 + \frac{1}{700}x \end{aligned} \tag{4.3}$$

เมื่อประมาณเป็นเชิงเส้นแล้วสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.3 จากบล็อกไดอะแกรมสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดได้ดังสมการ (4.4)



รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรงหลังจากประมาณเป็นระบบเชิงเส้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการหาค่า K_p และ K_i เราจะพิจารณาจากบล็อกไดอะแกรมของระบบตามรูปที่ 4.3 ซึ่งจากรูปเราจะได้ฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดซึ่งมีสมการเป็น

$$G_0(s)=(K_p+\frac{K_i}{s})\times E_m\times(\frac{\omega_f}{s+\omega_f})\times(\frac{1}{350C_{dc}s}) \qquad (4.4)$$

โดยที่ค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบมีค่าดังนี้คือ

C_{dc} = 1900 μF , ω_f = 100π rad/s

E_m = 380 V

เมื่อพิจารณาในเรื่องของความเร็วในการตอบสนองแล้วเราไม่ควรออกแบบวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีความเร็วในการตอบสนองถึงย่านความถี่ของฮาร์มอนิกเพราะจะทำให้กำลังงานรีแอกทีฟเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกไม่สามารถไหลเข้าสู่วงจรกรองแอกทีฟได้ซึ่งจะทำให้วงจรกรองแอกทีฟไม่ชดเชยฮาร์มอนิกในส่วนนี้ด้วย จากเหตุผลดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงออกแบบให้วงรอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงมีค่าความเร็วในการตอบสนองประมาณ 2 วินาที ซึ่งทำได้โดยเลือกความถี่ตัดข้าม (cross over frequency) ω_0 = 0.5 rad/s และเลือกค่าความถี่หักมุม (corner frequency) ของตัวควบคุม PI $\omega_c=\frac{K_i}{K_p}$ = 0.2083 rad/s. ซึ่งเป็นค่าที่ให้ช่วงปลอดภัยเชิงเฟส (phase margin) ที่เพียงพอสำหรับเสถียรภาพในการควบคุม และ ณ จุดความถี่ตัดข้าม ω_0 จะได้ความสัมพันธ์ที่ว่า

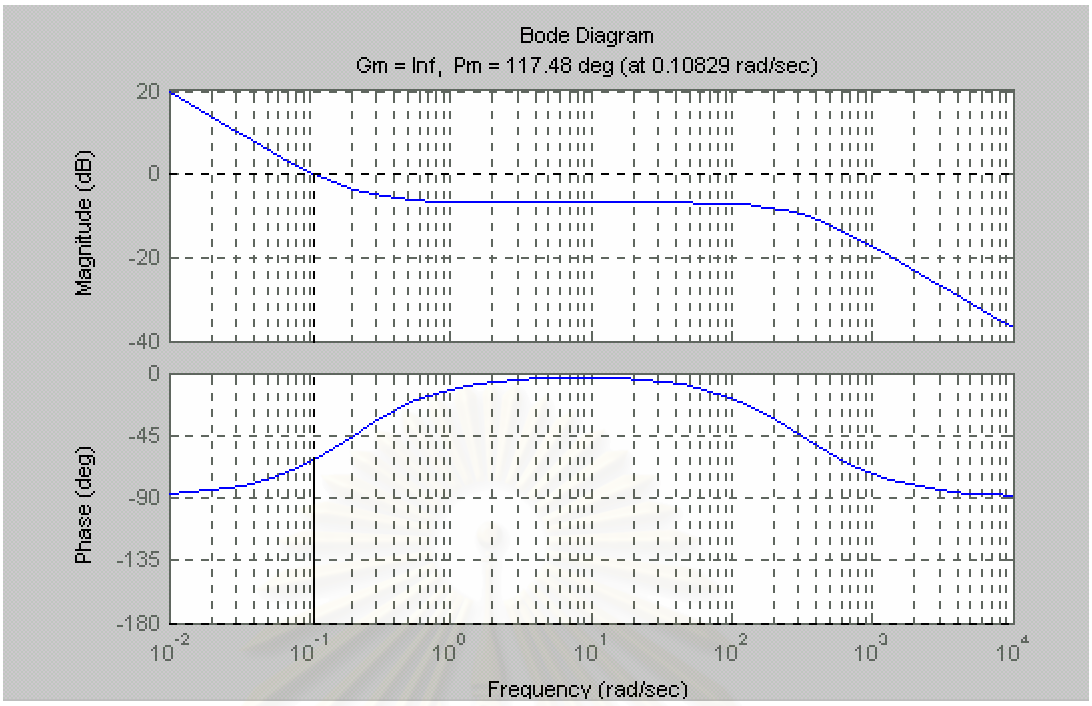
$$\left|G_0(j\omega_0)\right| = 1 \qquad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 และจากเงื่อนไข $\frac{K_i}{K_p}$ = 0.2083 ทำให้สามารถหาค่า K_p และ K_i ได้เป็น

K_p = 8.077×10^{-4}

K_i = 1.682×10^{-4}

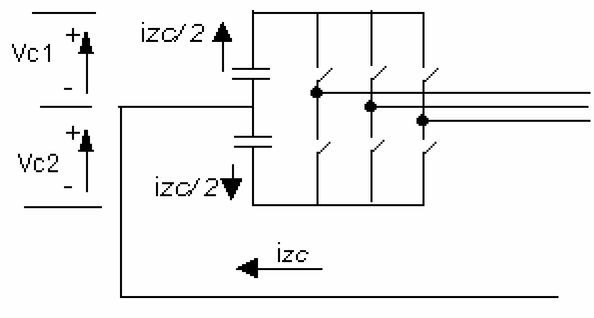
จากค่า K_p และ K_i ที่ได้เมื่อทำการเขียนแผนภูมิโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดดังรูปที่ 4.4 จะสามารถหาค่าช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยาย(gain margin) และช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบได้เป็นอนันต์ และ 117.48 องศา ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยายและช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

4.2 การออกแบบส่วนควบคุมระดับแรงดันกึ่งกลางบัส

ในการใช้งานวงจรกรองแอกทีฟในระบบ 3 เฟส 4 สาย ซึ่งมีสายนิวทรัลต่ออยู่กับจุดกึ่งกลางบัส มีความเป็นไปได้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัวบนและตัวล่างจะมีค่าแตกต่างกันมากโดยอาจเกิดจากกระแสในสายนิวทรัลที่ไม่มีการควบคุม อันจะมีผลกระทบทำให้แรงดันที่สร้างขึ้นจากการทำงานของสวิตช์ตัวบนและตัวล่างมีค่าแตกต่างกันมากด้วย ดังนั้นเราจึงต้องทำการควบคุมแรงดันที่จุดกึ่งกลางบัสนี้โดยการควบคุมการไหลของกระแสในสายนิวทรัล กำหนดให้ i_{zc} เป็นกระแสซีเควนซ์ศูนย์ที่ไหลเข้ากึ่งกลางบัสไฟตรง กระแสนี้จะแยกไหลเป็น 2 ส่วนคือที่ตัวเก็บประจุตัวบนกับที่ตัวเก็บประจุตัวล่าง ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4. 5 การไหลของกระแสซีเควนซ์ศูนย์เพื่อควบคุมแรงดันจุดกึ่งกลางบัส

จากรูปที่ 4.5 จะได้ว่า

$$Vc1 + Vc2 = Vdc \tag{4.6}$$

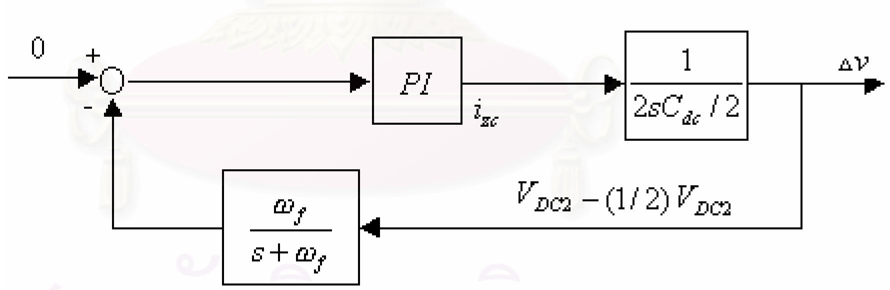
ถ้ากระแส i_{zc} ไหลเข้าดังรูป จะทำให้แรงดัน $Vc2$ เพิ่มขึ้น Δv และแรงดัน$Vc1$ ลดลง Δv ดังสมการ (4.7) และ (4.8)

$$Vc1' = Vc1 - \Delta v \tag{4.7}$$

$$Vc2' = Vc2 + \Delta v \tag{4.8}$$

$$\Delta v = \frac{1}{C}\int \frac{i_{zc}}{2} dt \tag{4.9}$$

โดยอาศัยสมการที่ (4.9) เมื่อเขียนบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันจุดกึ่งกลางบัส จะได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแรงดันจุดกึ่งกลางบัส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ V_{DC2} คือแรงดันที่จุดกึ่งกลางบัส

$(1/2)V_{DC}$ คือค่ากึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรง

$\omega_f = 100\pi$ rad/s

$C_{dc}/2 = 950\mu F$

เมื่อพิจารณาในเรื่องความเร็วในการตอบสนองของการควบคุมแรงดันจุดกึ่งกลางบัส เราไม่ควรออกแบบให้มีค่าเวลาในการตอบสนองที่เร็วเกินไปเพราะจะทำให้การจ่ายกระแสซีเควนซ์ศูนย์เพื่อควบคุมแรงดันจุดกึ่งกลางบัสที่เปลี่ยนค่าเร็วเกินไป ทำให้แรงดันที่สร้างโดยวงจรกรองแอกทีฟมีค่าแกว่งเร็วตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้เราจึงเลือกค่าความเร็วในการตอบสนองประมาณ 1 วินาที โดยการเลือกความถี่ตัดข้าม(cross over frequency) ของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิด $\omega_o^{'}$= 1 rad/s และเลือกค่าความถี่หักมุม(corner frequency) ของตัวควบคุม PI $\omega_c^{'} = \frac{K_i^{'}}{K_p^{'}} = 0.4167$ ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ช่วงปลอดภัยเชิงเฟสเพียงพอในการควบคุม

ในการหาค่า $K_p^{'}$ และ $K_i^{'}$ เราจะพิจารณาจากบล็อกไดอะแกรมของระบบตามรูปที่ 4.6 ซึ่งจากรูปเราจะได้ฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดซึ่งมีสมการเป็น

$$G_1(s) = (K_p^{'} + \frac{K_i^{'}}{s}) \times (\frac{\omega_f}{s+\omega_f}) \times (\frac{1}{2sC}) \qquad (4.10)$$

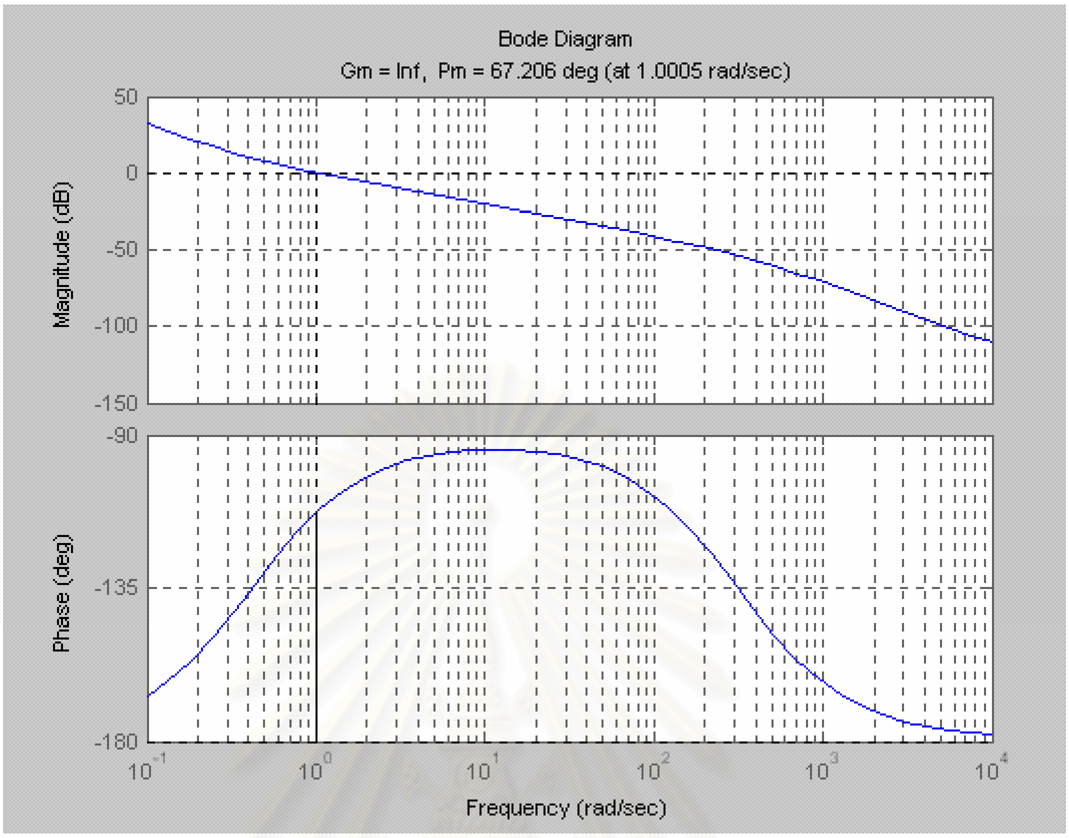
และ ณ จุดความถี่ตัดข้าม $\omega_o^{'}$ จะได้ความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\left| G_0(j\omega_0) \right| = 1 \qquad (4.11)$$

จากสมการที่ (4.10), (4.11) และ เงื่อนไข $\omega_c^{'} = \frac{K_i^{'}}{K_p^{'}} = 0.4167$ ทำให้สามารถหาค่า $K_p^{'}$ และ $K_i^{'}$ ได้เป็น

$$K_p^{'} = 0.007015$$
$$K_i^{'} = 0.002923$$

จากค่า $K_p^{'}$ และ $K_i^{'}$ ที่ได้เมื่อทำการเขียนแผนภูมิโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดดังรูปที่ 4.7 จะสามารถหาค่าช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยาย(gain margin) และช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบได้เป็นอนันต์ และ 67.2 องศา ตามลำดับ

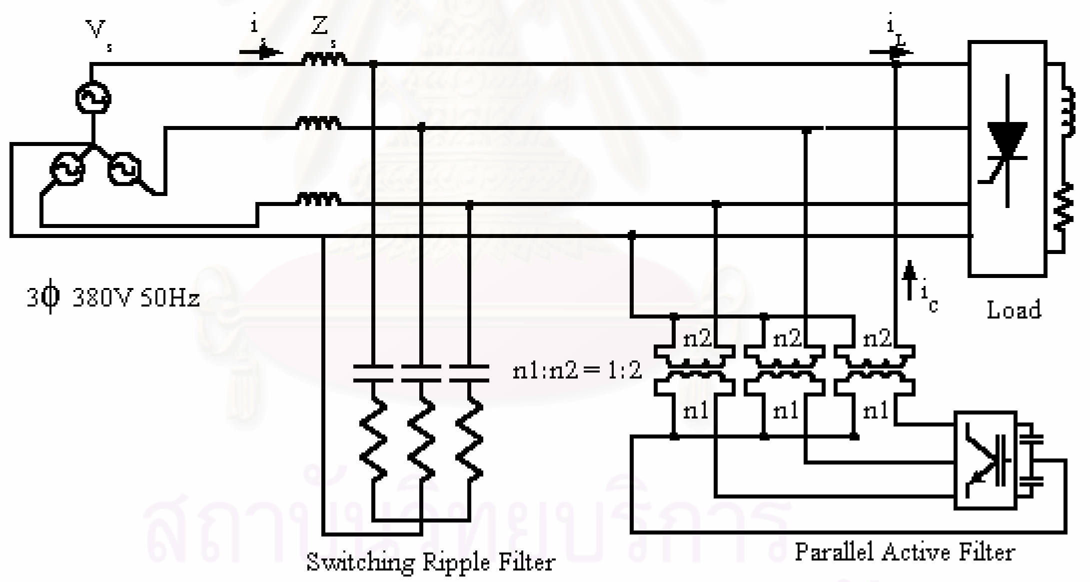


รูปที่ 4.7 ช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยายและช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบควบคุมแรงดันจุดกึ่งกลางบัสไฟตรง

บทที่ 5

โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ

บทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ สำหรับโครงสร้างโดยรวมของระบบสามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟและวงจรกรองพาสซีฟ R-C สำหรับกรองระลอกคลื่นการสวิตช์จะต่อขนานอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด ในส่วนของวงจรกรองแอกทีฟเราจะอาศัยตัวเหนี่ยวนำขนาด 14 mH ร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงแรงดันเฟสเดียว 3 ตัวเป็นอิมพีแดนซ์เชื่อมต่อกับระบบกำลังของการไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันในวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ในการสร้างกระแสชดเชยตามที่คำนวณได้จะเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดที่ไม่ต้องใช้ส่วนป้อนแรงดันไฟตรง (สรรธิพงษ์ โฆษิตเกษม, 2540)



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน 3 เฟส 4 สาย

โครงสร้างโดยรวมของระบบจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้คือ

1. ส่วนของระบบกำลัง
2. ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์
3. ส่วนภาคการตรวจจับสัญญาณต่างๆและส่วนควบคุม

สำหรับรายละเอียดแต่ละส่วนของวงจรนั้น เราจะทำการพิจารณาแยกเป็น 2 ส่วนคือส่วนของฮาร์ดแวร์และส่วนของซอฟต์แวร์ ดังจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

5.1 ฮาร์ดแวร์ของระบบ

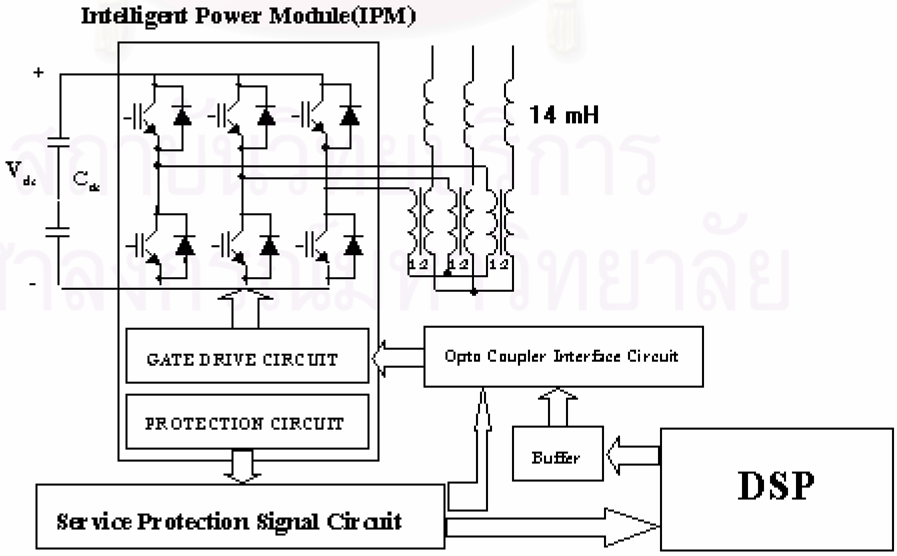
5.1.1 ส่วนของระบบกำลัง

- อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Zs) มีค่าเป็น 8.5 mH 3 ตัว
- วงจรกรองพาสซีฟ R-C สำหรับกรองระลอกคลื่นการสวิตช์ประกอบด้วยความต้านทานขนาด 125 Ω จำนวน 3 ตัวและตัวเก็บประจุไฟสลับขนาด 2.7 uF จำนวน 3 ตัว
- โหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส ขนาด 1.5 kVA 1 ชุด ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน 70 Ω และตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 mH และโหลดที่เป็นวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 1 เฟส ขนาด 0.25 kVA ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานขนาด 200 Ω และตัวเหนี่ยวนำขนาด 175 mH

5.1.2 ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์

รายละเอียดของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 โดยมีส่วนต่างๆ ดังนี้คือ

- หม้อแปลงแรงดันเฟสเดียว 3 ตัว อัตราส่วนจำนวนรอบเป็น 2 : 1
- ตัวเก็บประจุไฟตรง (C_{dc}) ขนาด 1900 uF พิกัดแรงดัน 800 V
- Intelligent Power Module (IPM) ขนาดพิกัด 1200V 15A ภายในประกอบด้วย
  1. ชุดสวิตช์กำลังพร้อมไดโอด 6 ชุด
  2. ชุดขับนำเกตของ IGBT 6 ชุด โดยที่ 3 ชุดบนจะใช้แหล่งจ่ายไฟแยกกันส่วน3 ชุดล่างจะใช้แหล่งจ่ายไฟชุดเดียวกัน
  3. ชุดวงจรป้องกัน
- Opto Coupler Interface Circuits
- Buffer



รูปที่ 5.2 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์และส่วนวงจรควบคุมของวงจรกรองแอกทีฟ

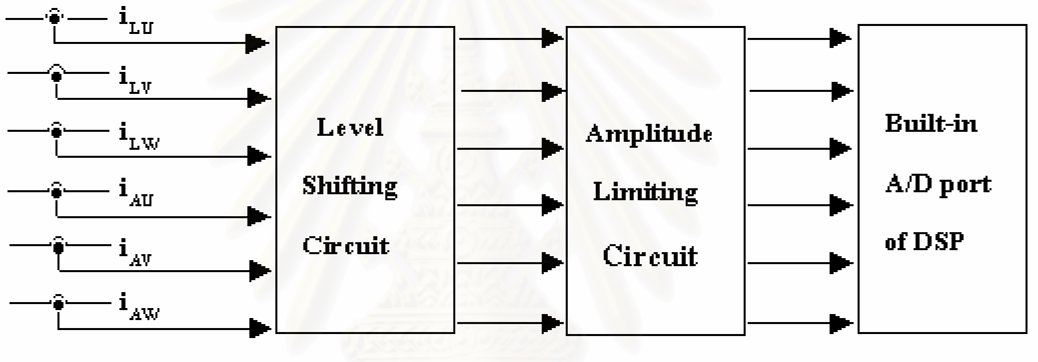
5.1.3 ส่วนการตรวจจับสัญญาณต่างๆ และส่วนควบคุม

วงจรในส่วนนี้จะแยกเป็น 3 ภาคคือภาคการตรวจจับสัญญาณ ภาคการควบคุมและภาคการป้องกัน

5.1.3.1 ภาคการตรวจจับสัญญาณต่างๆ ประกอบด้วย

ก) ส่วนตรวจจับกระแส

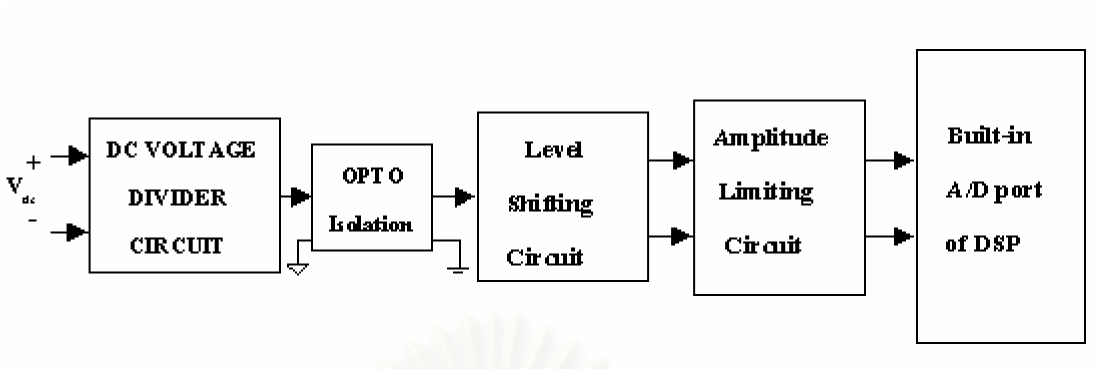
ส่วนนี้ตรวจจับกระแสในระบบเพื่อใช้ในการคำนวณหาฮาร์มอนิกและเพื่อใช้ในการควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์ โดยจะทำการตรวจจับกระแสทั้งหมด 6 จุด ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ชุดตรวจจับกระแส จะทำการวัดกระแสทางด้านโหลดและกระแสที่จ่ายโดยอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 เฟส โดยใช้ตัวตรวจจับกระแสตรง (DC-CT) ค่ากระแสที่วัดได้จะถูกนำไปปรับระดับและจำกัดขนาดก่อนจะถูกส่งไปยังพอร์ตของตัวประมวลผลดิจิตอล ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล



รูปที่ 5.3 ส่วนตรวจจับสัญญาณกระแส

ข) ส่วนตรวจจับแรงดันบัสไฟตรง

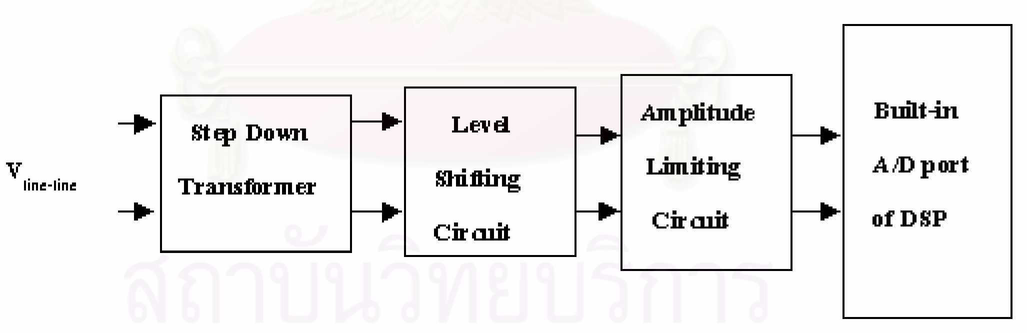
อินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นชนิดที่ไม่ต้องใช้ส่วนป้อนแรงดันไฟตรงและจะมีการตรวจจับแรงดันบัสมาใช้ในการควบคุมการสร้างแรงดันส่วนนี้ นอกจากนี้ยังมีการตรวจจับแรงดันไฟตรงที่จุดกึ่งกลางบัสเพื่อควบคุมให้แรงดันไฟตรงระหว่างกึ่งกลางบัสบนและกึ่งกลางบัสล่างมีขนาดแรงดันเท่ากัน การตรวจจับแรงดันบัสไฟตรงทั้งสองส่วนจะทำโดยการรับค่าแรงดันบัสไฟตรงมาทำการทอนระดับแรงดันให้มีค่าระดับแรงดันที่ต่ำลง จากนั้นทำการแยกโดดทางไฟฟ้าด้วย opto isolator ค่าที่ได้จะนำไปปรับระดับและจำกัดขนาดก่อนจะถูกส่งไปยังพอร์ตของ DSP ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 วงจรตรวจจับแรงดันบัสไฟตรงและแรงดันจุดกึ่งกลางบัส

ค) ส่วนตรวจจับแรงดันไฟสลับ

เราจะทำการวัดแรงดันไฟสลับระหว่างสาย ($V_{line-line}$) จำนวน 2 จุดคือ แรงดันไฟสลับระหว่างเฟส U-V และแรงดันไฟสลับระหว่างเฟส V-W โดยการวัดแรงดันผ่านหม้อแปลง ซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันให้ต่ำลงแล้วยังเป็นตัวแยกโดดทางไฟฟ้าระหว่างวงจรภาคไฟฟ้ากำลังกับวงจรส่วนตรวจจับสัญญาณ ค่าที่ได้จะถูกนำไปปรับระดับและจำกัดขนาดก่อนจะถูกส่งไปยังพอร์ตของ DSP ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 วงจรตรวจจับแรงดันไฟสลับ

5.1.3.2 ภาคการควบคุม

ส่วนนี้ประกอบด้วยบอร์ด DSP TMS320F243 จำนวน 1 บอร์ดซึ่งจะรับค่ากระแสและแรงดันที่ตรวจจับได้แล้วนำไปคำนวณหาค่าแรงดันที่ต้องการแล้วสร้างออกมาเป็นสัญญาณ PWM เพื่อขับนำสวิตช์ของ IPM

5.1.3.3 ภาคการป้องกัน

ในส่วนของภาคการป้องกันประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ

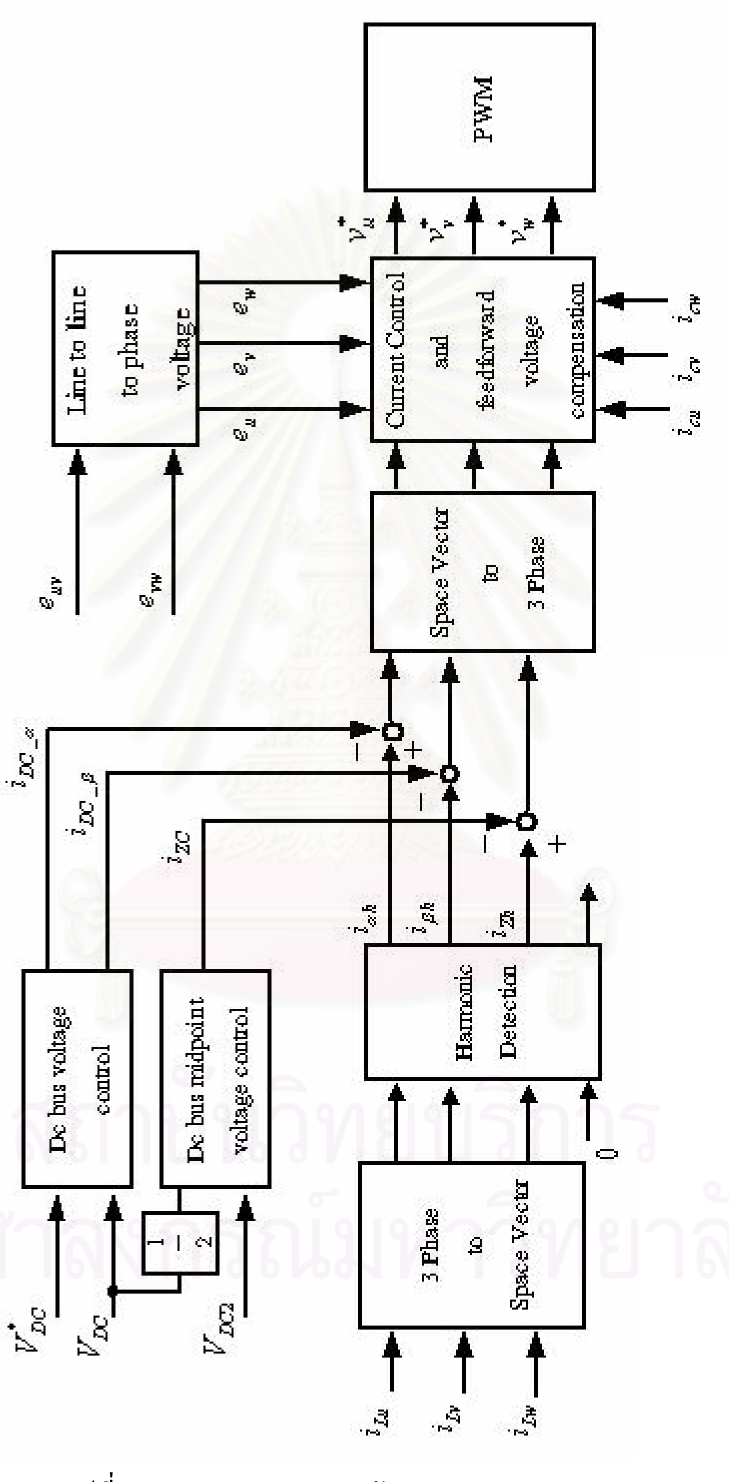
- ส่วนฮาร์ดแวร์มีวงจรป้องกันภายใน IPM เองเมื่อเกิดข้อผิดพลาดขึ้นในระบบก็จะส่งสัญญาณไปที่วงจรภายนอก เพื่อหยุดการทำงานของวงจรขับนำเกตป้องกันภายใน IPM โดยจะทำงานเมื่อระดับของกระแสที่ตรวจจับได้เกินกว่าระดับที่ตั้งภายในอินเวอร์เตอร์เอง
- ส่วนซอฟต์แวร์รับสัญญาณแจ้งจาก IPM เมื่อเกิดข้อผิดพลาดจะส่งสัญญาณเข้าไปในบอร์ด DSP แล้วจะทำการหยุดสัญญาณสวิตช์ PWM ที่ DSP สร้าง

5.2 ซอฟต์แวร์ของระบบ

ในส่วนซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการคำนวณแรงดันสำหรับอินเวอร์เตอร์เพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกนั้น เราสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมภาพรวมของการตรวจจับและการควบคุมได้ดังรูปที่ 5.6 และแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 5.7 - 5.10

จากบล็อกไดอะแกรมเราสามารถอธิบายได้ว่า เราทำการตรวจจับแรงดันระหว่างสายแล้วทำการแปลงให้อยู่ในรูปของแรงดันสเปซเวกเตอร์ (e_α, e_β) ก่อนที่จะแปลงเป็นแรงดันเฟส (e_u, e_v, e_w) ดังรูปที่ 5.7 แรงดันที่ได้จากการแปลงเหล่านี้เราใช้สำหรับการทำวงรอบล็อกเฟสและใช้ในส่วนชดเชยแรงดันแบบไปหน้า จากนั้นจะทำการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกจากกระแสโหลดทั้ง 3 เฟส แล้วแปลงให้อยู่ในรูปสเปซเวกเตอร์ ผลจากการแปลงเราจะได้องค์ประกอบของกระแสโหลดของสเปซเวกเตอร์ ($i_{L\alpha}, i_{L\beta,} i_{Lz}$) การคำนวณเพื่อหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกในสายเฟสนั้นจะใช้ส่วนของกระแสโหลดที่อยู่ในรูปสเปซเวกเตอร์มาพิจารณาบนแกนหมุนโดยพิจารณาที่ความถี่เดียวกับความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับ ($h\omega$) จากนั้นจะคำนวณหาค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกโดยอาศัย Moving Average Filter แล้วจึงนำค่าที่ได้มาพิจารณาบนแกนนิ่งอีกครั้ง ได้เป็นองค์ประกอบฮาร์มอนิกในสายเฟสคือ $i_{\alpha h}, i_{\beta h}$ ส่วนการคำนวณหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลนั้นก็จะมีหลักการคล้ายกับการคำนวณหาฮาร์มอนิกในสายเฟสแต่แตกต่างกันตรงที่การคำนวณหาค่าฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลนั้นจะใช้องค์ประกอบเดียวคือองค์ประกอบ i_{Lz} ส่วนองค์ประกอบด้านเข้าอีกส่วนหนึ่งเป็นศูนย์ องค์ประกอบของฮาร์มอนิกที่ได้เมื่อนำมาพิจารณาบนแกนนิ่งคือ i_{zh} เราก็จะได้องค์ประกอบฮาร์มอนิกในรูปสเปซเวกเตอร์ ($i_{\alpha h}, i_{\beta h}, i_{zh}$) ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ส่วนต่อไปก็คือส่วนที่คำนวณค่ากระแสเพื่อควบคุมแรงดันบัสไฟตรงและแรงดันจุดกึ่งกลางบัส โดยการนำค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) มาเปรียบเทียบกับแรงดันบัสไฟตรงคำสั่ง (V_{DC}^*) และนำแรงดันของจุดกึ่งกลางบัส (V_{DC2}) มา

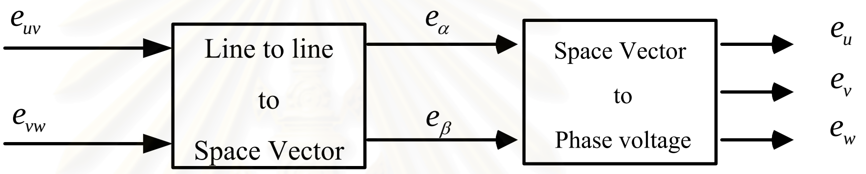
เปรียบเทียบกับกึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรง $(V_{DC}/2)$ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 การควบคุมแรงดันไฟตรงทั้งสองส่วนจะ



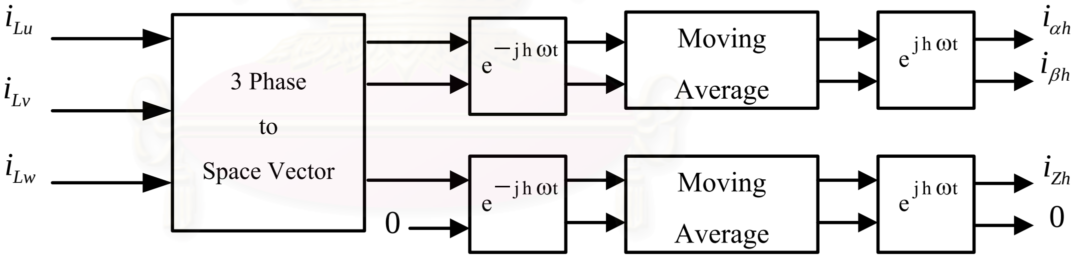
รูปที่ 5.6 ภาพรวมการตรวจจับ การควบคุมและการทำงานของระบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

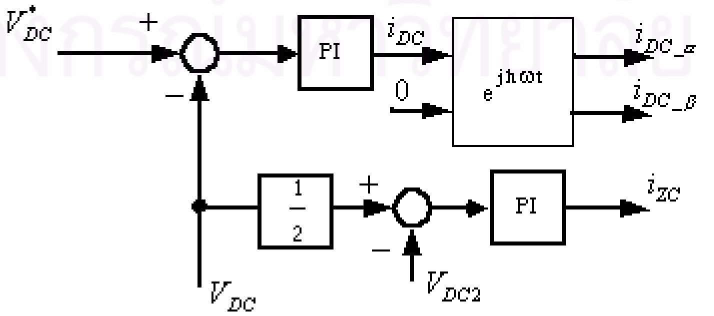
ใช้ตัวควบคุมแบบ PI ผลที่ได้จากตัวควบคุมแบบ PI ของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะเป็นกระแสควบคุมแรงดันบัสไฟตรง i_{DC} บนแกนหมุน จึงต้องนำมาพิจารณาแยกเป็นองค์ประกอบบนแกนนิ่ง $(i_{DC_\alpha}, i_{DC_\beta})$ ส่วนผลจากการคำนวณจากตัวควบคุมแบบ PI เพื่อควบคมแรงดันจุดกึ่งกลางบัสนั้นจะเป็นกระแสซีเควนซ์ศูนย์ (i_{ZC}) ซึ่งกระแสสำหรับควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรงทั้ง 3 ส่วนนี้จะถูกนำมารวมกับกระแสองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่คำนวณได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 จากนั้นจึงแปลงจากองค์ประกอบสเปซเวกเตอร์กลับไปเป็นค่าที่อ้างอิงบนแกนอ้างอิงในระบบ 3 เฟส ค่าของกระแส 3 เฟสที่ได้นี้เป็นกระแสคำสั่งสำหรับวงรอบการควบคุมกระแส ผลที่ได้จากตัวควบคุมกระแสจะเป็นค่าแรงดันซึ่งจะต้องนำไปรวมกับแรงดันเฟสซึ่งเป็นลักษณะของการชดเชยแรงดันแบบไปหน้า ค่าของแรงดันที่ได้ (v_u^*, v_v^*, v_w^*) ก็จะเป็นแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ที่ต้องการ



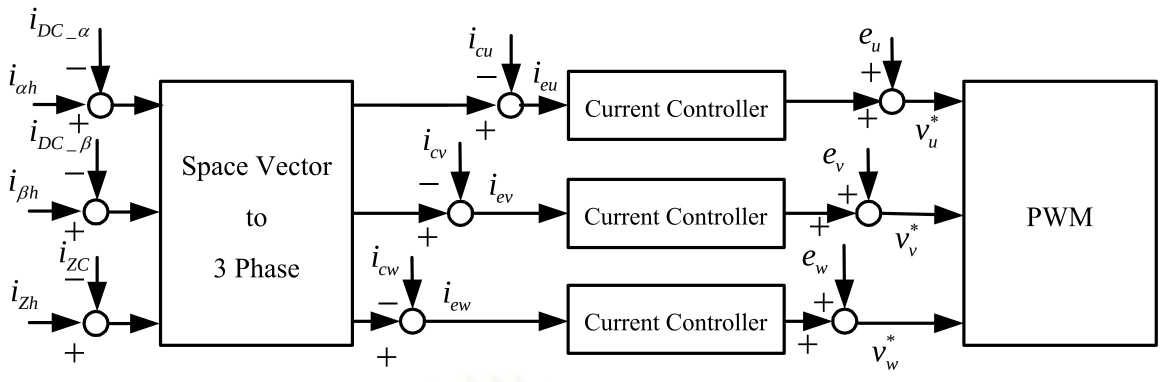
รูปที่ 5.7 บล็อกไดอะแกรมของซอฟต์แวร์ส่วนแปลงแกนของแรงดัน



รูปที่ 5.8 บล็อกไดอะแกรมของซอฟต์แวร์ส่วนคำนวณกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 5.9 บล็อกไดอะแกรมของซอฟต์แวร์ส่วนควบคุมแรงดันไฟตรง



รูปที่ 5.10 บล็อกไดอะแกรมของซอฟต์แวร์ส่วนควบคุมกระแสและคำนวณแรงดันคำสั่ง

บทที่ 6

ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

ในบทนี้เราจะทดสอบความสามารถในการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองแอกทีฟขนานที่ใช้ในระบบ 3 เฟส 4 สาย โดยใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีทางด้านโหลด ซึ่งได้พัฒนามาเพื่อตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลด้วย เราจะทดสอบการทำงานของระบบโดยอาศัยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 5 โดยระบบที่ใช้ในการทดสอบนี้จะเป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย 380 V 50 Hz อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Zs) มีค่าเป็น j2.67Ω (8.5 mH) ต่อรวมกับโหลดวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 2 ชุด คือโหลดวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟสขนาด 1.5 kVA ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน 70 Ω และตัวเหนี่ยวนำ 10 mH และโหลดที่เป็นวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 1 เฟสขนาด 0.25 kVA ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน 200 Ω และตัวเหนี่ยวนำ 175 mH วงจรกรองแอกทีฟสร้างแรงดันโดยอินเวอร์เตอร์ผ่านหม้อแปลง 2 : 1 เป็นตัวเชื่อมต่อกับระบบกำลังร่วมกับตัวเหนี่ยวนำค่า 14 mH

ผลการทดลองการทำงานของระบบที่จะนำเสนอในบทนี้จะแยกเป็นกลุ่มการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลทางปฏิบัติกับผลทางทฤษฎีในการกำจัดฮาร์มอนิก

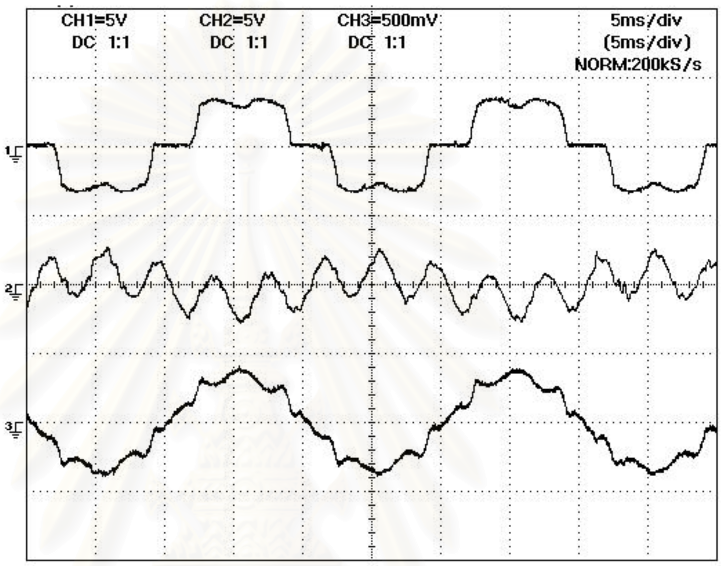
<u>6.1 กรณีโหลดสมดุล</u>

การทดลองในกรณีนี้ก็คือการให้แหล่งจ่ายจ่ายกำลังให้กับโหลดวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟสเท่านั้น ฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดลักษณะนี้จะเป็นฮาร์มอนิกอันดับหลักคืออันดับ5, 7, 11, 13, 17 และ19 ส่วนกระแสฮาร์มอนิกอันดับอื่นจะมีค่าต่ำ ดังนั้นการกำจัดฮาร์มอนิกจะเลือกกำจัดเฉพาะอันดับและซีเควนซ์หลักเท่านั้น โดยมีผลการทำงานดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.1.1 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกแบบกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 5 ซีเควนซ์ลบ

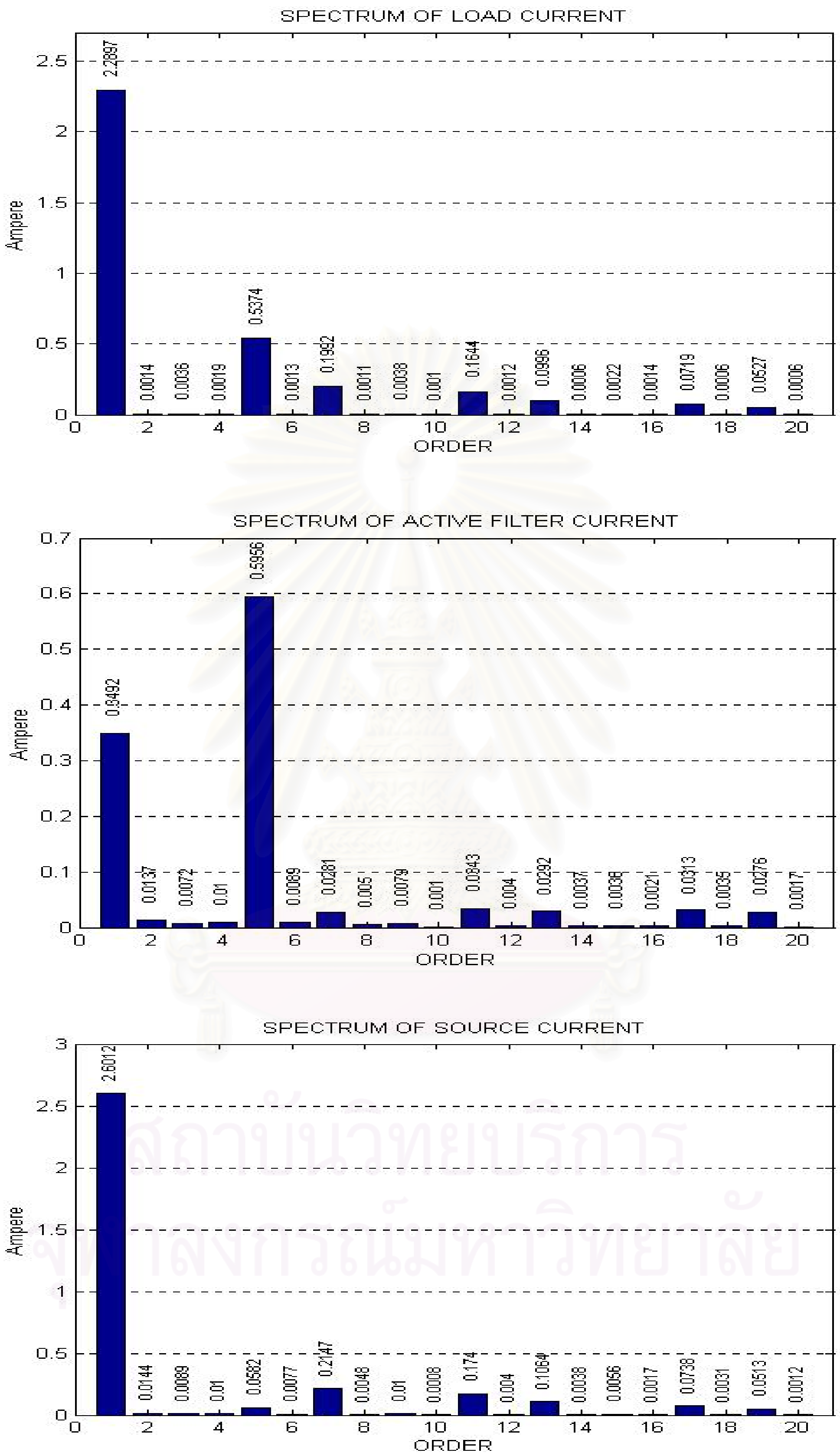
ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.1 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายอันดับ 5 มีขนาดลดลง โดยมีค่าอัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5} = 0.108$ คือกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 5 ลดลงจากทางด้านโหลด 0.537 A เหลือทางด้านแหล่งจ่าย 0.058 A



(5

รูปที่ 6.1 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 5 ซีเควนซ์ลบ เมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด K = 60

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

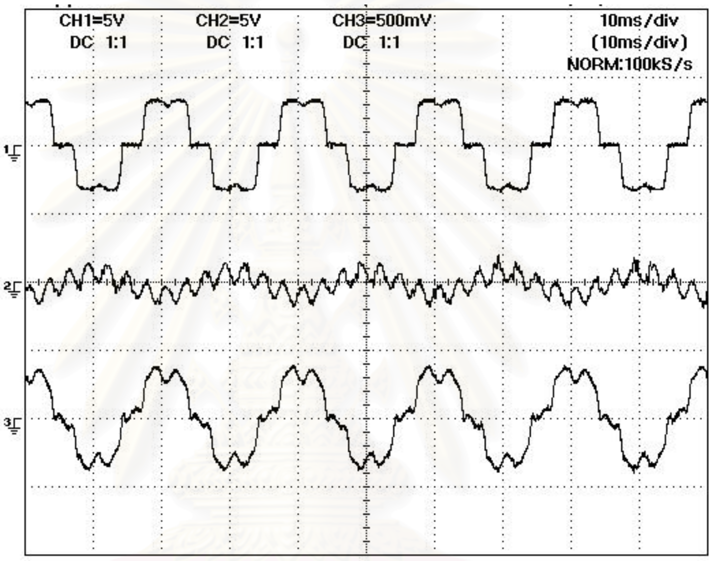


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 6.2 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณี กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 5 ซีเควนซ์ลบเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

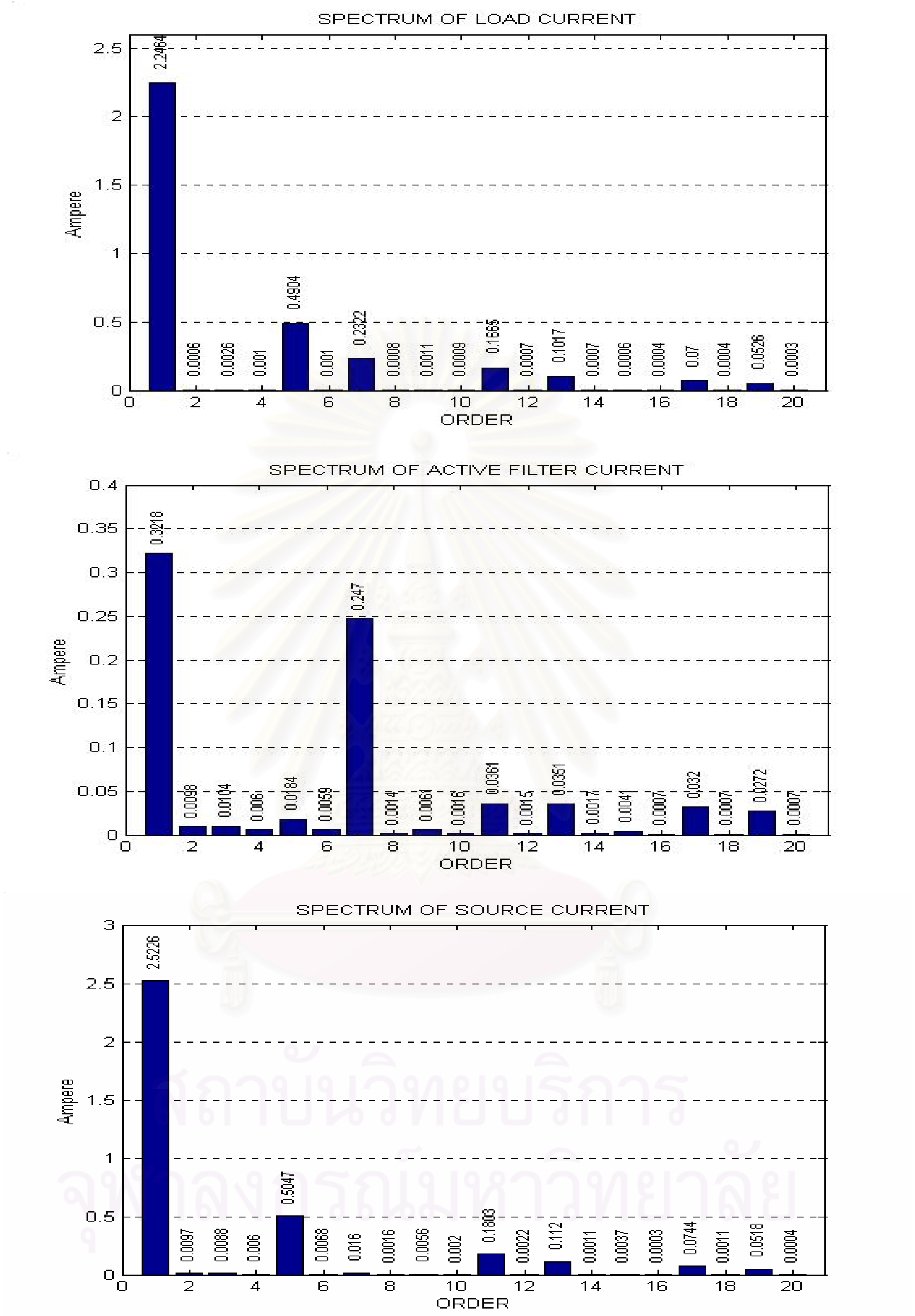
6.1.2 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 7 ซีเควนซ์บวก

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นกระแสโหลด กระแสจากวงจรกรองแอกทีฟเมื่อมีการกำจัดเฉพาะอันดับที่7 ซีเควนซ์บวกดังแสดงในรูปที่ 6.3 และแสดงสเปกตรัมของกระแสดังรูปที่ 6.4 เห็นได้ว่ากระแสที่แหล่งจ่ายมีขนาดของฮาร์มอนิกที่ 7 ลดลงคือจาก 0.232 A ที่โหลดเหลือ 0.016 A ที่แหล่งจ่ายแต่อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7} = 0.069$ จะเห็นได้ว่าอัตราการลดทอนสูง ทั้งนี้เนื่องจากอัตราขยายของวงจรกรองผ่านต่ำมีค่าสูง ทำให้อัตราขยายของตัวควบคุมกระแสของวงจรกรองแอกทีฟที่ความถี่ของฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ยังมีค่าสูงด้วย



รูปที่ 6.3 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ7 ซีเควนซ์บวกเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด K =60

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

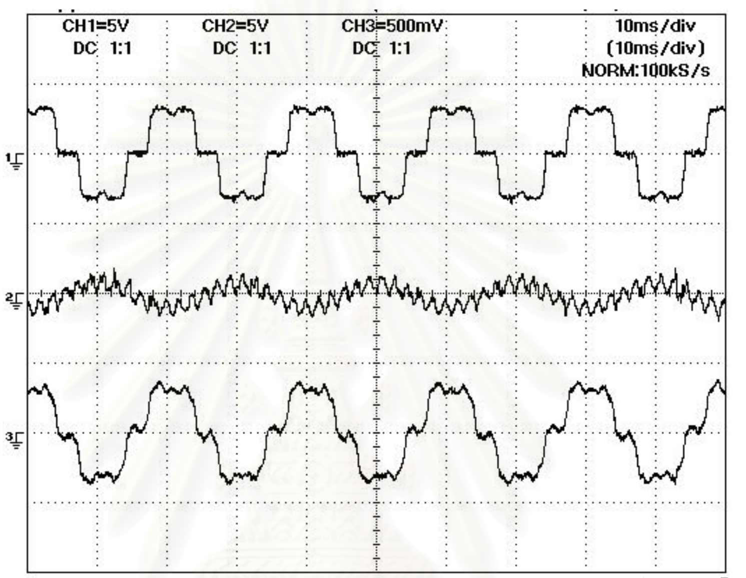


รูปที่ 6.4 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 7 ซีเควนซ์บวกและอัตราขยายค่าความผิดพลาด K = 60

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.1.3 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 11 ซีเคนซ์ลบ

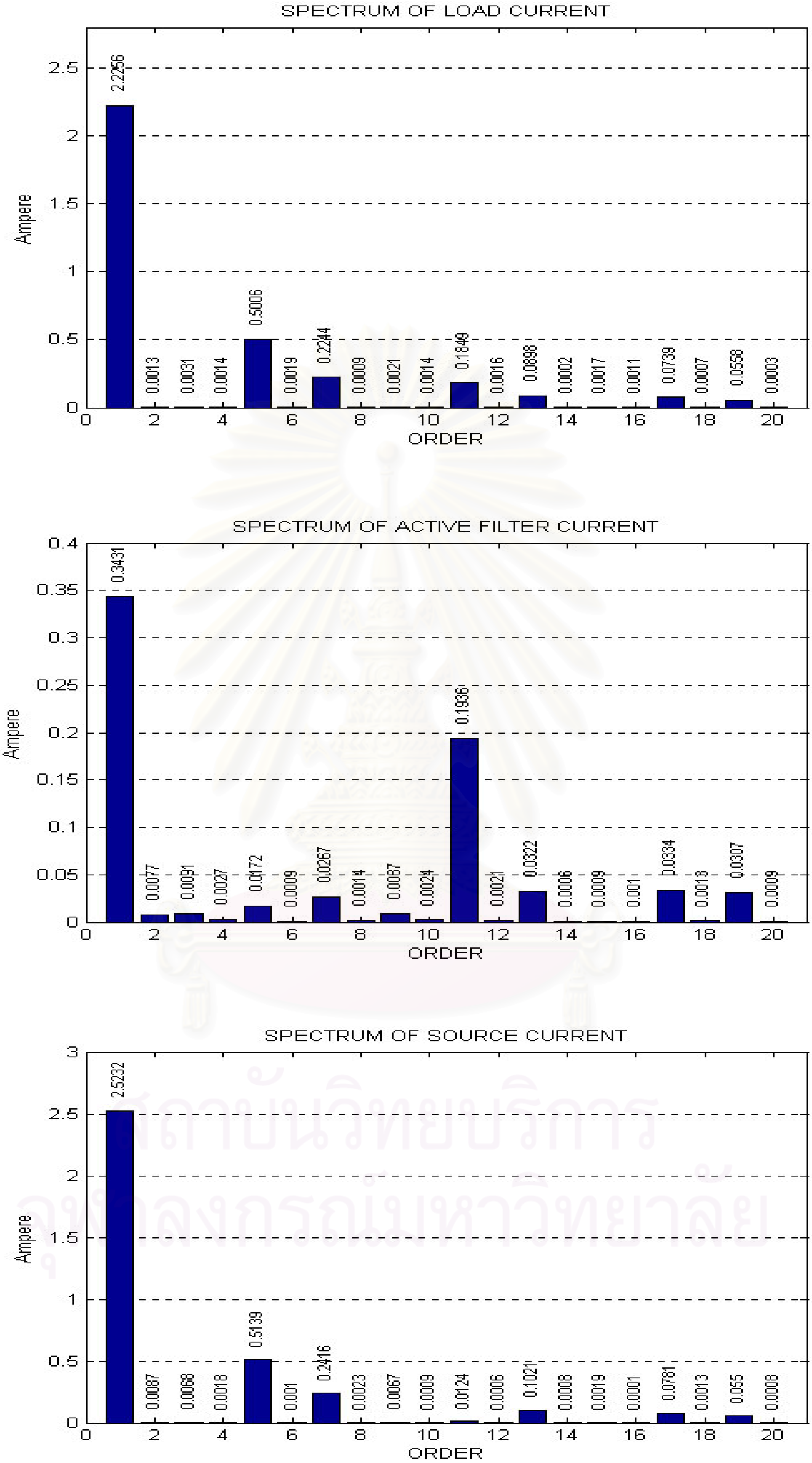
ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.5 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายอันดับ 11 มีขนาดลดลง โดยมีค่าอัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=11} = 0.067$ คือกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 11 ลดลงจากทางด้านโหลด 0.185 A เหลือทางด้านแหล่งจ่าย 0.012 A



(5A/di

รูปที่ 6.5 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง)
ในกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 11 ซีเควนซ์ลบเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด K =60

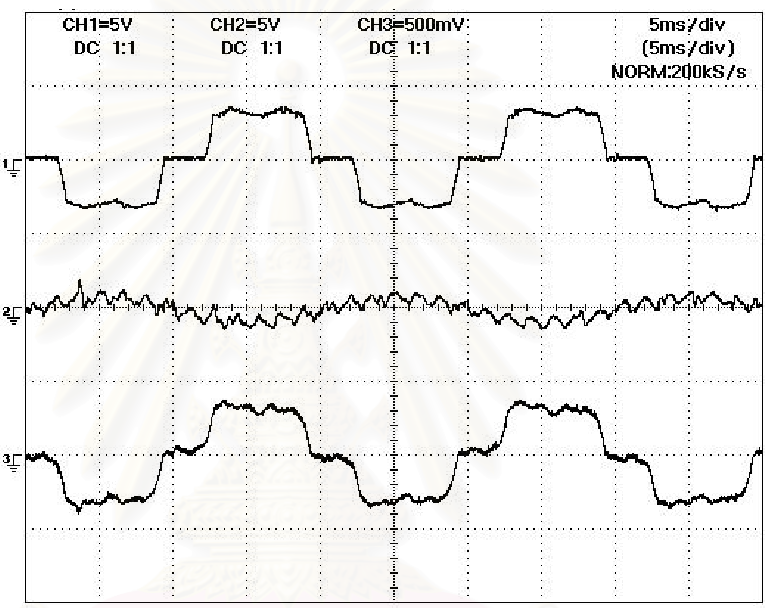
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.6 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 11 ซีเควนซ์ลบและอัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

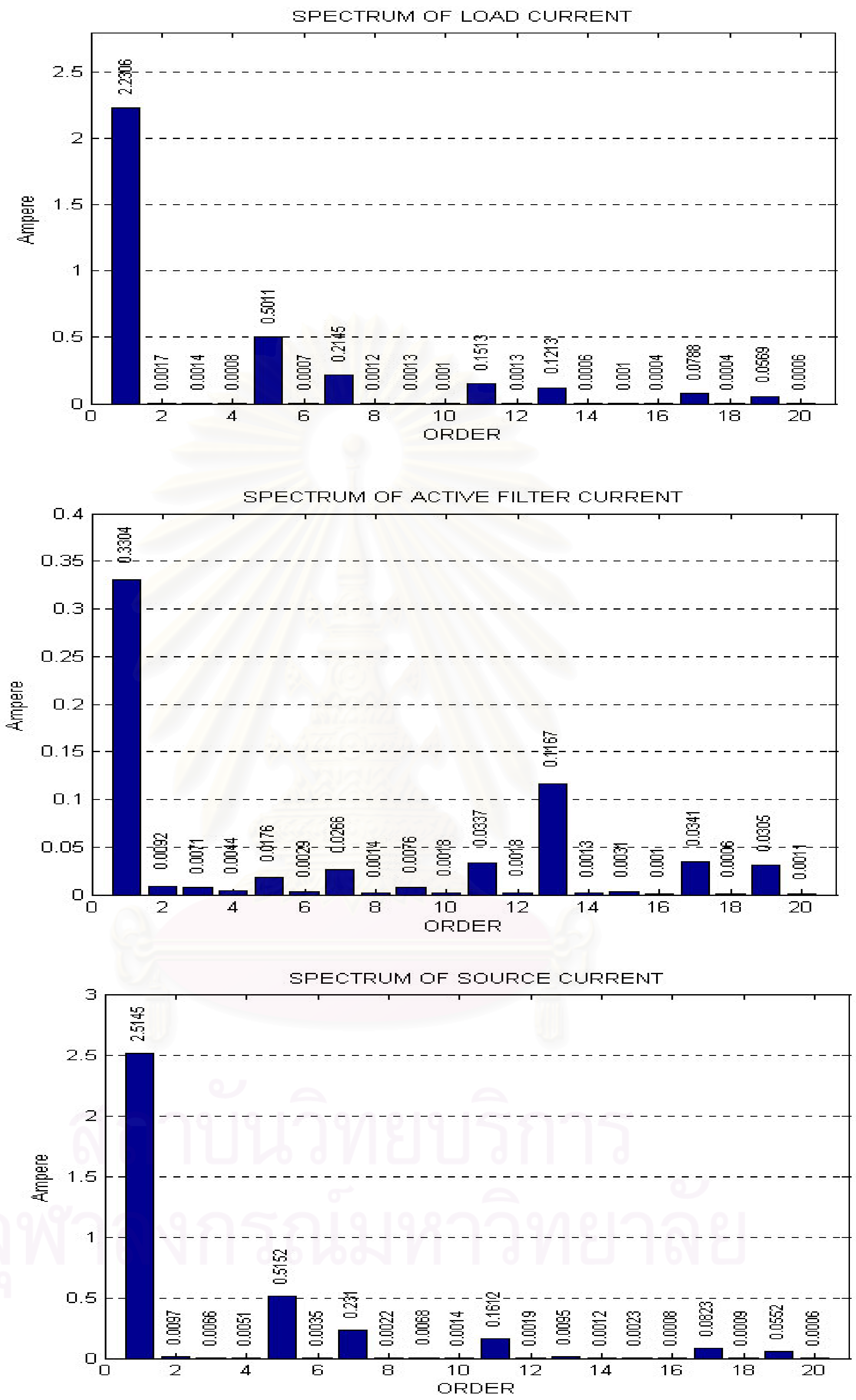
6.1.4 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 13 ซีเควนซ์บวก

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.7 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายอันดับ 13 มีขนาดลดลง โดยมีค่าอัตราการลดทอน $\left|i_{sh}\right|/\left|i_{Lh}\right|_{h=13} = 0.078$ คือกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 13 ลดลงจากทางด้านโหลด 0.121 A เหลือทางด้านแหล่งจ่าย 0.009 A



(5A/div)

รูปที่ 6.7 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ13 ซีเควนซ์บวกเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด K =60

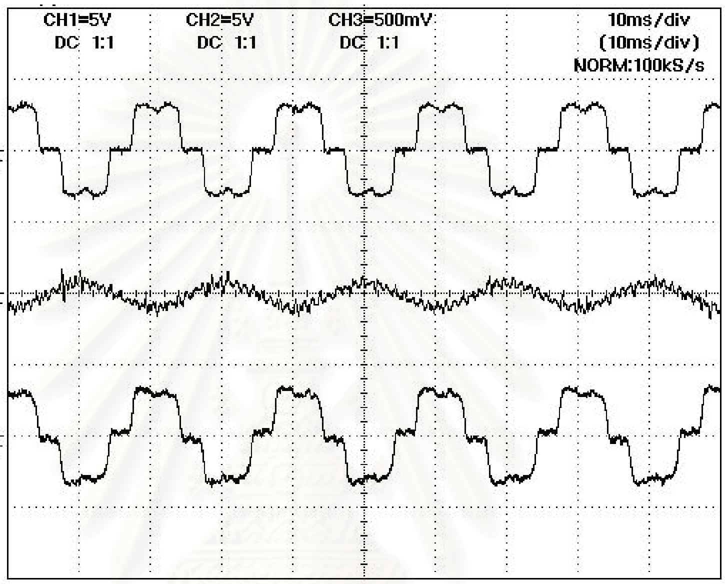


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 6.8 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 13 ซีเควนซ์บวกและอัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

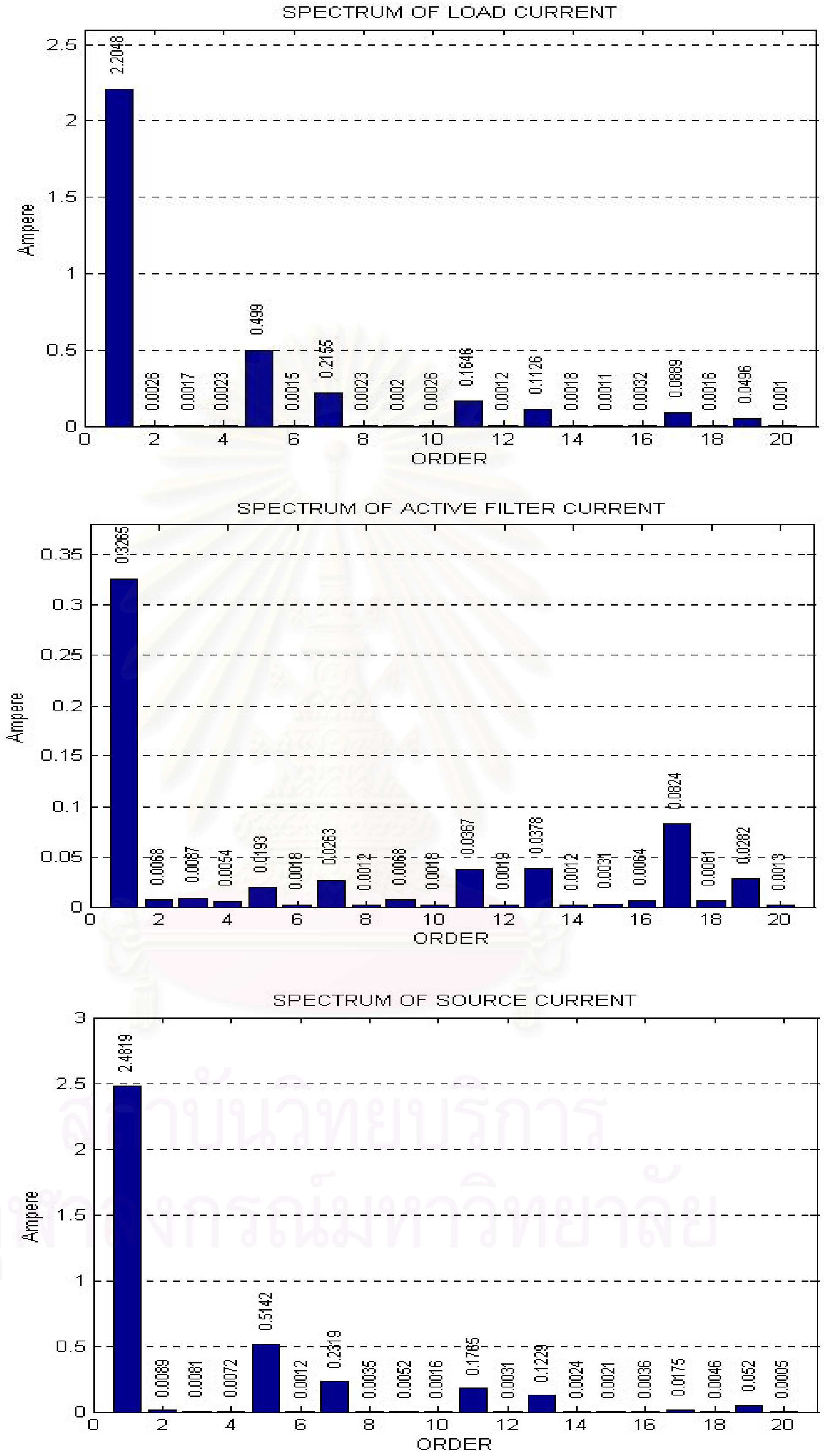
6.1.5 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 17 ซีเควนซ์ลบ

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.9 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายอันดับ 17 มีขนาดลดลง โดยมีค่าอัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=13} = 0.197$ คือกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 17 ลดลงจากทางด้านโหลด 0.089 A เหลือทางด้านแหล่งจ่าย 0.017 A



(5A/d

รูปที่ 6.9 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ17 ซีเควนซ์ลบเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

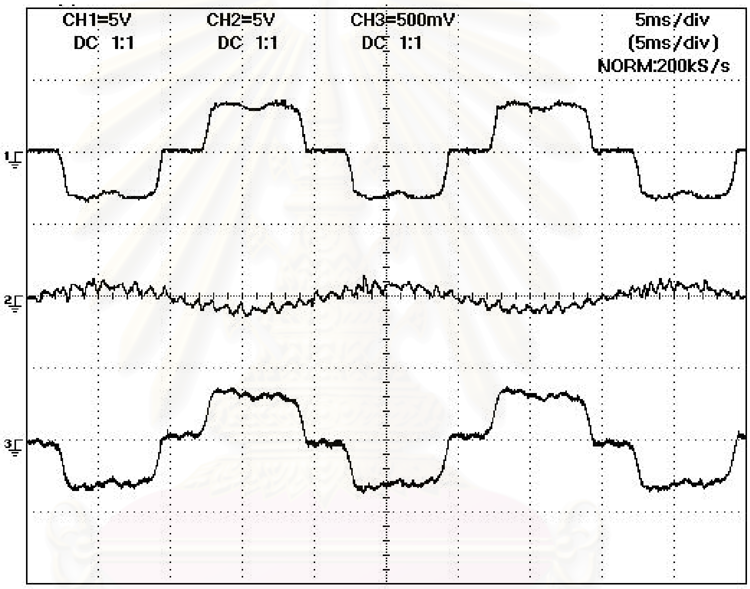


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 6.10 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 17 ซีเควนซ์ลบและอัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

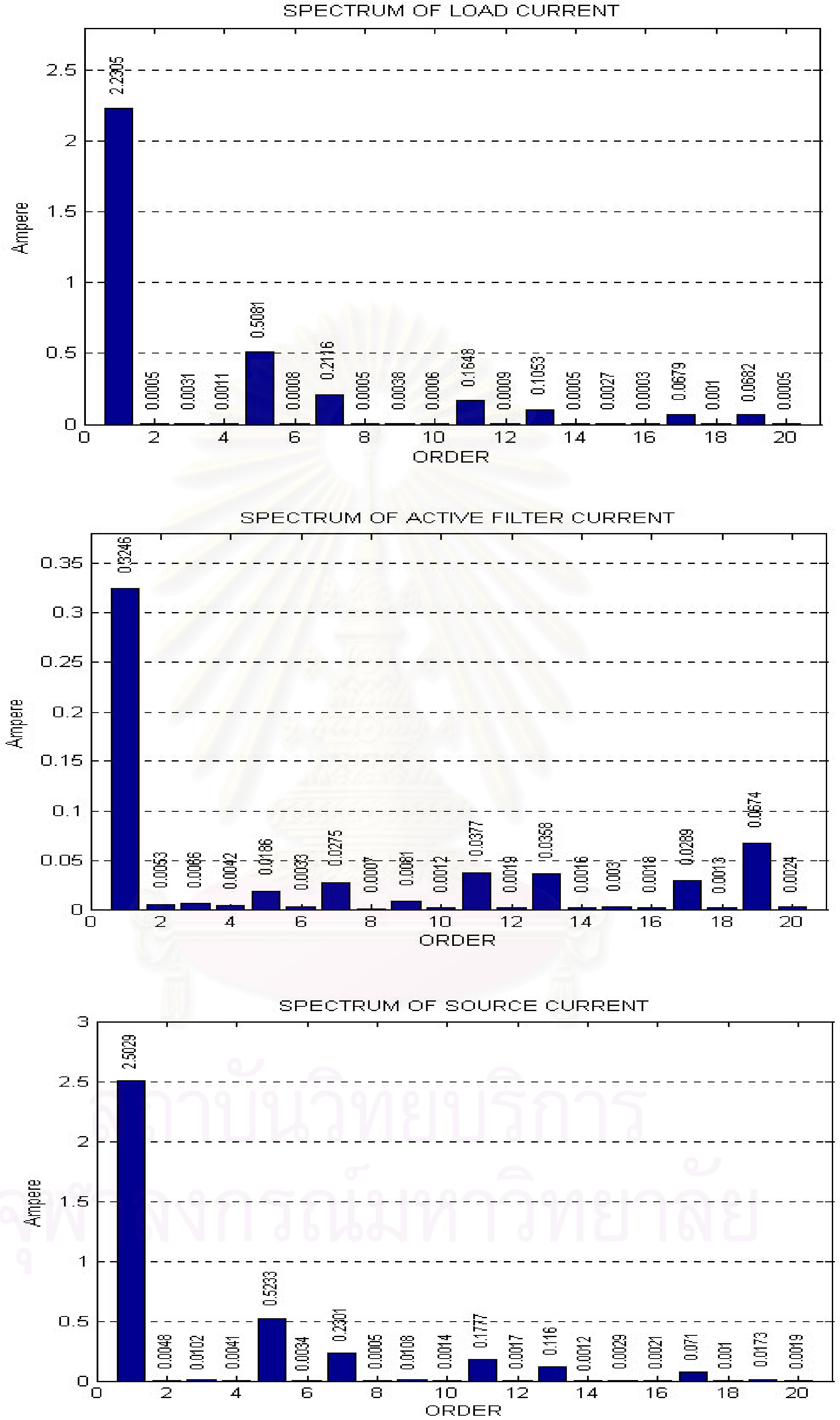
6.1.6 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 19 ซีเควนซ์บวก

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.11 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายอันดับ 19 มีขนาดลดลง โดยมีค่าอัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=13} = 0.254$ คือกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 19 ลดลงจากทางด้านโหลด 0.068 A เหลือทางด้านแหล่งจ่าย 0.017 A จะเห็นได้ว่าการลดทอนกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 19 จะน้อยลงเมื่อเทียบกับความถี่ฮาร์มอนิกอันดับต่ำกว่าเนื่องจากความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 19 เริ่มใกล้เคียงกับค่าความถี่หักมุมของวงจรกรองผ่านต่ำของวงรอบการควบคุมกระแส



(5A/d

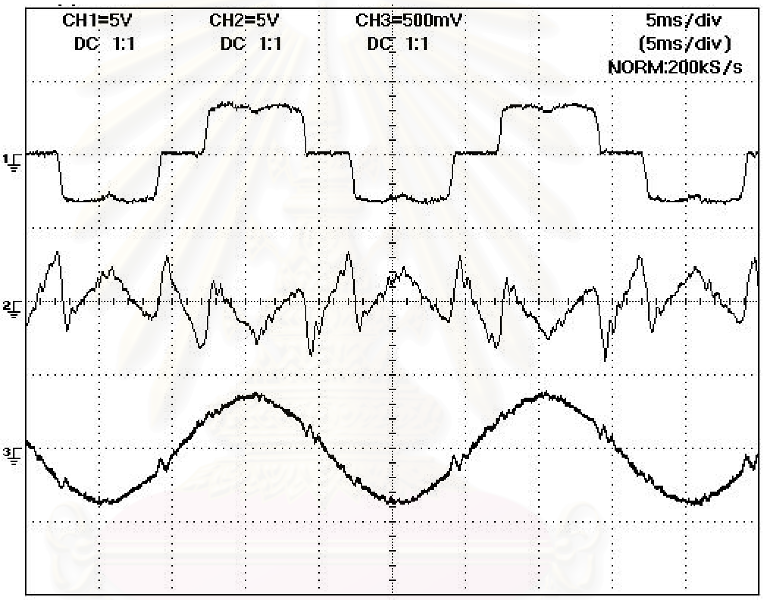
รูปที่ 6.11 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ19 ซีเควนซ์บวกเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด K = 60



รูปที่ 6.12 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 19 ซีเควนซ์บวกและอัตราขยายค่าความผิดพลาด K = 60

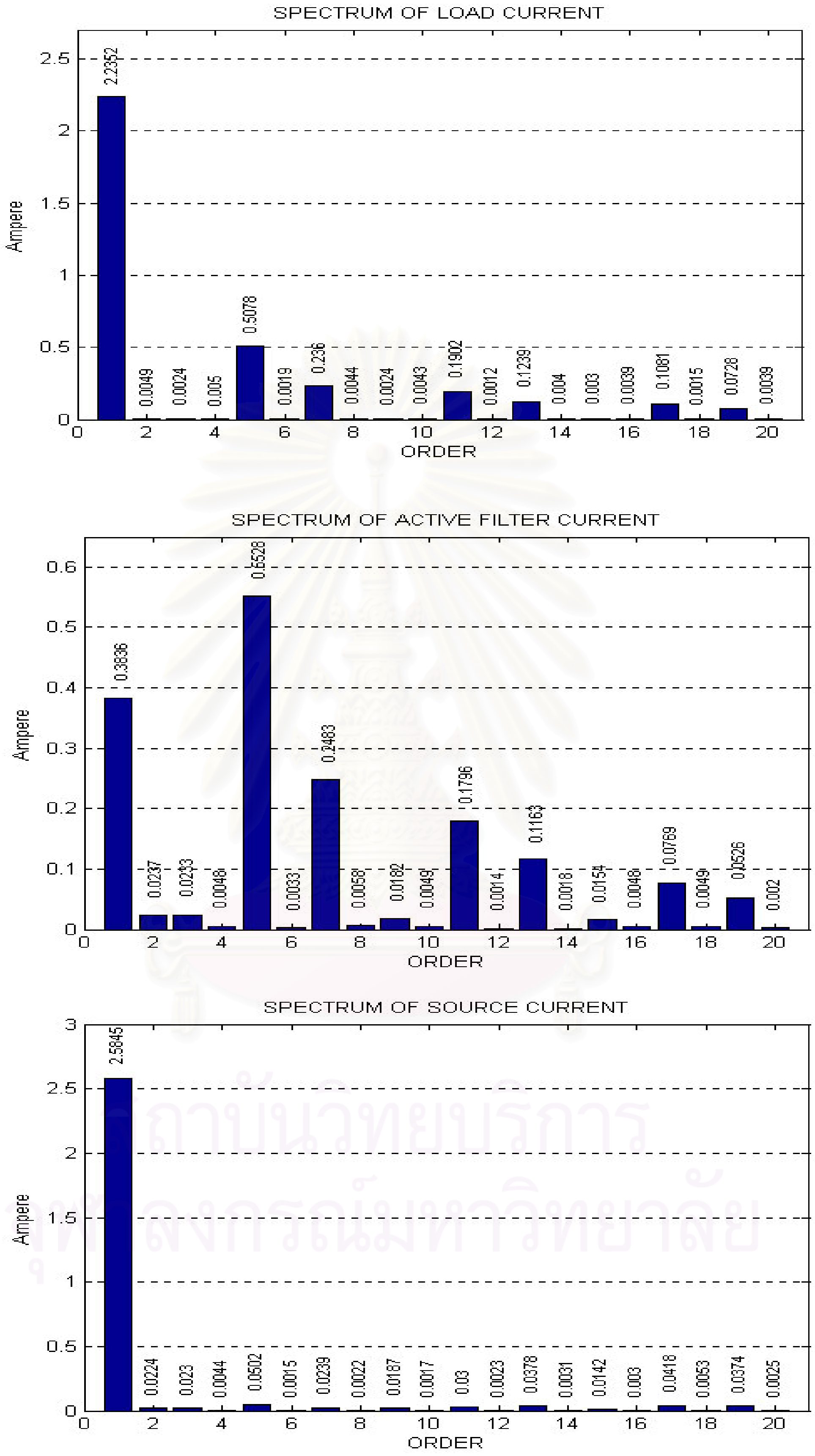
6.1.7 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกในสายเฟสหมดทุกอันดับ

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.13 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกในสายเฟสมีขนาดลดลง โดยมีค่าอัตราการลดทอนของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่ำสูงกว่าอัตราการลดทอนของฮาร์มอนิกอันดับสูง คือ ฮาร์มอนิกอันดับ 5 มีอัตราการลดทอน $\left|i_{sh}\right|/\left|i_{Lh}\right|_{h=5} = 0.098$ คือลดลงจาก 0.508 A ทางด้านโหลดเหลือ 0.050 A ทางด้านแหล่งจ่าย ส่วนกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 13 มีอัตราการลดทอน $\left|i_{sh}\right|/\left|i_{Lh}\right|_{h=13} = 0.306$ คือลดลงจากทางด้านโหลด 0.124 A เหลือทางด้านแหล่งจ่าย 0.038 A



รูปที่ 6.13 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกทุกอันดับในสายเฟสเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 6.14 สเปกตรัมของกระแสโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายกรณีกำจัดฮาร์มอนิกทุกอันดับในสายเฟสและอัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

6.2 กรณีโหลดไม่สมดุล

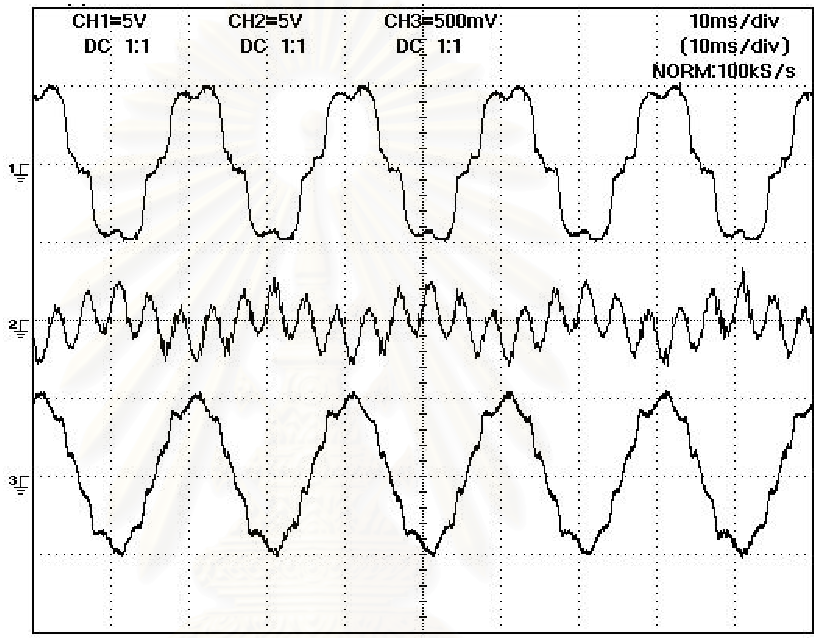
การทดลองในกรณีนี้ก็คือการให้แหล่งจ่ายจ่ายกำลังให้กับโหลดบริดจ์ 3 เฟสและโหลดบริดจ์ 1 เฟสโดยโหลด 1 เฟสนั้นต่อเข้าที่เฟส w เราสามารถแยกพิจารณาเป็นกรณีต่างๆได้คือ

6.2.1 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกซีเควนซ์บวกหรือลบ

การกำจัดฮาร์มอนิกซีเควนซ์บวกหรือลบได้แก่ ฮาร์มอนิกอันดับ 5, 7, 11, 13, 17, 19 ซึ่งในกรณีโหลดไม่สมดุลจะแตกต่างจากกรณีโหลดสมดุลคือต้องตรวจจับฮาร์มอนิกอันดับนั้นทั้งซีเควนซ์บวกและลบ ค่าที่แสดงเป็นค่าที่วัดจากกระแสในเฟส w

6.2.1.1 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 5 ซีเควนซ์บวกและลบในสายเฟส

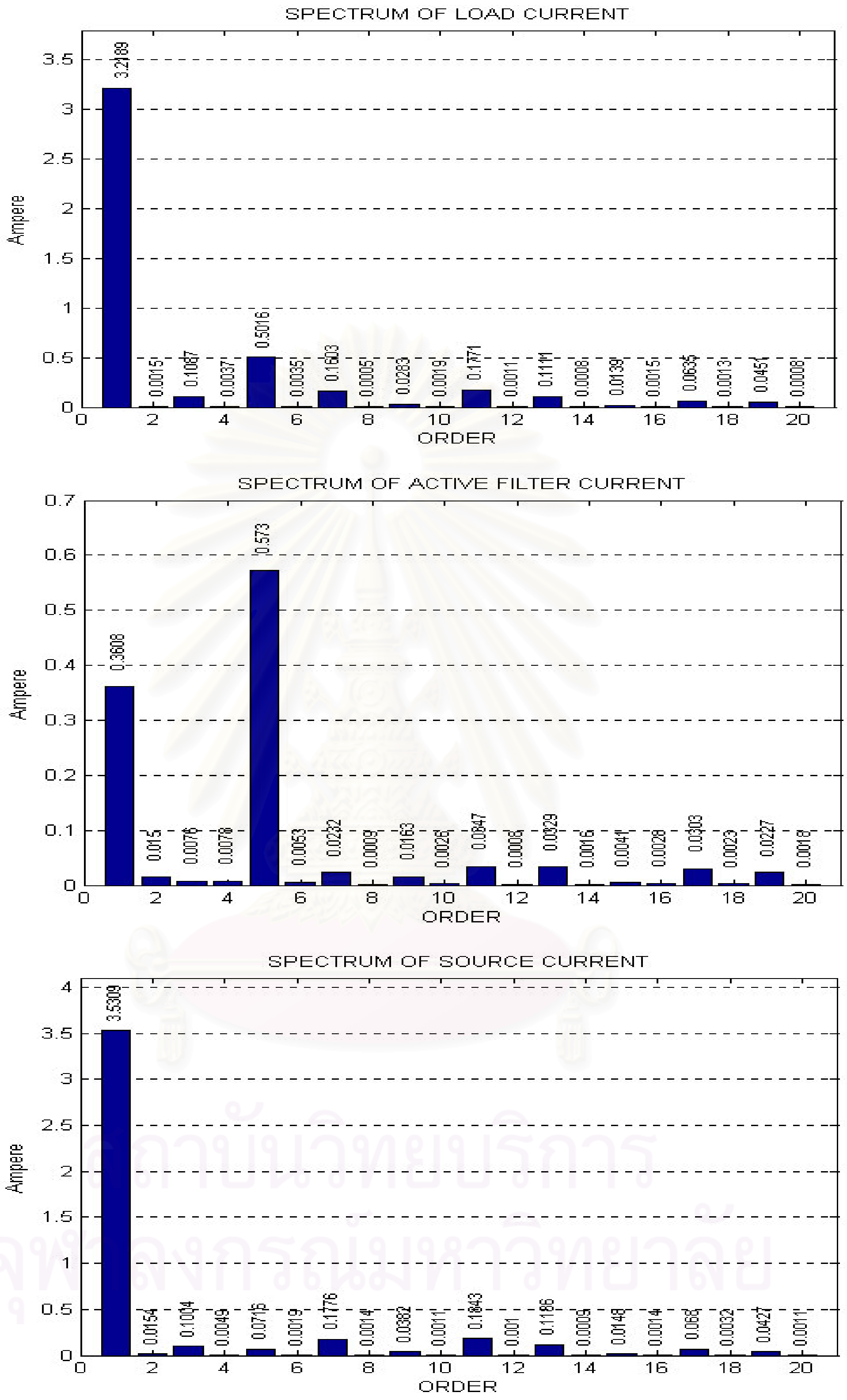
ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.15 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.16 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ 5 ในทางด้านแหล่งจ่ายมีขนาดลดลงโดยอัตราการลดทอน $\left|i_{sh}\right|/\left|i_{Lh}\right|_{h=5} = 0.143$ คือลดลงจาก 0.501 A ทางด้านโหลดเหลือ 0.071 A ทางด้านแหล่งจ่าย



(5A/di
v)

รูปที่ 6.15 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 5 อันดับบวกและลบในสายเฟส เมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

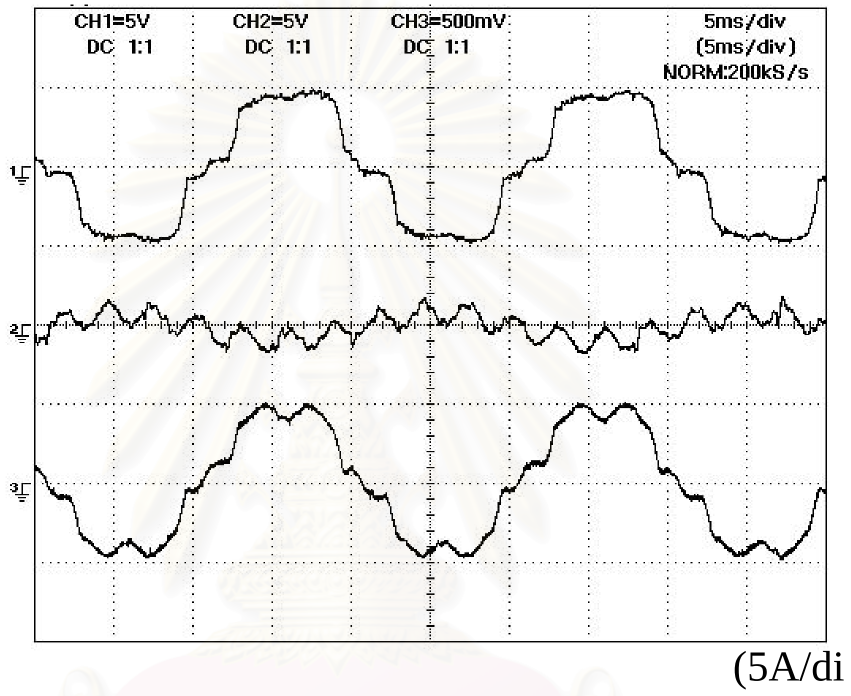
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



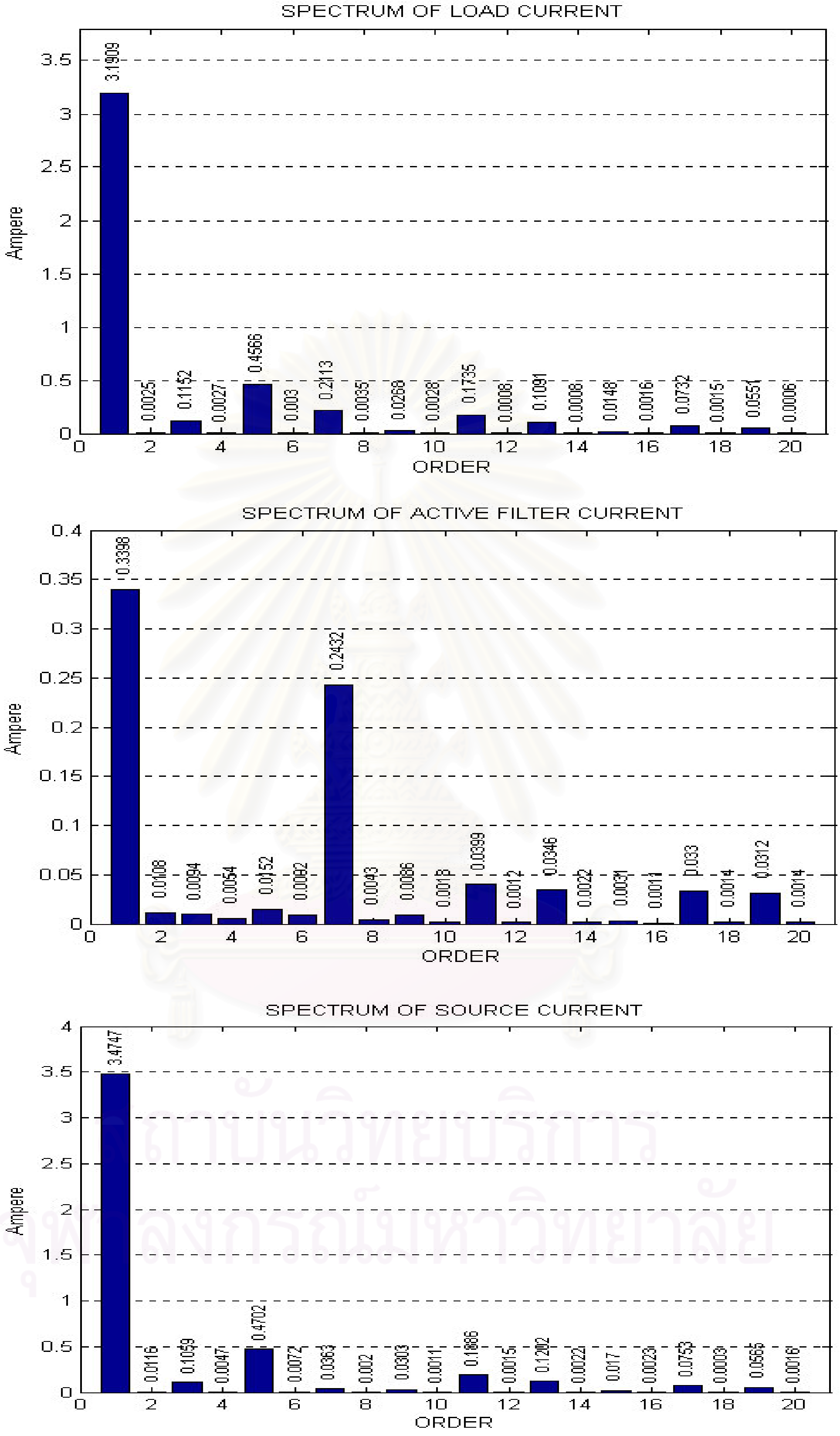
รูปที่ 6.16 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 5 ซีเควนซ์บวกและลบเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

6.2.1.2 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 7 ซีเควนซ์บวกและลบในสายเฟส

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.17 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.18 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ 7 ในทางด้านแหล่งจ่ายมีขนาดลดลงโดยอัตราการลดทอน $\left|i_{sh}\right|/\left|i_{Lh}\right|_{h=7} = 0.172$ คือลดลงจาก 0.2113 A ทางด้านโหลดเหลือ 0.0363 A ทางด้านแหล่งจ่าย



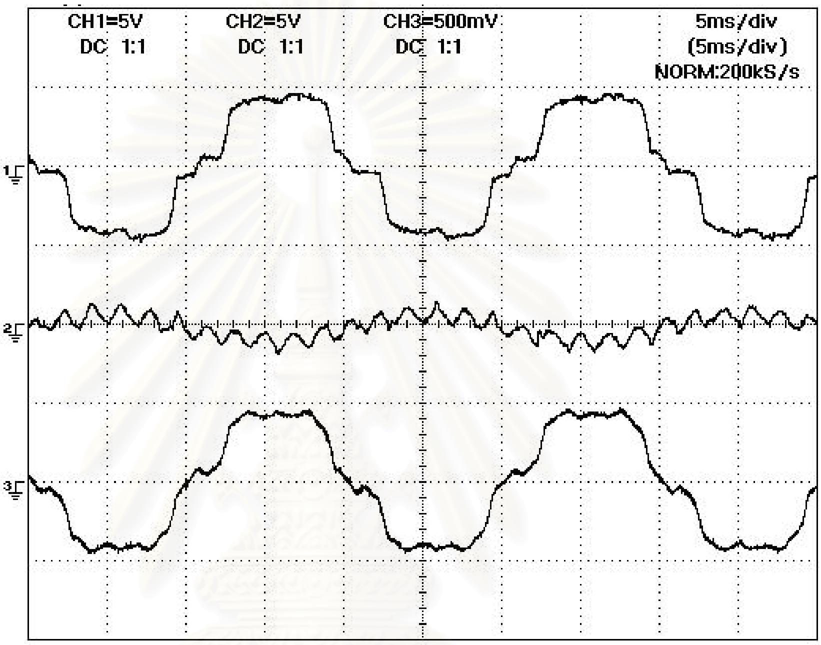
รูปที่ 6.17 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 7 อันดับบวกและลบในสายเฟส เมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$



รูปที่ 6.18 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 7 ซีเควนซ์บวกและลบเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

6.2.1.3 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 11 ซีเควนซ์บวกและลบในสายเฟส

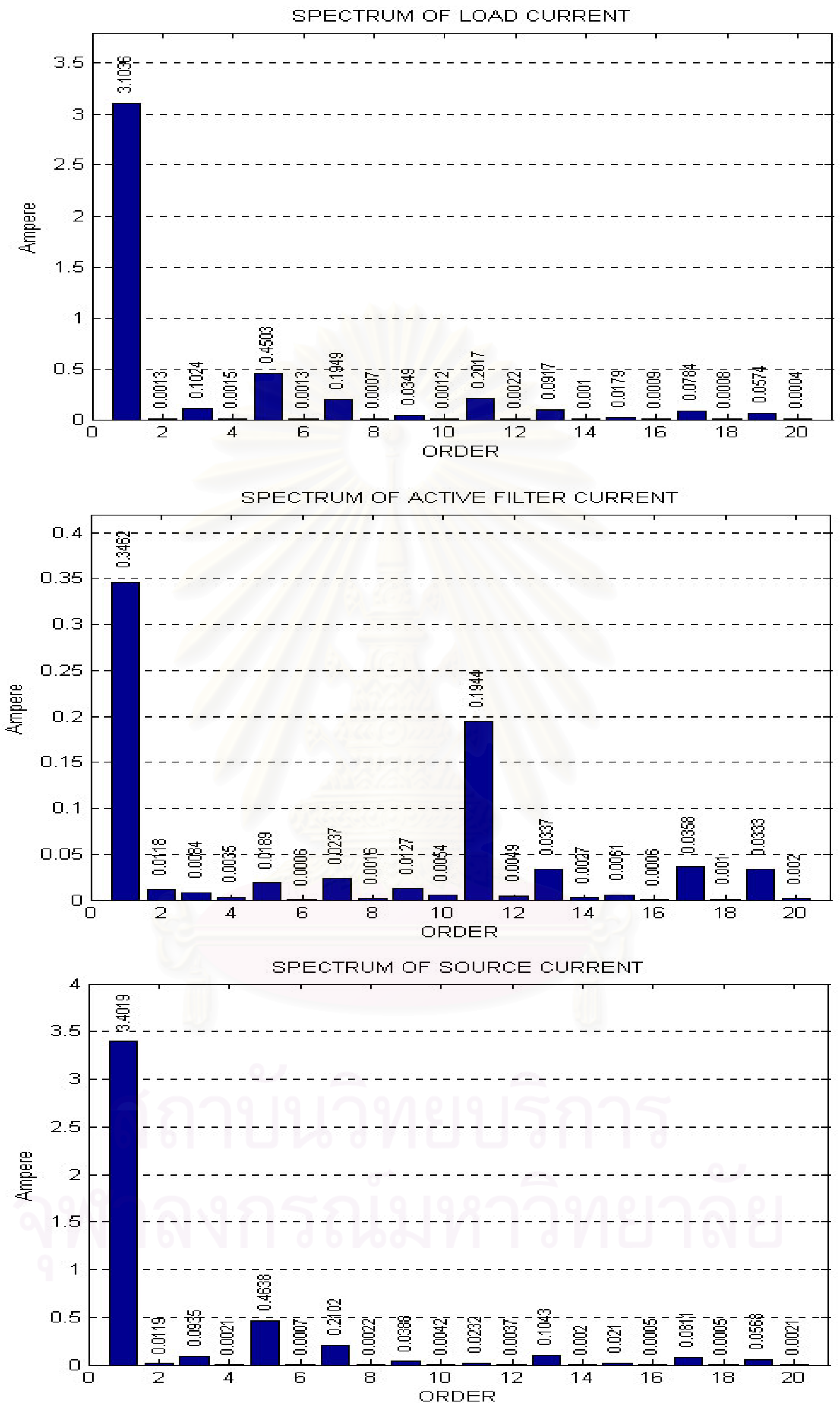
ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.19 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ 11 ในทางด้านแหล่งจ่ายมีขนาดลดลงโดยอัตราการลดทอน $\left|i_{sh}\right|/\left|i_{Lh}\right|_{h=11} = 0.115$ คือลดลงจาก 0.202 A ทางด้านโหลดเหลือ 0.023 A ทางด้านแหล่งจ่าย



(5A/div)

รูปที่ 6.19 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 11 อันดับบวกและลบในสายเฟส เมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

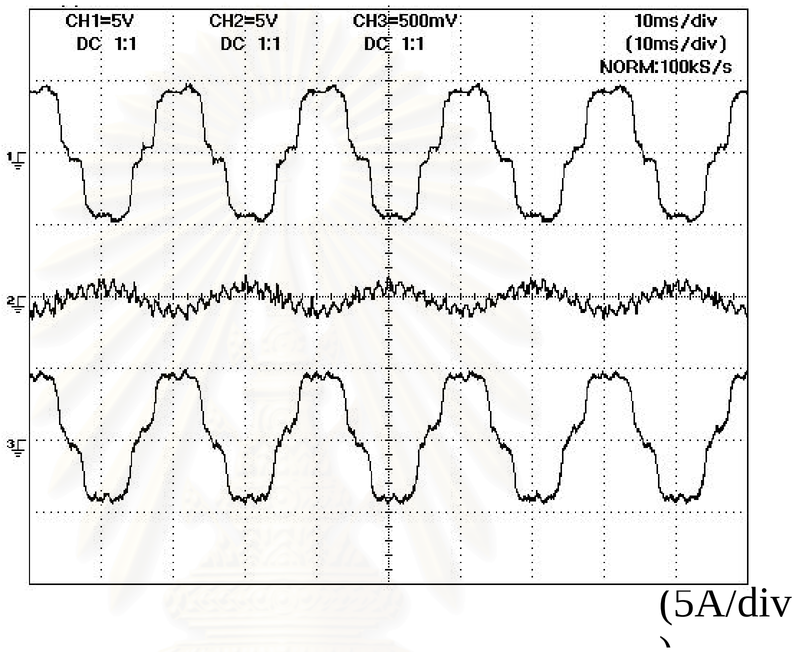


รูปที่ 6.20 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 11 ซีเควนซ์บวกและลบเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

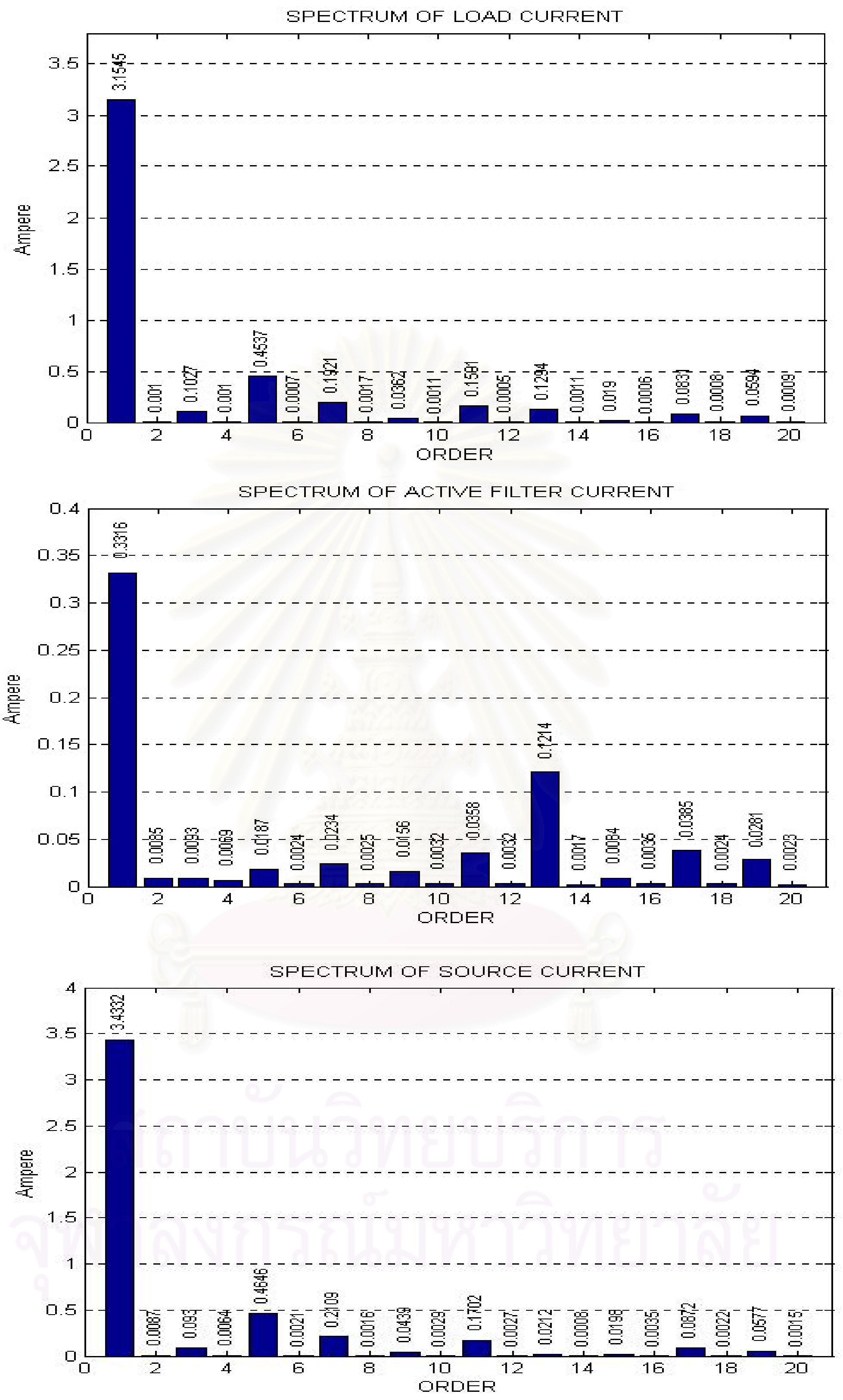
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2.1.4 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 13 ซีเควนซ์บวกและลบในสายเฟส

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 5.21 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 5.22 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ 13 ในทางด้านแหล่งจ่ายมีขนาดลดลงไม่มากนักโดยอัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=13} = 0.163$ คือลดลงจาก 0.129 A ทางด้านโหลดเหลือ 0.021 A ทางด้านแหล่งจ่าย



รูปที่ 6.21 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 13 อันดับบวกและลบในสายเฟส เมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

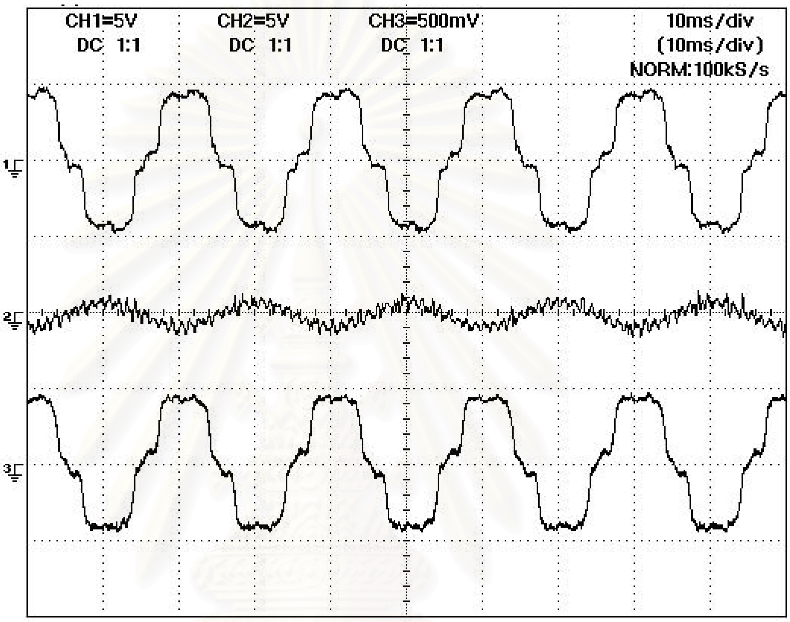


รูปที่ 6.22 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 13 ซีเควนซ์บวกและลบเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2.1.5 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 17 ซีเควนซ์บวกและลบในสายเฟส

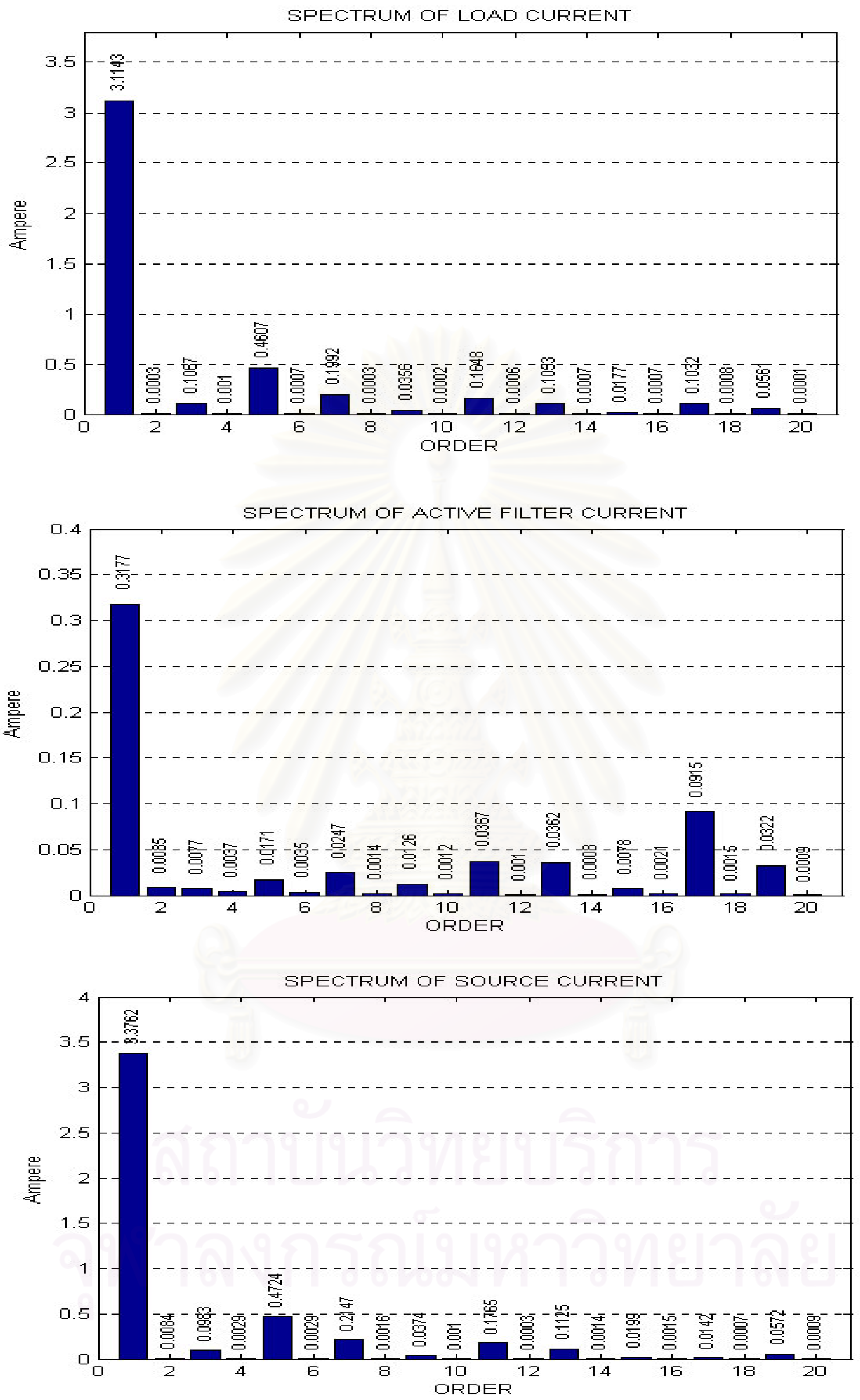
ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.23 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.24 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ 17 ในทางด้านแหล่งจ่ายมีขนาดลดลงโดยอัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7} = 0.137$ คือลดลงจาก 0.103 A ทางด้านโหลดเหลือ 0.014 A ทางด้านแหล่งจ่าย



(5A/div)

รูปที่ 6.23 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 17 อันดับบวกและลบในสายเฟส เมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

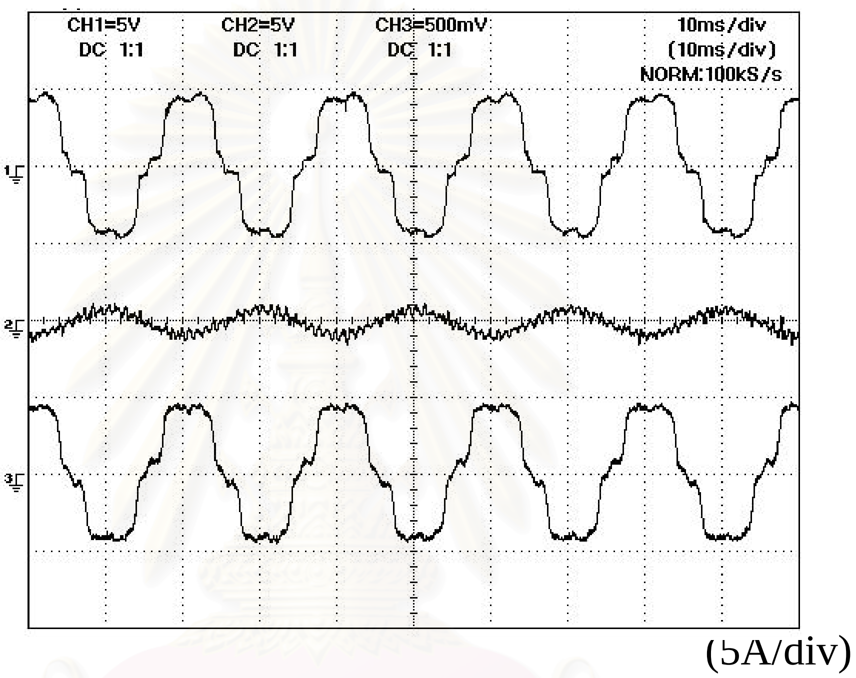


รูปที่ 6.24 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 17 ซีเควนซ์บวกและลบเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

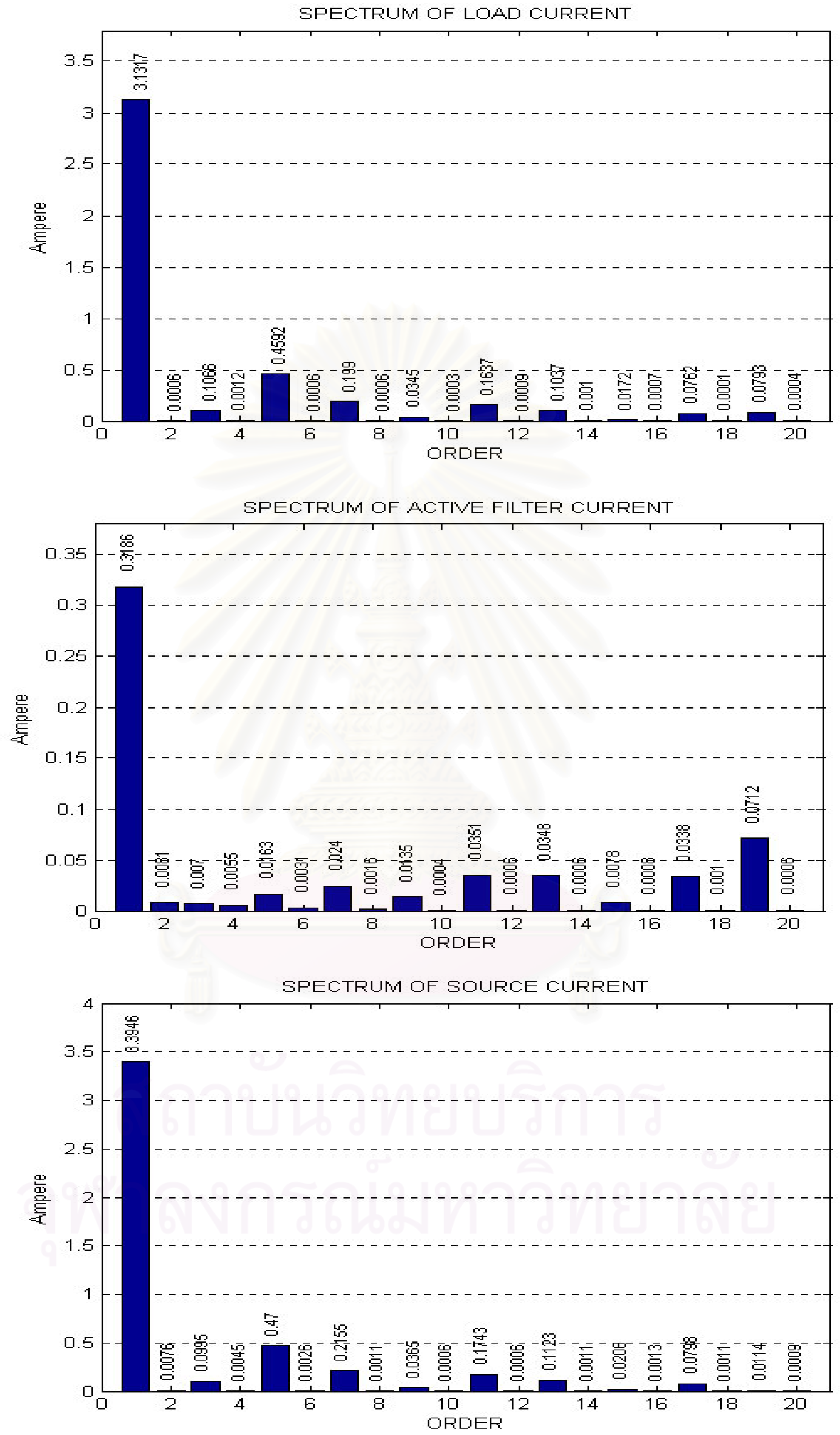
6.2.1.6 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 19 ซีเควนซ์บวกและลบในสายเฟส

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.25 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.26 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ 19 ในทางด้านแหล่งจ่ายมีขนาดลดลงโดยอัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7} = 0.143$ คือลดลงจาก 0.079 A ทางด้านโหลดเหลือ 0.011 A ทางด้านแหล่งจ่าย



รูปที่ 6.25 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 19 อันดับบวกและลบในสายเฟส เมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



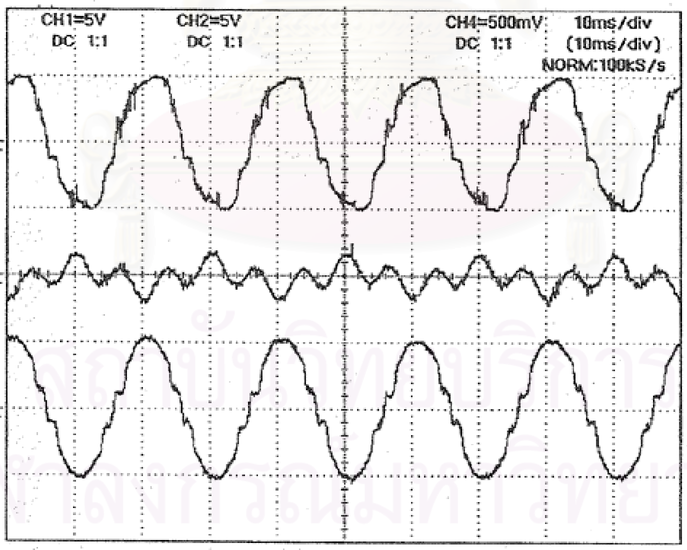
รูปที่ 6.26 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 19 ซีเควนซ์บวกและลบเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

6.2.2 กรณีกำจัดฮาร์มอนิกซีเควนซ์ศูนย์

การกำจัดฮาร์มอนิกซีเควนซ์ศูนย์ได้แก่ ฮาร์มอนิกอันดับ 3, 9, 15 ซึ่งในกรณีโหลดไม่สมดุลฮาร์มอนิกเหล่านี้มีปรากฏมากในสายนิวทรัลดังนั้นจึงตรวจจับฮาร์มอนิกอันดับเหล่านี้ทั้งในสายเฟสและในสายนิวทรัล แต่เพื่อให้การตรวจจับและการกำจัดฮาร์มอนิกในกรณีโหลดไม่สมดุลและกำจัดฮาร์มอนิกซีเควนซ์ศูนย์มีความชัดเจนมากขึ้นจึงเพิ่มกำลังของโหลดวงจรเรียงกระแส 1เฟสให้มากขึ้นเป็น 500VA มีโหลดเป็นความต้านทาน 80 Ω ต่ออนุกรมกับตัวเหนียวนำขนาด 175 mH และลดขนาดของโหลด 3 เฟสของวงจรเรียงกระแสลงเป็น 850 VA มีโหลดเป็นความต้านทาน 240 Ω ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ 10 mH เนื่องจากโหลด 1 เฟสต่อที่เฟส w ดังนั้นค่าที่แสดงและวิเคราะห์จึงเป็นค่าที่วัดจากกระแสในเฟส w

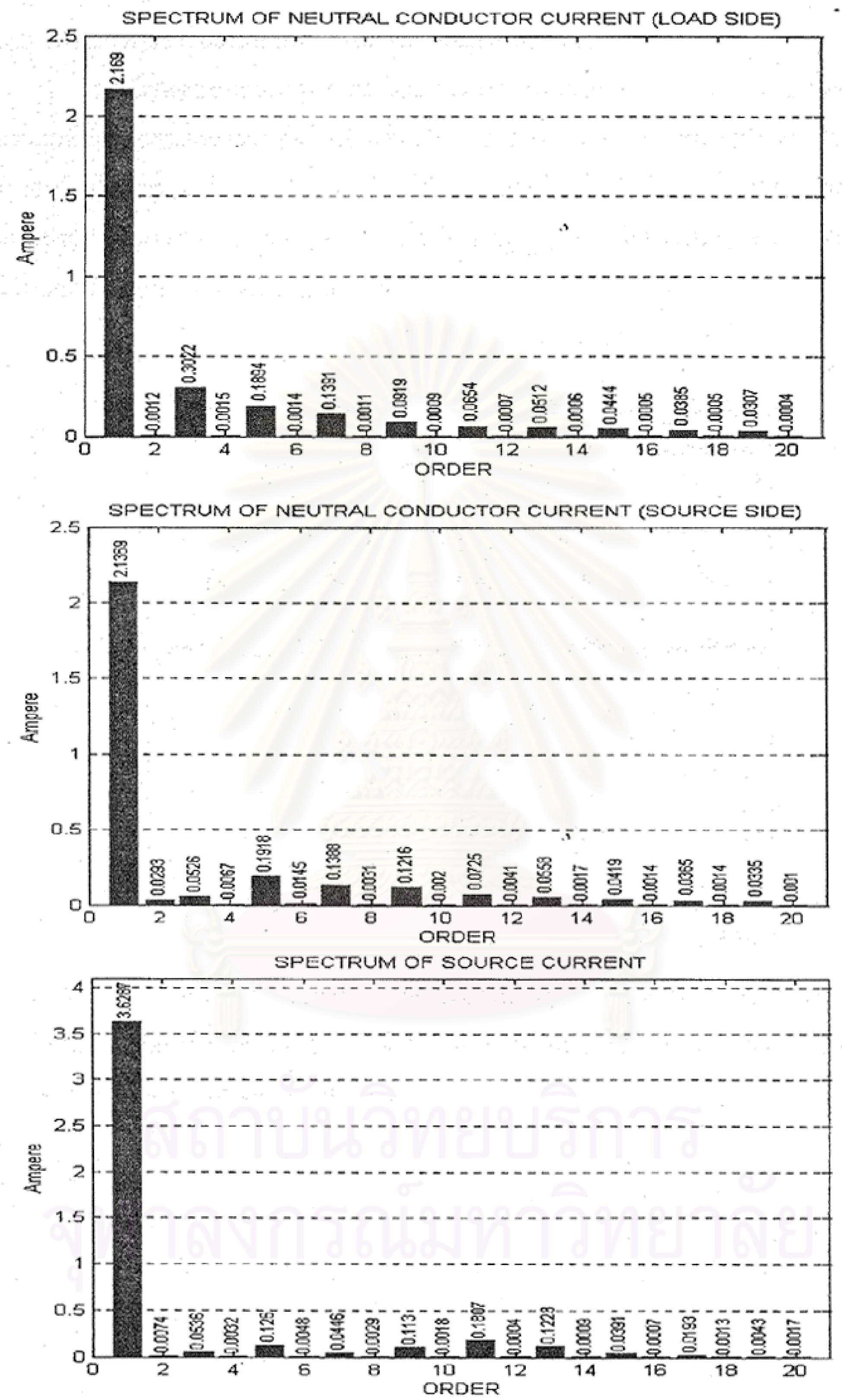
6.2.2.1 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 3ในสายเฟสและสายนิวทรัล

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.27 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.28 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 ในทางในสายนิวทรัลด้านแหล่งจ่ายมีขนาดลดลงโดยอัตราการลดทอน $|i_{Ns}|/|i_{NL}|_{h=3} = 0.172$ คือลดลงจาก 0.302 A ทางด้านโหลดเหลือ 0.053 A ทางด้านแหล่งจ่าย



(5A/div)

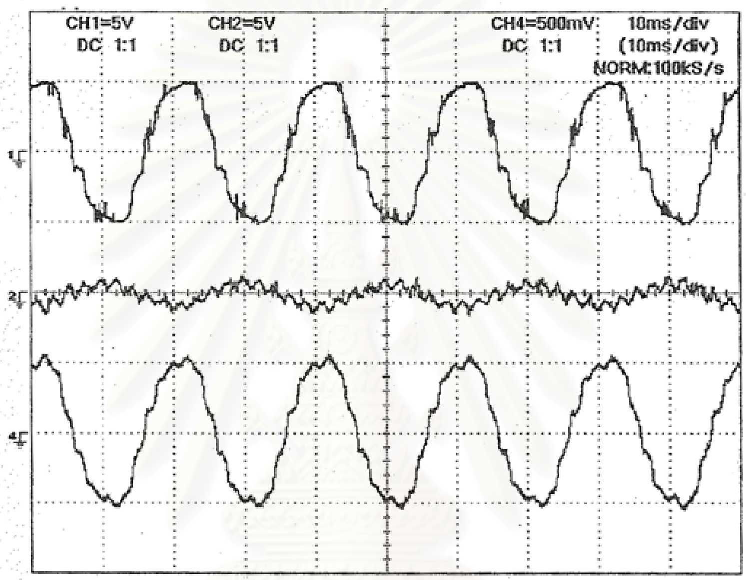
รูปที่ 6.27 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 3 อันดับบวกและลบในสายเฟสและในสายนิวทรัลเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$



รูปที่ 6.28 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 3 ในสายเฟสและในสายนิวทรัลเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

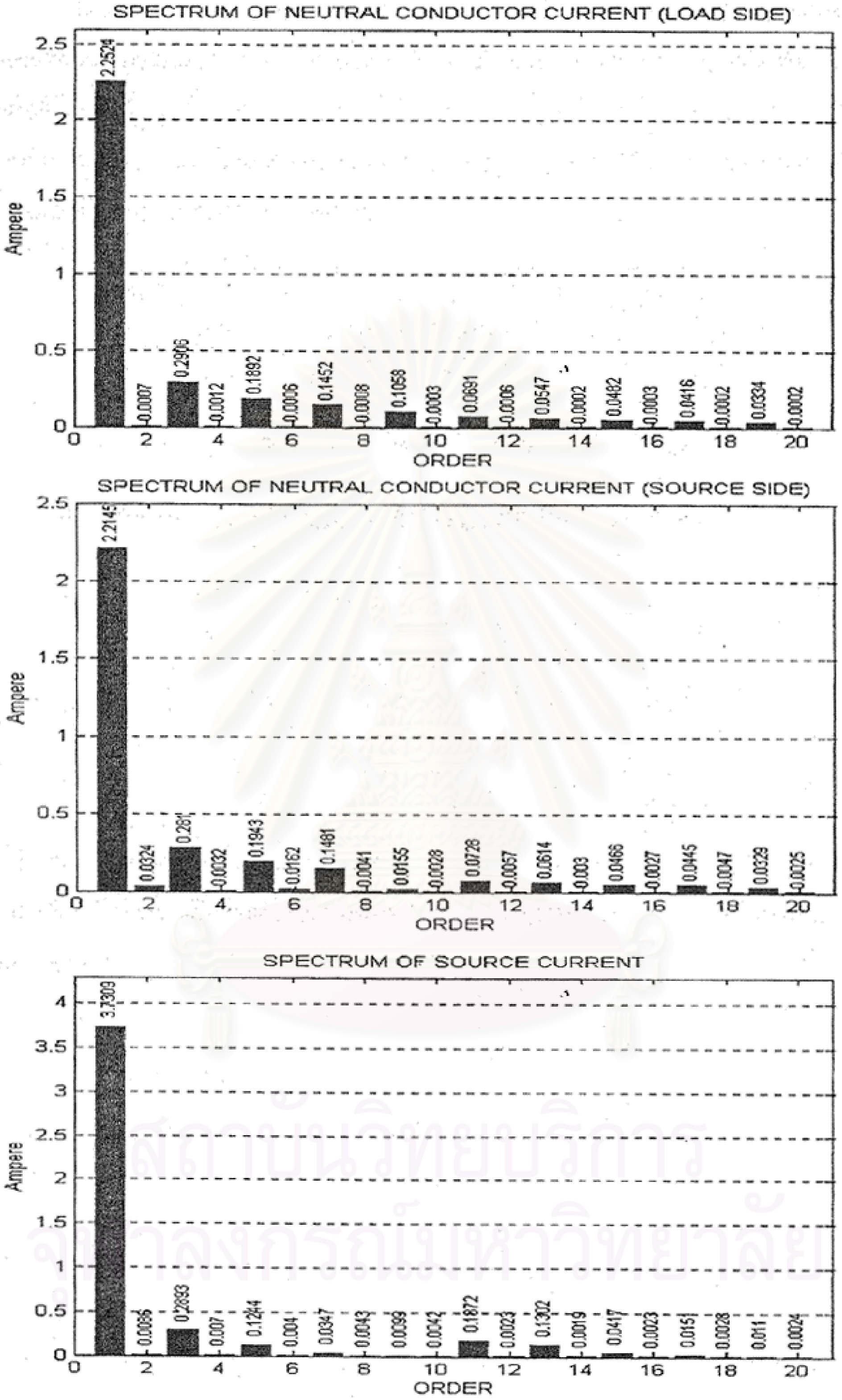
6.2.2.2 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 9ในสายเฟสและสายนิวทรัล

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.29 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.30 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ 9 ในทางในสายนิวทรัลด้านแหล่งจ่ายมีขนาดลดลงโดยอัตราการลดทอน $\left|i_{Ns}\right|/\left|i_{NL}\right|_{h=9} = 0.163$ คือลดลงจาก 0.106 A ทางด้านโหลดเหลือ 0.015 A ทางด้านแหล่งจ่าย



(5A/div)

รูปที่ 6.29 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 9 อันดับบวกและลบในสายเฟสและในสายนิวทรัลเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

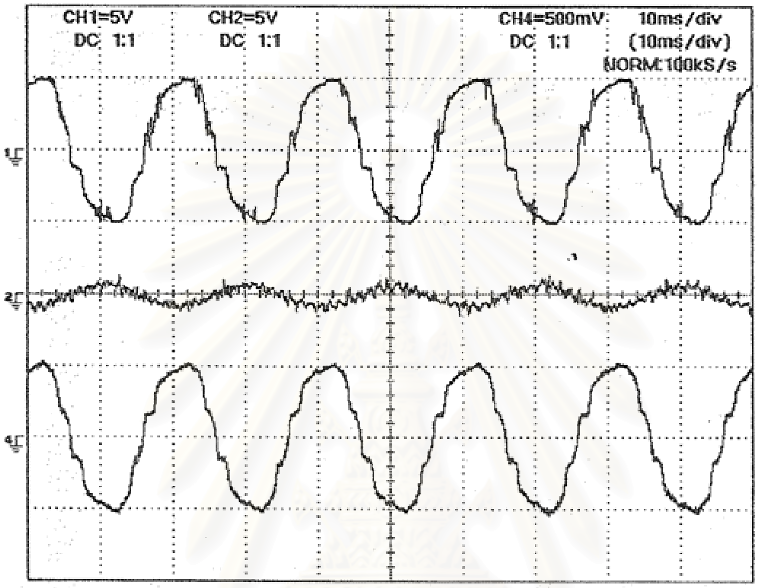


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 6.30 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 9 ในสายเฟสและในสายนิวทรัลเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

6.2.2.3 กำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับ 15ในสายเฟสและสายนิวทรัล

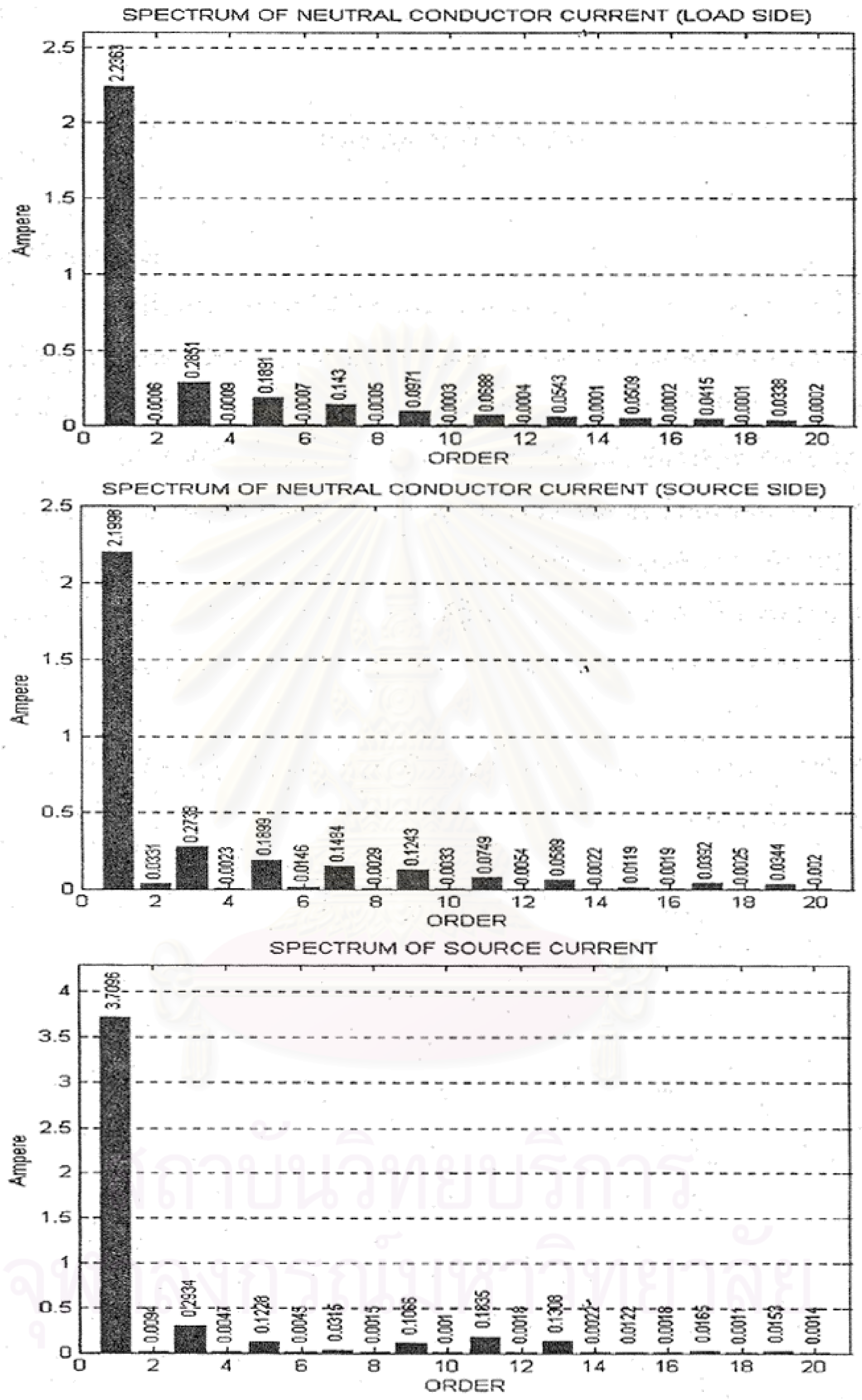
ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสจากโหลด กระแสของวงจรกรองแอกทีฟและกระแสจากแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.31 และแสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆในรูปที่ 6.32 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ 15 ในทางในสายนิวทรัลด้านแหล่งจ่ายมีขนาดลดลงโดยอัตราการลดทอน $\left|i_{Ns}\right|/\left|i_{NL}\right|_{h=15} = 0.233$ คือลดลงจาก 0.051 A ทางด้านโหลดเหลือ 0.012 A ทางด้านแหล่งจ่าย



(5A/div)

รูปที่ 6.31 กระแสโหลด (บน) กระแสของวงจรกรอง (กลาง) และกระแสของแหล่งจ่าย (ล่าง) ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 15 อันดับบวกและลบในสายเฟสและในสายนิวทรัลเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.32 สเปกตรัมของกระแสนิวทรัลทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสจากแหล่งจ่าย กรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับ 15 ในสายเฟสและในสายนิวทรัลเมื่ออัตราขยายค่าความผิดพลาด $K = 60$

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าสามารถนำการตรวจจับฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีซึ่งเดิมใช้สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟส 3 สายมาประยุกต์ใช้กับการตรวจจับฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลได้ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับสัญญาณคำสั่งที่เป็นสัญญาณไซน์หลายความถี่ปะปนกันดังเช่นวงจรกรองแอกทีฟ ผลการทำงานของวงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสในสายนิวทรัลแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีและการควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำได้แสดงให้เห็นทั้งในผลการจำลองการงานและผลการทำงานในระบบจริงว่าสามารถลดกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายได้ซึ่งสามารถเปรียบเทียบปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกในระบบเมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนกระแส 16 A กับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ได้ดังนี้

ตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกกรณีโหลดสมดุลและกำจัดฮาร์มอนิกหมดทุกอันดับ (กระแสที่แหล่งจ่าย 2.58 Arms)

ฮาร์มอนิกอันดับที่	ค่าตามมาตรฐาน (Arms)	กระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่าย (Arms)
3	2.30	0.14
5	1.14	0.31
7	0.77	0.15
9	0.40	0.12
11	0.33	0.18
13	0.21	0.23
15	0.15	0.09
17	0.13	0.26
19	0.12	0.23

ตารางที่ 7.2 เปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกกรณีโหลดสมดุลและกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ

ฮาร์มอนิกอันดับที่	ค่ากระแสในแหล่งจ่าย (Arms)	ค่าตามมาตรฐาน (Arms)	กระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่าย (Arms)
5	2.62	1.14	0.35
7	2.58	0.77	0.10
11	2.59	0.33	0.08
13	2.58	0.21	0.06
17	2.55	0.13	0.11
19	2.57	0.12	0.11

ตารางที่ 7.3 เปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกกรณีโหลดไม่สมดุลและกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับในสายเฟส

ฮาร์มอนิกอันดับที่	ค่ากระแสในแหล่งจ่าย (Arms)	ค่าตามมาตรฐาน (Arms)	กระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่าย (Arms)
5	3.55	1.14	0.32
7	3.52	0.77	0.16
11	3.44	0.33	0.11
13	3.48	0.21	0.09
17	3.42	0.13	0.07
19	3.44	0.12	0.05

ตารางที่ 7.4 เปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกกรณีโหลดไม่สมดุลและกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับในสายเฟสและสายนิวทรัล

ฮาร์มอนิกอันดับที่	ค่ากระแสในแหล่งจ่าย (Arms)	ค่าตามมาตรฐาน (Arms)	กระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่าย (Arms)
3	3.64	2.3	0.24
9	3.75	0.4	0.042
15	3.73	0.15	0.05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางเปรียบเทียบที่ 7.1-7.4 พบว่าค่าของฮาร์มอนิกที่คำนวณได้เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนกระแสที่แหล่งจ่ายเป็น 16 A สอดคล้องกับข้อกำหนดฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน แต่ยังมีบางกรณีที่ระดับของฮาร์มอนิกอันดับสูงมีค่าสูงกว่าค่ากำหนดเช่นในกรณีของโหลดสมดุลและกำจัดหมด ทั้งนี้เนื่องจากผลของค่าอัตราขยายของวงจรกรองผ่านต่ำที่เริ่มมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังมีผลเนื่องมาจากเวลาประวิงในการชดเชยที่มีผลมากต่อเฟสของกระแสชดเชยฮาร์มอนิกอันดับสูง

7.2 ข้อเสนอแนะ

การควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำมีข้อที่ต้องพิจารณาคือเรื่องของเสถียรภาพในการควบคุม ปัจจัยหนึ่งที่มีผลมากก็คือค่าความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านต่ำ การเลือกค่าความถี่นี้มีผลเกี่ยวเนื่องกับค่าความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์และค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรกรองแอกทีฟกับสายกำลัง ซึ่งถ้าหากความถี่ตัดที่เลือกนี้ไม่สูงเพียงพอ ก็มีผลให้คุณสมบัติที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับสูงลดลงไปด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กิติพจน์ สิทธิเลิศพิศาล. วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับลดฮาร์มอนิกและรักษาระดับแรงดัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

สรรค์ธิพงษ์ โฆษิตเกษม. วงจรกรองกำลังแอกทีฟขนานแบบไฮบริดสำหรับกำจัดฮาร์มอนิก .วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

สันต์ ศรีอรรฆ์ธำรง. วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยรีเคอร์ซีฟดีเอฟที .วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

สกุลรัตน์ ศิริพันธ์โนน. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความเพี้ยนของกระแสด้านเข้าต่ำสำหรับแหล่งจ่ายไฟต่อเนื่อง . วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

ภาษาอังกฤษ

A. Salem nia and S.Saadate. "Digital Control Active Filter Suppressing Particular Harmonics: Numerical Simulation and Experimentation". Proc. of ICHQP-Las Vegas , pp.632-36,1996.

C.Quinn, N. Mohan and H. Mehta. "A Four-Wire, Current Controlled Converter Neutralization in Three Phase, Four Wire systems". 1993 IEEE/APEC Proceedings, pp. 841-846.

F.Z.Peng , M. Kohata and H. Akagi. "Compensation Characteristic of Shunt Active and Series Active Filters" . Chinese-Japanese Power Electronics Conference , pp. 381-387, 1992.

H.Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae . "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits" . Proc. of IPEC-Tokyo, pp.1375-1386, 1983.

M. Aredes, E.H. Watanabe. "New Control Algorithms for Series and Shunt Three- Phase Four-Wire Active Power Filters". IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 10, NO.3 July, pp.1649-1656, 1995.

N. Nanaumi, S. Kuramoti and M. Yano. "Comparision of Versatile Harmonics Current Compensation and Specific Harmonics Number Current Compensation" . Conf. Rec. of Japan IAS, pp. 407-410, 1996.

P. Enjeti et al, "Analysis and Design of a New Power Active Filter to Cancel Neutral Current Harmonics in a Three-Phase Four Wire Electrical Systems". 1993 IEEE/IAS Confrence Records, pp. 939-946

S. Hara, Y. Yamamoto, T. Omata and M. Nakano. "Repetitive Control System: A new type Servo System for Periodic Exogenous Signals" . IEEE Trans. on Autom. Contr.,AC-33, pp. 659-667, July,1988.

T. Thomas, K. Haddad, G.Joos and A. Jaffari. "Performance Evaluation of Three phase, Three and Four Wire Active Filter" .IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.2, pp.1016-1023, 1996.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

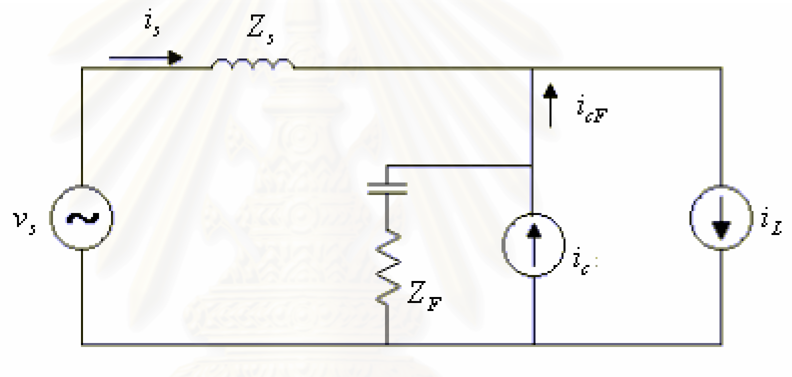
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วงจรกรองความถี่การสวิตช์ด้านออก

(สันต์ ศรีอรรฆ์ธำรง, 2541)

เนื่องจากกระแสที่ได้จากการสร้างโดยอินเวอร์เตอร์จะมีระลอกคลื่นที่ความถี่การสวิตช์ปะปนอยู่มากดังนั้นทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์จำเป็นต้องมีวงจรกรอง เพื่อใช้กรองระลอกกระแสความถี่การสวิตช์ที่เกิดขึ้นนี้ทิ้งก่อนจ่ายกระแสเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยใช้วงจรกรอง R ต่ออนุกรมกับ C ต่อขนานเข้ามาในระบบ วงจรสมมูลต่อเฟสของระบบเมื่อมีการต่อวงจรกรองความถี่การสวิตช์เพิ่มเข้ามาแสดงได้ดังรูปที่ ก.1 วงจรกรอง R - C สามารถทำงานได้ดีเนื่องจากแหล่งจ่ายมีอิมพีแดนซ์เป็นตัวเหนี่ยวนำซึ่งทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่การสวิตช์



รูปที่ ก.1 วงจรสมมูล 1 เฟสของระบบเมื่อต่อวงจรกรองกระแสความถี่การสวิตช์

จากรูปที่ ก.1 ฟังก์ชันโอนย้ายจากกระแสชดเชยที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ (i_c)ไปยังกระแสชดเชยที่ถูกกรองแล้ว (i_{cF}) แสดงได้ดังสมการที่ (ก.1)

$$A(s) = \frac{i_{cF}(s)}{i_c(s)} = \frac{sRC + 1}{s^2 L_s C + sRC + 1} \qquad \text{(ก.1)}$$

เมื่อ $Z_s = sL_s$ โดยที่ L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำสมมูลของแหล่งจ่าย

R คือ ค่าความต้านทานของวงจรกรอง

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

ฟังก์ชันโอนย้าย *A(s)* จะเป็นวงจรกรองอันดับ 2 ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ

- ขั้วของฟังก์ชันโอนย้าย
- ความถี่ $\frac{1}{\sqrt{L_s C}}$
- ความถี่ $\frac{1}{RC}$

เราจะมีหลักการออกแบบค่า R และ C ดังต่อไปนี้

1. เพื่อให้คุณสมบัติการกรองที่ความถี่สูงดี เราจะเลือกให้การกรองมีคุณสมบัติหลักเป็น L - C โดย R ที่ต่ออนุกรมกับ C จะช่วยลดการเรโซแนนซ์ ซึ่งจะได้เงื่อนไขคือ

$$\frac{1}{\sqrt{L_s C}} < \frac{1}{RC}$$

ซึ่งจะทำให้ได้ความถี่หักมุมของวงจรกรองโดยประมาณเป็น $\frac{1}{\sqrt{L_s C}}$ และมีศูนย์ที่ความถี่สูงที่ความถี่ $\frac{1}{RC}$

2. เนื่องจากเราไม่ต้องการให้วงจรกรองพาสซีฟรับภาระการกรองฮาร์มอนิกอันดับสูงของโหลด ดังนั้นต้องเลือกค่า C เพื่อให้ความถี่หักมุมสูงพอ คือมากกว่าฮาร์มอนิกอันดับ19 จะได้เงื่อนไข

$$\frac{1}{\sqrt{L_s C}} > 2\pi \times 1kHz$$

3. ระบบจะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ประมาณ $\frac{1}{\sqrt{L_s C}}$ ซึ่งทำให้เกิดการขยายฮาร์มอนิกในย่านนี้ โดยมีค่าอัตราขยายสูงสุดโดยประมาณตามสมการที่ (ก.2)

$$\left\| A(j\omega) \right\|_{\omega = \frac{1}{\sqrt{L_S C}}} = \sqrt{1 + \frac{L_s}{R^2 C}} \qquad (ก.2)$$

4. ระบบซึ่งประกอบไปด้วย R C L_s เป็นระบบอันดับ 2 มีช่วงเวลาสภาวะชั่วครู่ขึ้นอยู่กับค่าส่วนจริงของขั้วของฟังก์ชันโอนย้าย ซึ่งฟังก์ชันโอนย้าย A(s) มีขั้วอยู่ที่

$$-\frac{R}{2L_s} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4{L_s}^2} - \frac{1}{L_s C}}$$

โดยเมื่อเทียบกับสมการมาตรฐาน $\frac{{\omega_n}^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + {\omega_n}^2}$ ซึ่งจะมีค่าเวลาเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว(settling time) ที่ 2% criterion $t_s = \frac{4}{\xi\omega_n}$ และเมื่อนำมาเทียบกับสมการที่ (ก.1) จะสามารถเขียนได้ในรูปของ $t_s = \frac{4}{R/(2L_s)}$ ซึ่งจะต้องมีค่าสั้นพอที่จะตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของระลอกกระแสความถี่การสวิตช์ เราจึงออกแบบให้เวลาในการตอบสนองน้อยกว่า 3 ms ($\approx$ 1/6 ของคาบสัญญาณ 50 Hz) จะได้เงื่อนไข

$$R > \frac{8}{3} \times 10^3 L_s$$

5. ในย่านความถี่ตั้งแต่ความถี่การสวิตช์ขึ้นไป ลักษณะการกรองจะกลายเป็นวงจร R-L โดยประมาณ เราเลือกให้การกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่การสวิตช์มีค่าลดทอนไม่เกิน 0.3 (30%) ดังนั้นค่า R ต้องเป็นไปตามเงื่อนไข

$$\left\| \frac{R}{R + j\omega L_s} \right\|_{\omega = 2\pi \times 10kHz} < 0.3$$

ซึ่งจะทำให้ค่า R ที่ใช้ควรมีค่าน้อยกว่า 125 โอห์ม

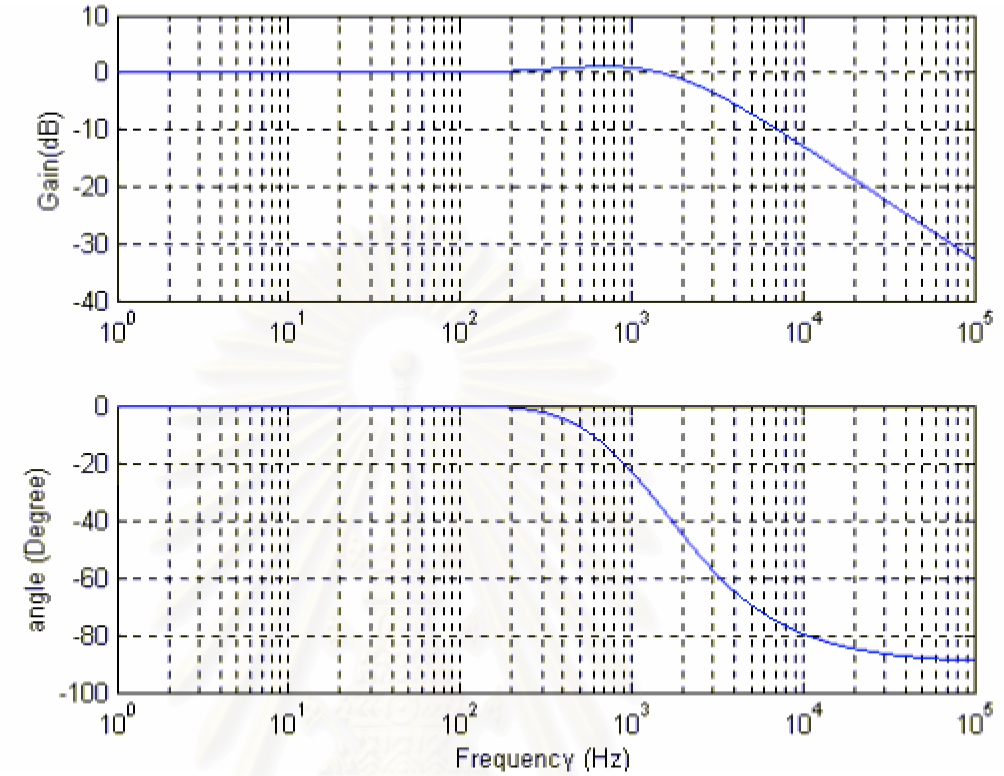
สังเกตว่าถึงแม้เราจะเลือกให้การลดทอนที่ 10 kHz เหลือ 30% แต่กระแสที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ในความเป็นจริงจะมีค่าระลอกที่ความถี่โดยเฉลี่ยสูงกว่านี้ประมาณ 3 เท่าเนื่องจากเราใช้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

จากหลักการออกแบบข้างต้นเราจะออกแบบโดยกำหนดให้ L_s = 8.5 mH ได้ดังนี้

1. เลือกค่า C = 2.7 μF ซึ่งจะให้ความถี่หักมุม $\frac{1}{\sqrt{L_s C}}$ = 1.05 kHz
2. เลือกค่า R = 125 โอห์ม ซึ่งจะให้ค่าอัตราขยายที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์ประมาณ 3 dB และให้ค่าเวลาเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวของระบบน้อยกว่า 1 ms ซึ่งได้ตามเงื่อนไขและให้คุณสมบัติการกรองที่ความถี่การสวิตช์ตามต้องการ

จากค่าที่ออกแบบข้างต้นวงจรกรองกระแสความถี่การสวิตช์ที่ได้จะมีลักษณะสมบัติของฟังก์ชันโอนย้าย A(s) ดังรูปที่ ก.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.2 ลักษณะสมบัติของวงจรกรองกระแสความถี่การสวิตช์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายประจวบ บุญศรีรัมย์ เกิดเมื่อวันที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 2515 ที่อำเภอประโคนชัย จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2537 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย