

วงจรรองแอกที่พจนานแบบไฮบริดที่ใช้รีเคอร์ซีฟดีเอฟที

นายดุสิต เลิศสวัสดิ์วิชา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2543

ISBN 947-347-216-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A HYBRID PARALLEL ACTIVE FILTER USING RECURSIVE DFT



Mr. Dusit Lertsawatwicha

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 2000

ISBN 974-347-216-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดที่ใช้รีเฟอรัลพีดีเอฟที

โดย

นายคูสิต เลิศสวัสดิ์วิชา

สาขา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.สมบุญม์ แสงวงศ์วานิชย์

คณะกรรมการศาสตราจารย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิฑิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.สมบุญม์ แสงวงศ์วานิชย์)

..... กรรมการ
(อาจารย์สุวิทย์ นาคพีระยุทธ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ไชยะ แซ่ม้อย)

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คู่มือ เลิศสวัสดิ์วิชา : วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดที่ใช้รีเคอร์ซีฟดีเอฟที (A HYBRID PARALLEL ACTIVE FILTER USING RECURSIVE DFT) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 123 หน้า. ISBN 974-347-216-9

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดสำหรับใช้กำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยวงจรกรองแอกทีฟจะถูกควบคุมให้มีพฤติกรรมเสมือนตัวเหนี่ยวนำที่จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์กับวงจรกรองพาสซีฟที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆ และเสนอวิธีการตรวจจับกระแสแบบใหม่เพื่อลดทอนผลของความผิดพลาดของอุปกรณ์ตรวจจับกระแส รวมทั้งวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ และแสดงวิธีการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพด้วยทฤษฎีของอัตราขยายค่าเล็ก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดสามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกได้ตามต้องการ และมีขนาด kVA เล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดกำลังของโหลด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2543..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170308021: MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD: ACTIVE FILTER / HARMONIC / HYBRID / RECURSIVE DFT

DUSIT LERTSAWATWICHA : A HYBRID PARALLEL ACTIVE FILTER USING
RECURSIVE DFT. THESIS ADVISOR : SOMBOON SANGWONGWANICH, 123 pp.
ISBN 974-347-216-9

This thesis presents a hybrid parallel active filter which behaves as an inductor resulting in series resonance with the connected passive filter to eliminate the harmonic currents in the power system. A new current detection method is also proposed to solve the problem caused by the non-ideal gain characteristic of the current sensor. Stability analysis is carried out, and a design method based on small gain theorem is then given. Experimental results show that the harmonic currents can be suppressed as desired, which confirms the effectiveness of the proposed hybrid active filter, and that the required kVA of the hybrid active filter is much less than that of the load.



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

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

Academic year... 2000..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้ความแนะนำตลอดจนความช่วยเหลือด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา และรุ่นพี่รุ่นน้องรวมถึงเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ให้ความช่วยเหลือด้านฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ และกำลังใจที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ให้ความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน ตลอดจนเงินทุนวิจัยจากห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังและอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์จากบริษัท A.P.Y. ENGINEERING CO., LTD.

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญเรื่อง

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญเรื่อง.....	ช
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 ทฤษฎีการกำจัดกระแสมอนิก.....	6
3 เสถียรภาพและการออกแบบวงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริด.....	29
4 โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ.....	41
5 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ.....	53
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	102
รายการอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	110

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกสำหรับระบบกำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	5
5.1 เปรียบเทียบกระแสฮาร์โมนิกทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อกำจัดฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ กับมาตรฐานของ IEC 1000-3-2 Class A.....	74
5.2 เปรียบเทียบขนาด kVA ของวงจรกรองแอกทีฟเมื่อกำจัดฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ.....	101



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้วงจรกรองในลักษณะต่างๆ.....	2
1.2 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรอง.....	3
2.1 วงจรสมมูลหนึ่งเฟส สำหรับฮาร์มอนิกอันดับที่ 5,7.....	7
2.2 แผนภาพแสดงการคำนวณแรงดันเสมือนตัวเหนี่ยวนำบนแกนหมุน.....	9
2.3 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ	13
2.4 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิงซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ 50 Hz.....	15
2.5 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับโดยใช้วิธีวงจรกรองบนแกนหมุน	15
2.6 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิง ซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ $h\omega$	16
2.7 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h โดยใช้วงจรกรองบนแกนหมุน.	17
2.8 ลักษณะสมบัติการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีวงจรกรองบนแกนหมุนเมื่อตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ซึ่งควานซ์บวก.....	18
2.9 ลักษณะของสัญญาณอ้างอิงสำหรับการทำ DFT แบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงแบบที่ใช้ในการทำ DFT ทั่วไป.....	21
2.10 บล็อกไดอะแกรมแสดงการคำนวณ Recursive DFT แบบเต็มคาบบนแกนหมุน.....	23
2.11 บล็อกไดอะแกรมแสดงการคำนวณ Recursive DFT แบบเต็มคาบบนแกนหมุนเมื่อขาดเซชผลของเวลาประวิง.....	25
2.12 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสและบล็อกไดอะแกรมในกรณีตรวจจับกระแสทางด้านโหลด.....	26
2.13 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสและบล็อกไดอะแกรมในกรณีวงจรกรองแอกทีฟตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟ.....	27
2.14 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ.....	28
3.1 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูน.....	29
3.2 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนที่ออกแบบ.....	31
3.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองแอกทีฟที่ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	32
3.4 ผล โบนเดปล็อตที่ยังไม่ได้แก้ปัญหาเสถียรภาพ กรณีค่าความผิดพลาด ± 20 เปอร์เซ็นต์.	33
3.5 บล็อกไดอะแกรมเมื่อทำการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพ โดยติดวงจรกรองผ่านต่ำบนแกนหนึ่ง	34
3.6 ผล โบนเดปล็อต กรณีติดวงจรกรองผ่านต่ำบนแกนหนึ่งที่ค่าความถี่หักมุม 100 Hz.....	35
3.7 ผล โบนเดปล็อต กรณีติดวงจรกรองผ่านต่ำบนแกนหนึ่งที่ค่าความถี่หักมุม 1 Hz.....	36
3.8 บล็อกไดอะแกรมเมื่อทำการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพ โดยติดวงจรกรองผ่านต่ำบนแกนหมุน.....	37

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ผลโบทเดฟลื้อต กรณิดิตดวงจรกรองผ่านด้าบนแกนหมุนที่ความถี่หักมุม 100 Hz.....	37
3.10 ช่วงเวลาตอบสนอง ในการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกที่แปลงเป็นแรงดันของวงจกรอง แอกทีฟด้วยวิธีต่างๆ.....	38
3.11 บล๊อคไดอะแกรมเฉพาะในส่วนคำนวณแรงดันป้อนกลับแบบ PI.....	39
3.12 บล๊อคไดอะแกรมเมื่อมีทั้งส่วนการป้อนไปหน้าและส่วนการป้อนกลับ.....	39
3.13 แผนภูมิในควิสต์ของระบบเมื่อมีทั้งส่วนการป้อนไปหน้าและส่วนการป้อนกลับ.....	40
4.1 โครงสร้างของวงจกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริด.....	41
4.2 โครงสร้างส่วนของวงจกรองแอกทีฟ.....	42
4.3 ส่วนตรวจจับสัญญาณกระแส.....	43
4.4 ส่วนตรวจจับแรงดันบัลไฟตรง.....	44
4.5 บล๊อคไดอะแกรมแสดงการทำงานของ DSP ในระบบวงจกรองแอกทีฟในการคำนวณ หาแรงดัน.....	45
4.6 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์กรณีก้าจัดฮาร์โมนิก 1 อันดับ.....	48
4.7 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์กรณีก้าจัดฮาร์โมนิก 2 อันดับ.....	51
4.8 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์ส่วนสร้างแรงดันเสมือนตัวเหนี่ยวน้า.....	52
5.1 รูปคลื่นกระแสโหลดวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟสควบคุมมุมจุดชนวนที่ 60 องศา ของระบบ.....	54
5.2 สเปกตรัมของกระแสโหลดของระบบ 3 เฟส.....	55
5.3 รูปคลื่นกระแสของระบบกรณีก้าจัดดวงจกรองแอกทีฟแต่มีวงจกรองพาสซีฟแบบดีจูน. 56	56
5.4 สเปกตรัมของกระแสของระบบกรณีก้าจัดดวงจกรองแอกทีฟแต่มีวงจกรองพาสซีฟ แบบดีจูน.....	57
5.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ใช่วงจกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกรณีก้าจัดดวงจกรอง แอกทีฟไม่มีส่วนควบคุมป้อนกลับ.....	60
5.6 สเปกตรัมของกระแสของระบบที่ใช่วงจกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกรณีก้าจัดดวงจ กรองแอกทีฟไม่มีส่วนควบคุมป้อนกลับ.....	61
5.7 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ใช่วงจกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกรณีก้าจัดดวงจ กรองแอกทีฟมีส่วนควบคุมป้อนกลับ.....	62
5.8 สเปกตรัมของกระแสของระบบที่ใช่วงจกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกรณีก้าจัดดวง กรองแอกทีฟมีส่วนควบคุมป้อนกลับ.....	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ใช้งานกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกรณีอุปกรณ์ตรวจ จับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีค่าความผิดพลาด +20 เปอร์เซ็นต์.....	65
5.10 สเปกตรัมของกระแสในระบบในกรณีที่อุปกรณ์ตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีค่า ความผิดพลาด +20 เปอร์เซ็นต์.....	66
5.11 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ใช้งานกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกรณีอุปกรณ์ตรวจ จับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีค่าความผิดพลาด -20 เปอร์เซ็นต์.....	67
5.12 สเปกตรัมของกระแสในระบบในกรณีที่อุปกรณ์ตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีค่า ความผิดพลาด -20 เปอร์เซ็นต์.....	68
5.13 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด ฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5.....	75
5.14 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด ฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5.....	76
5.15 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด ฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 7.....	77
5.16 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด ฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 7.....	78
5.17 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด ฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 11.....	79
5.18 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด ฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 11.....	80
5.19 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด ฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 7 และ 11.....	81
5.20 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด ฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 7 และ 11.....	82
5.21 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด ฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5 และ 11.....	83
5.22 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด ฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5 และ 11.....	84
5.23 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด ฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 7 และ 11.....	85

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.1 บล๊อคไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง.....	106
ก.2 บล๊อคไดอะแกรมของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ในการออกแบบ.....	107
ก.3 บล๊อคไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรงหลังจากประมวลเป็นระบบเชิงเส้น.....	108
ก.4 ช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยายและช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง.....	109



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

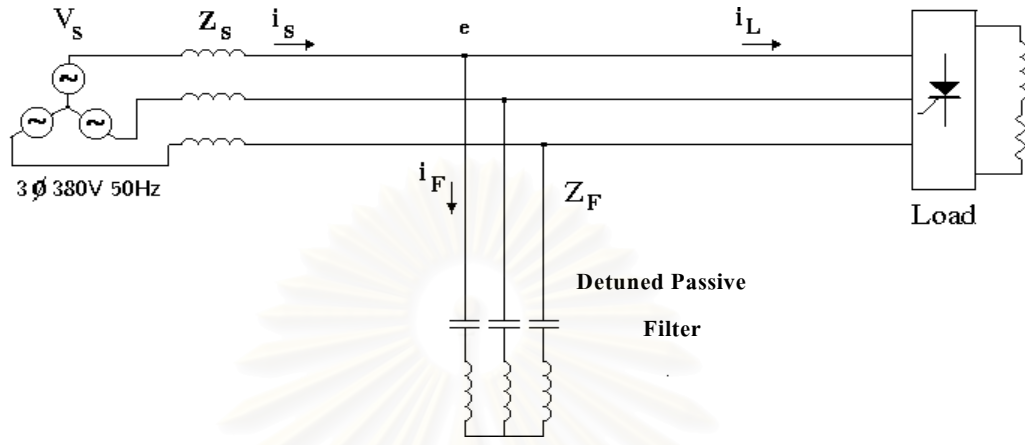
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

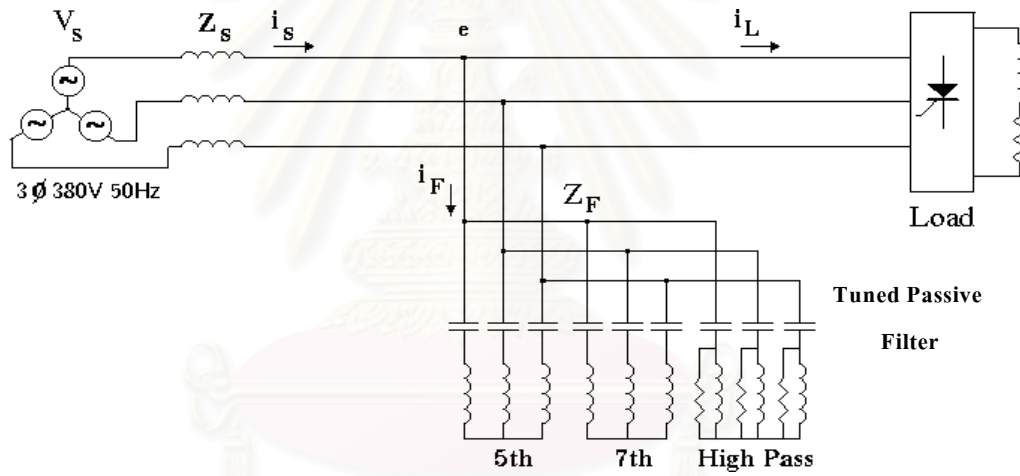
ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง ปัญหาที่มีผลกระทบมากคือกรณีที่ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบตรงกับความถี่ของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นภายในระบบ แล้วทำให้เกิดกระแสและแรงดันเกินสร้างความเสียหายให้แก่ระบบได้ โดยเฉพาะที่ตัวเก็บประจุที่ต่อไว้สำหรับปรับปรุงตัวประกอบกำลัง แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาคือการใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองพาสซีฟแบบดิจุนดังแสดงในรูปที่ 1.1(ก) เพื่อลดผลของฮาร์มอนิก โดยจะป้องกันไม่ให้ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบเกิดขึ้นตรงกับความถี่ของฮาร์มอนิกในระบบ แต่การต่อแบบนี้ไม่ได้เป็นการกำจัดฮาร์มอนิกออกจากระบบแต่เป็นการป้องกันความเสียหายในระบบเท่านั้นส่วนฮาร์มอนิกก็ยังคงไหลออกสู่แหล่งจ่ายอยู่ วิธีการจัดฮาร์มอนิกอีกวิธีหนึ่ง คือการใช้วงจรกรองพาสซีฟแบบจุนดังแสดงในรูปที่ 1.1(ข) นำมาต่อขนานกับโหลดที่สร้างฮาร์มอนิกโดยจะกำจัดฮาร์มอนิกได้ที่ละหนึ่งอันดับต่อหนึ่งวงจรกรองพาสซีฟเท่านั้น และยังได้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ไม่ดีนัก เนื่องจากคุณสมบัติการกรองขึ้นกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและยังอาจเกิดปัญหาเรโซแนนซ์อีกด้วย ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีแก้ปัญหาร่วมกันแบบใหม่ คือการใช้วงจรกรองแยกที่ฟั้งแบบขนานหรือแบบอนุกรม วงจรกรองแยกที่ฟั้งจะมีคุณสมบัติการกรองที่ดีกว่าวงจรกรองแบบพาสซีฟโดยเฉพาะเมื่อใช้กับโหลดที่มีลักษณะเป็นแหล่งกระแส

แต่อย่างไรก็ตาม วงจรกรองแยกที่ฟั้งมีราคาค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับวงจรกรองพาสซีฟ จึงมีความพยายามที่จะลดขนาด kVA ของวงจรกรองแยกที่ฟั้งโดยการต่อวงจรกรองแยกที่ฟั้งร่วมกับวงจรกรองพาสซีฟเป็นวงจรกรองแยกที่ฟั้งแบบไฮบริด ซึ่งช่วยลดขนาด KVA ของวงจรกรองแยกที่ฟั้งเมื่อเทียบกับวงจรกรองแยกที่ฟั้งอย่างเดียว ตัวอย่างเช่น วงจรกรองแยกที่ฟั้งขนานวงจรกรองพาสซีฟ(สรุภคิพงษ์ โหมยิตเกษม, 2539) วงจรกรองพาสซีฟแบบดิจุนอนุกรมวงจรกรองแยกที่ฟั้ง(Subhashish Bhattacharya, 1997) โดยบทความวิจัยของ Subhashish Bhattacharya นี้ได้เสนอการตรวจจับกระแสทางด้านโหลดและใช้วิธีวงจรกรองผ่านด้าบนแกนหมุนในการตรวจจับหากระแสฮาร์มอนิกแล้วนำไปคำนวณแรงดันที่วงจรกรองแยกที่ฟั้งต้องสร้าง เพื่อให้วงจรกรองแยกที่ฟั้งทำตัวเป็นเสมือนตัวเหนี่ยวนำ แต่เนื่องจากวงจรกรองพาสซีฟแบบดิจุนอนุกรมกับแยกที่ฟั้งหนึ่งกึ่งจะกำจัดฮาร์มอนิกเพียงหนึ่งอันดับเท่านั้น ดังนั้นในการที่จะกำจัดฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นจึงต้องเพิ่มกึ่งวงจรกรองพาสซีฟอนุกรมกับวงจรกรองแยกที่ฟั้ง และการตรวจจับกระแสทางด้านโหลดแต่เพียง

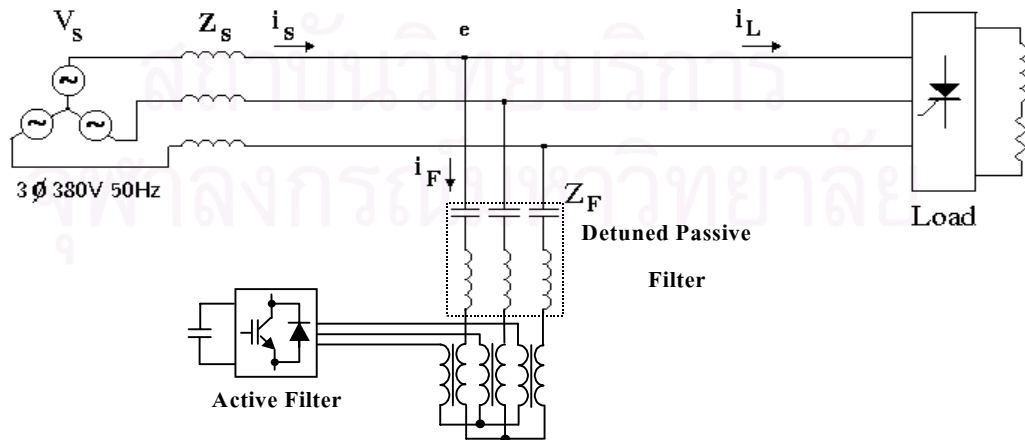
อย่างเดียวโดยไม่มีการตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายด้วยทำให้คุณสมบัติการกรองของระบบขึ้นกับคุณสมบัติของตัวตรวจจับกระแสที่ต้องมีความแม่นยำสูง



(ก) ระบบที่ใช้วงจรกรองกำลังแบบดีจูน



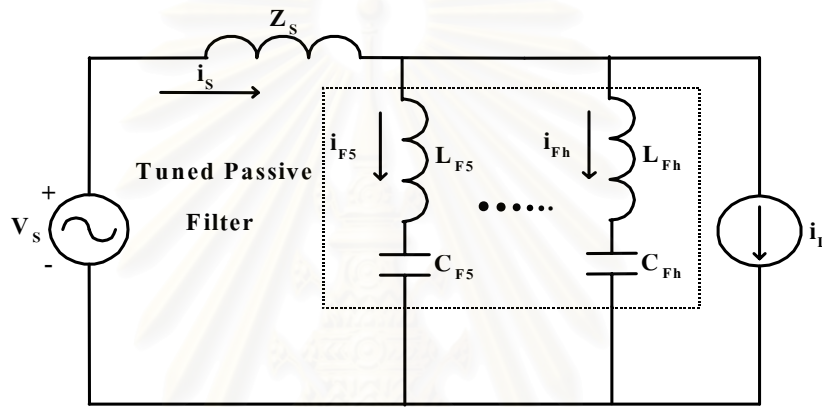
(ข) ระบบที่ใช้วงจรกรองกำลังแบบจูน



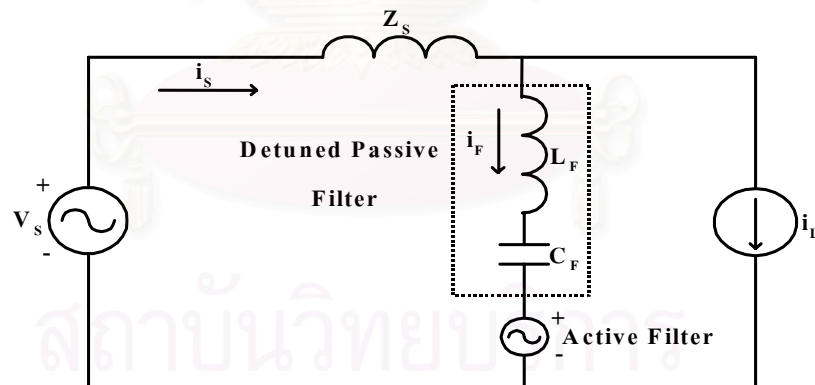
(ค) ระบบที่ใช้วงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนอนุกรมวงจรกรองแอกทีฟ

รูปที่ 1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้วงจรกรองในลักษณะต่างๆ

วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอระบบที่มีการคิดวงจรกรองพาสซีฟแบบดิจิตอลอนุกรม วงจรกรองแอกทีฟ ดังแสดงในรูปที่ 1.1(ค) ซึ่งจะประพจน์ตัวเสมือนวงจรกรองพาสซีฟแบบจูน หลายวงจรต่อขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.2(ก) และสามารถเขียนแสดงเป็นวงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ ดังรูปที่ 1.2(ข) เราจะตรวจจับทั้งกระแสด้านแหล่งจ่ายและกระแสที่ไหลผ่านวงจรกรองพาสซีฟ และจะใช้วิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟที(Recursive Discrete Fourier Transform ; RDFT)(สันต์ ศรีธรรมจักร, 2541) ในการกรองกระแสฮาร์มอนิกเพื่อนำไปสร้างแรงดันของวงจรกรองแอกทีฟ ควบคุมให้ วงจรกรองแอกทีฟทำตัวเป็นเสมือนตัวเหนี่ยวนำ โดยที่วงจรกรองแอกทีฟรวมกับวงจรกรองพาสซีฟหนึ่งกิ่งสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้มากกว่าหนึ่งอันดับในหนึ่งกิ่ง



(ก) วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองพาสซีฟแบบจูน(h คือ อันดับของฮาร์มอนิก)



(ข) วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองพาสซีฟแบบดิจิตอลอนุกรมวงจรกรองแอกทีฟ
รูปที่ 1.2 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรอง

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นจะเห็นได้ว่า การใช้วงจรกรองพาสซีฟแบบดิจิตอลอนุกรมกับวงจรกรองแอกทีฟจะมีข้อดีคือ

1. ขนาด kVA ของวงจรกรองแอกทีฟจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับวงจรกรองแอกทีฟเพียงลำพัง
2. ไม่มีผลของเรโซแนนซ์แบบขนานเมื่อมองจากทางด้านโหลด

3. มีคุณสมบัติป้องกันการเกิดเรโซแนนซ์ของวงจรรองพาสซีฟแบบคิจูรวมอยู่ด้วย ทั้งขณะมีวงจรรองแอกทีฟอยู่หรือไม่มีวงจรรองแอกทีฟอยู่ก็ตาม
4. สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้โดยไม่ต้องติดตั้งเหนี่ยวนำจริงๆเพิ่มในระบบ เพื่อที่จะกำจัดฮาร์มอนิก และสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้พร้อมกันหลายอันดับโดยใช้วงจรรองแอกทีฟเพียงตัวเดียวอนุกรมกับวงจรรองพาสซีฟแบบคิจู
5. วงจรรองแอกทีฟจะทำตัวเป็นแหล่งจ่ายแรงดันจึงสะดวกสำหรับการสร้างแรง-ดัน โดยอินเวอร์เตอร์
6. สะดวกต่อการใช้งานในทางปฏิบัติเนื่องจากต่ออนุกรมกับวงจรรองพาสซีฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาออกแบบและสร้างวงจรรองแอกทีฟผสมพาสซีฟแบบขนาน สำหรับลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่ำในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้วิธีตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟที

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

พัฒนาและสร้างต้นแบบของวงจรรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดที่มีการตรวจจับฮาร์มอนิกแบบ รีเคอร์ซีฟดีเอฟที สำหรับใช้กับระบบแรงดันสามเฟสสามสาย 380 โวลต์ และโหลดเป็น วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายกระแสด้านออกคงตัวมีขนาดเท่ากับ 2.5 kVA โดยวงจรรองแอกทีฟจะสามารถเลือกกำจัดฮาร์มอนิกอันดับต่ำกว่า 19 ได้ตามต้องการและจะต้องทำให้กระแสฮาร์มอนิกในระบบกำลังในอันดับที่ทำการกำจัดเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 1000-3-2 Class A ดังตารางที่ 1.1

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

1. ศึกษาคุณสมบัติของวงจรรองกำลังแบบพาสซีฟและแอกทีฟแบบต่างๆ
2. ศึกษาคุณสมบัติของวงจรรองกำลังแอกทีฟอนุกรมกับวงจรรองพาสซีฟและวิธีการควบคุมการทำงานของวงจรรองแอกทีฟ
3. ศึกษาคุณสมบัติการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีต่างๆ
4. ใช้คอมพิวเตอร์จำลองการทำงานของวงจรรองกำลังแอกทีฟอนุกรมกับวงจรพาสซีฟที่มีการตรวจจับฮาร์มอนิกโดยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟที เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การทำงาน โดยเฉพาะในด้านเสถียรภาพและผลตอบสภาวะชั่วครู่
5. สร้างต้นแบบวงจรรองกำลังแอกทีฟที่อนุกรมกับวงจรรองพาสซีฟแบบคิจูที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟที

6. ศึกษาและปรับปรุงฮาร์ดแวร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ
7. ทดสอบวงจรทั้งหมดและทดลองใช้งาน
8. ประเมินผลและเขียนวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 1.1 Table - Limits for Class A equipment

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
$15 < n < 39$	$0.15 \frac{15}{n}$
Even harmonics	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 < n < 40$	$0.23 \frac{8}{n}$

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีกว่าแบบวงจรรอกพาสซีฟหรือแอกทีฟเพียงอย่างเดียวเพื่อลดปัญหาที่เกิดเนื่องมาจากฮาร์มอนิก
2. สามารถนำวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ใช้วิธีการประมวลผลทางดิจิทัลมาใช้ในการกำจัดฮาร์มอนิก และสามารถเข้าใจถึงข้อดีข้อด้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วงจรรอกแบบอื่นๆ
3. สามารถพัฒนางจรรอกกำลังแอกทีฟที่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะบางอันดับได้
4. พัฒนาหลักการออกแบบเทคนิคการใช้งานของวงจรรอกแอกทีฟขนานแบบไฮบริด
5. ผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาสามารถที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้

บทที่ 2

ทฤษฎีการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงรายละเอียดของหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าในวิทยานิพนธ์นี้เราจะใช้วงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนอนุกรมวงจรกรองแอกทีฟในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยทำการตรวจจับกระแสสองจุดคือกระแสด้านแหล่งจ่ายและกระแสที่ไหลผ่านวงจรกรองพาสซีฟและใช้วิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก เพื่อให้วงจรกรองแอกทีฟประพฤติตัวเหมือนตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นในบทนี้เราจึงสามารถแบ่งเนื้อหาออกได้เป็น 4 ส่วนหลักได้แก่

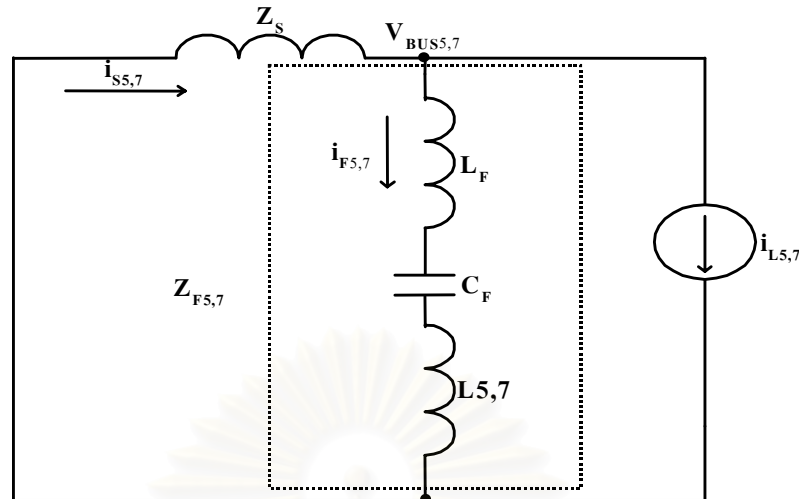
1. ทฤษฎีการทำงานและการคำนวณแรงดัน
2. การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก
3. ตำแหน่งการตรวจจับกระแส
4. วงจรควบคุมป้อนกลับ

2.1 ทฤษฎีการทำงานและการคำนวณแรงดันของวงจรกรองแอกทีฟ

หลักการทำงานพื้นฐานของวงจรกรองแอกทีฟอนุกรมวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนดังแสดงในรูปที่ 1.2(๗) คือเราจะควบคุมให้วงจรกรองแอกทีฟทำหน้าที่เหมือนตัวเหนี่ยวนำที่เมื่อคิดรวมกับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนแล้วจะทำตัวเสมือนเป็น วงจรกรองพาสซีฟแบบจูนที่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกที่ต้องการได้อย่างเป็นอุดมคติ และเนื่องจากเราสามารถกำหนดค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆแยกจากกันได้โดยอิสระ วงจรกรองที่นำเสนอจึงสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้มากกว่าหนึ่งอันดับ ในที่นี้เราจะทำการแสดงตัวอย่างการกำจัดฮาร์มอนิกจำนวนสองอันดับ(อันดับที่ 5 และ อันดับที่ 7) โดยจะตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกมา สร้างเป็นแรงดันคำสั่งของวงจรกรองแอกทีฟตามสมการที่ (2.1)

$$V_{AF}^* = L5 \frac{d}{dt} i_{L5}^* + L7 \frac{d}{dt} i_{L7}^* \quad (2.1)$$

$$\text{โดยที่ } i_{L5}^* = i_{S5} - i_{F5} \text{ และ } i_{L7}^* = i_{S7} - i_{F7} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลหนึ่งเฟส สำหรับฮาร์มอนิกอันดับที่ 5,7

จากสมการที่ (2.1) และรูปที่ 2.1 เมื่อเราพิจารณาวงจรเฉพาะที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 จะเห็นว่าวงจรกรองแอกทีฟจะทำตัวเหมือนตัวเหนี่ยวนำ โดยมีอิมพีแดนซ์รวมของวงจรกรองที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เป็นไปตามสมการที่ (2.3)

$$Z_{F5} = j\omega_5 L_F + \frac{1}{j\omega_5 C_F} + j\omega_5 L_5 \quad (2.3)$$

เราจะกำหนดให้ค่าความเหนี่ยวนำและค่าของตัวเก็บประจุของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนกับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองแอกทีฟเป็นไปตามสมการที่ (2.4)

$$\omega_5 = 5\omega = \frac{1}{\sqrt{(L_F + L_5)C_F}} \quad (2.4)$$

เพื่อที่จะทำให้วงจรกรองกลายเป็นวงจรกรองแบบจูนสำหรับฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

ในการทำงานเดียวกันเราจะได้อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 เป็นไปตามสมการที่ (2.5) และค่าความเหนี่ยวนำและค่าของตัวเก็บประจุของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนกับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองแอกทีฟจะกำหนดตามสมการที่ (2.6)

$$Z_{F7} = j\omega_7 L_F + \frac{1}{j\omega_7 C_F} + j\omega_7 L_7 \quad (2.5)$$

$$w_7 = 7w = \frac{1}{\sqrt{(L_F + L_7)C_F}} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.3) ถึงสมการที่ (2.6) เมื่อพิจารณาเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 ทำให้ได้แรงดันที่ไหลคเป็นไปตามสมการที่ (2.7) และกระแสที่แหล่งจ่ายเป็นไปตามสมการที่ (2.8)

$$V_{BUS5} = V_{BUS7} = 0 \quad (2.7)$$

$$i_{S5} = i_{S7} = 0 \quad (2.8)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 วงจรกรองไฮบริดจะทำหน้าที่เหมือนวงจรกรองพาสซีฟแบบจูน 2 ตัวต่อขนานกัน

นิยามสัญลักษณ์

V_{AF}^*	คือ แรงดันคำสั่งของวงจรกรองแอกทีฟ
V_{BUS5}, V_{BUS7}	คือ แรงดันที่โหนดของวงจรกรองพาสซีฟแบบจูนอนุกรมวงจรกรองแอกทีฟ
i_{S5}, i_{S7}	คือ กระแสด้านแหล่งจ่าย ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7
i_{F5}, i_{F7}	คือ กระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟแบบจูน ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7
Z_{F5}, Z_{F7}	คือ อิมพีแดนซ์ของกิ่งวงจรกรองพาสซีฟอนุกรมวงจรกรองแอกทีฟ ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7
w	คือ ความถี่หลักมูล
L_F	คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองพาสซีฟแบบจูน
C_F	คือ ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองพาสซีฟแบบจูน
$L5, L7$	คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองแอกทีฟ ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7

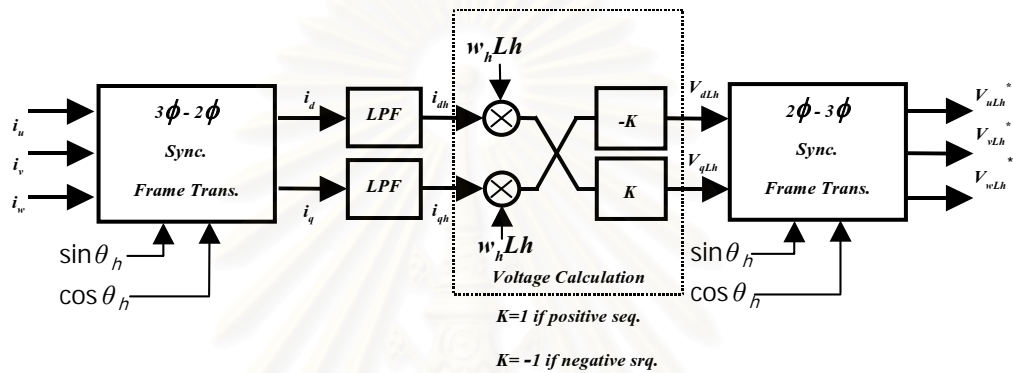
2.1.1 การคำนวณแรงดันบนแกนหมุน

การคำนวณค่าแรงดันตามสมการที่ (2.1) จะมีปัญหาทางปฏิบัติเพราะ จะต้องหาอนุพันธ์ของกระแส ซึ่งจะทำให้เกิดการรบกวนจากสัญญาณความถี่สูงได้ง่าย เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจะใช้ความสัมพันธ์ในสภาวะอยู่ตัวแทนคือ

$$V_{AF}^* = jw_5 L_5 i_{L5}^* + jw_7 L_7 i_{L7}^* \quad (2.9)$$

และในทางปฏิบัติจริงนั้นการคำนวณแรงดันจะกระทำบนแกนหมุนตามสมการที่ (2.10) แทนการทำบนแกนนิ่งในสมการที่ (2.9) ซึ่งแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังในรูปที่ 2.2 ทำให้เราสามารถสร้างแรงดันของวงจรกรองแอกทีฟได้ง่ายและถูกต้อง

$$V_{AF}^* = \begin{bmatrix} V_{dLh} \\ V_{qLh} \end{bmatrix} = w_h Lh \begin{bmatrix} 0 & -K \\ K & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการคำนวณแรงดัน

โดยที่ ตัวห้อย “d”, “q” หมายถึงองค์ประกอบบนแกน d, q ของแกนอ้างอิงหมุน

h หมายถึง อันดับของฮาร์โมนิก

i_u, i_v, i_w หมายถึง กระแสในสายของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส 3สาย

LPF หมายถึง low-pass filter

w_h หมายถึง ความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ h

Lh หมายถึง ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองแอกทีฟที่ฮาร์โมนิกอันดับที่ h

$V_{uLh}^*, V_{vLh}^*, V_{wLh}^*$ หมายถึง แรงดันเสมือนตัวเหนี่ยวนำ 3 เฟส

2.2 การตรวจจับกระแสฮาร์โมนิก

เนื่องจากสัญญาณกระแสรายคาบสามารถแตกออกเป็นผลรวมของกระแส องค์ประกอบความถี่มูลฐานกับกระแสองค์ประกอบฮาร์โมนิกอันดับต่างๆซึ่งมีความถี่เป็น จำนวนเท่า(อันดับ)ที่ลงตัวของความถี่มูลฐานซึ่งมีค่าได้ไปจนถึงอนันต์ ดังนั้นหลักการทำงาน พื้นฐานของ วงจรกรองแอกทีฟจะเริ่มต้นจากการตรวจจับกระแสในระบบเข้ามาและทำการ ตรวจแยกเอาสัญญาณฮาร์โมนิกที่ต้องการออกมา เพื่อนำไปใช้สร้างแรงดันและกระแสชดเชยไป หักล้างกับกระแสฮาร์โมนิกในองค์ประกอบนั้นๆ

ในกรณีที่ระบบเป็นแบบ 3 เฟส 3 สาย ซึ่งกระแส 3 เฟส ไม่เป็นอิสระต่อกัน เราอาจพิจารณาตรวจจับฮาร์มอนิกแยกกันทีละเฟสอย่างอิสระกันหรืออาจพิจารณาตรวจจับฮาร์มอนิกจากสเปซเวกเตอร์ 2 เฟส ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงภาพรวมของกระแส 3 เฟสก็ได้ กระแสในรูป สเปซเวกเตอร์นี้ก็สามารถแยกออกได้เป็นผลรวมขององค์ประกอบมูลฐานกับองค์ประกอบ ฮาร์มอนิกต่างๆ ได้เช่นกัน ดังแสดงตามสมการที่ (2.11)

$$\vec{i}(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} I_h \cdot e^{jh\omega t} \quad (2.11)$$

เมื่อ $\vec{i}(t)$ คือสเปซเวกเตอร์กระแส h คืออันดับของฮาร์มอนิก ω คือความถี่มูลฐาน Symmetrical Component ของกระแส 3 เฟสกับสเปซเวกเตอร์กระแสจะมีความสัมพันธ์กันคือ

- กระแสซีเคเวนซ์บวก เมื่อแปลงเป็นสเปซเวกเตอร์จะกลายเป็นเวกเตอร์ขนาดคงที่ หมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ของฮาร์มอนิกนั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับพจน์ $I_h \cdot e^{jh\omega t}$ เมื่อ h มีค่าเป็นบวกนั่นเอง
- กระแสซีเคเวนซ์ลบ เมื่อแปลงเป็นสเปซเวกเตอร์จะกลายเป็นเวกเตอร์ขนาดคงที่ หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ของฮาร์มอนิกนั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับพจน์ $I_h \cdot e^{jh\omega t}$ เมื่อ h มีค่าเป็นลบนั่นเอง
- กระแสซีเคเวนซ์ศูนย์ กรณีระบบ 3 เฟส 3 สายจะไม่มีกระแสซีเคเวนซ์นี้ ดังนั้นองค์ประกอบในสเปซเวกเตอร์ของกระแสก็จะไม่มีค่ากระแสนี้ด้วย

การมองกระแส 3 เฟสเป็นสเปซเวกเตอร์นี้ทำให้เราสามารถพัฒนาวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก แบบใหม่โดยมองจากสเปซเวกเตอร์ได้ เราสามารถตรวจจับ โดยแยกแยะทั้งความถี่และซีเคเวนซ์ ซึ่งมีประโยชน์ในการเลือกตรวจจับและกำจัดเฉพาะบางฮาร์มอนิกและบางซีเคเวนซ์ เมื่อระบบมีฮาร์มอนิกเฉพาะบางอันดับและบางซีเคเวนซ์ ตัวอย่างเช่น ระบบ 3 เฟส 3 สายสมดุล โดยทั่วไปซึ่งมีฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 5 ซีเคเวนซ์ลบ อันดับ 7 ซีเคเวนซ์บวก อันดับ 11 ซีเคเวนซ์ลบ อันดับ 13 ซีเคเวนซ์บวก เช่นนี้เรื้อยไป เราสามารถพัฒนาวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกแบบใหม่ได้จากมุมมองนี้ อาทิเช่นการตรวจจับเฉพาะฮาร์มอนิก อันดับ 5 ซีเคเวนซ์ลบและฮาร์มอนิกอันดับ 7 ซีเคเวนซ์บวกโดยใช้วงจรกรองผ่านแถบ (สรรคัธิพงษ์ โฆษิตเกษม,2539) และการทำ Recursive DFT (สันต์ ศรีอรรถธำรง,2541)

วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีเช่น วิธีการใช้ Fast Fourier Transform(FFT) วิธีการอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ (Instantaneous Reactive Power)

(H. Akagi, 1983) วิธีการหมุนแกนอ้างอิง วิธีการทำ Recursive DFT ฯลฯ ซึ่งเราสามารถสรุปย่อๆ ถึงหลักการของแต่ละวิธีได้ดังนี้

2.2.1 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด

โดยทั่วไปวิธีการนี้จะใช้ตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟส 3 สาย ซึ่งจะให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกถูกต้องเมื่อแหล่งจ่ายมีรูปคลื่นแรงดันเป็นไซน์และมีความสมดุล มิฉะนั้นจะเกิดความผิดพลาดได้ นอกจากนี้การตรวจจับฮาร์มอนิกวิธีนี้ยังเหมาะสมเฉพาะกับวงจรกรองแอกทีฟที่ซัดเซฮาร์มอนิกทุกอันดับ เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกที่คำนวณได้จะประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกทุกอันดับปนกันอยู่โดยไม่สามารถแยกตรวจจับเฉพาะอันดับที่ต้องการได้

ขั้นตอนในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก เริ่มแรกเราจะต้องแปลงกระแสและแรงดัน 3 เฟสบนแกน $u\ v\ w$ มาเป็นสเปซเวกเตอร์บนแกน $\alpha - \beta$ โดยใช้สมการที่ (2.12) และ (2.13) ตามลำดับ

$$\vec{i} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\vec{e} = \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

โดยที่ “ (\bullet) ” แสดงถึงปริมาณสเปซเวกเตอร์ $(\bullet)_\alpha$ และ $(\bullet)_\beta$ คือองค์ประกอบของสเปซเวกเตอร์บนแกน α และ β ตามลำดับ จากนั้นเราจะนำกระแสและแรงดันที่เป็นสเปซเวกเตอร์มาหาค่ากำลังขณะใดๆ (Instantaneous Power) โดยที่ p คือกำลังงานจริงขณะใดๆของระบบ 3 เฟสที่จ่ายจากแหล่งไปสู่โหลด มีค่าเท่ากับผลคูณสเกลล่า (Dot Product) ของ \vec{e} กับ \vec{i} ตามสมการที่ (2.14) ส่วน q คือกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ (Instantaneous Reactive Power) เป็นกำลังที่ถ่ายทอดกันเองระหว่างเฟสทั้ง 3 ของแหล่งจ่ายโดยไม่ทำให้เกิดกำลังสุทธิไปสู่โหลด มีค่าเท่ากับขนาดของผลคูณเวกเตอร์ (Cross Product) ของ \vec{e} กับ \vec{i} ตามสมการที่ (2.15)

$$p = \vec{e} \cdot \vec{i} \quad (2.14)$$

$$q = \|\vec{e} \times \vec{i}\| \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) เราสามารถแสดงค่ากำลังงานจริงขณะใดๆ p และค่ากำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ q ของระบบ 3 เฟสในของรูปเมทริกซ์ได้ ดังสมการที่ (2.16) หรือ สมการที่ (2.17)

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ i_\beta & -i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

สมการที่ (2.16) เหมาะสำหรับใช้กับแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วนสมการที่ (2.17) จะใช้กับแหล่งจ่ายกระแส จากสมการที่ (2.16) เมื่อดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ไม่เป็นศูนย์ เราสามารถคำนวณค่ากระแสจากค่ากำลังงานขณะใดๆ ได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & -e_\beta \\ e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

ค่ากำลังงานจริงขณะใดๆ p และค่ากำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ q มีองค์ประกอบทั้งที่เป็นไฟตรงและไฟสลับดังต่อไปนี้

- องค์ประกอบไฟตรง เกิดจากกระแสที่มีความถี่และซีแควนซ์ตรงกับแรงดัน ยกตัวอย่างเช่น กระแสความถี่มูลฐานซีแควนซ์บวกกับแรงดันความถี่มูลฐานซีแควนซ์บวกเหมือนกันหรือ กระแสฮาร์โมนิก 5 ซีแควนซ์ลบกับแรงดันฮาร์โมนิก 5 ซีแควนซ์ลบเป็นต้น
- องค์ประกอบไฟสลับ เกิดจากกระแสที่มีความถี่หรือซีแควนซ์ไม่ตรงกับแรงดัน

ดังนั้นในกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายสมดุลและไม่มีฮาร์โมนิก องค์ประกอบไฟตรงของ p และ q จะเกิดเฉพาะจากกระแสความถี่มูลฐานซีแควนซ์บวกเท่านั้น และองค์ประกอบไฟสลับของ p และ q (\tilde{p} , \tilde{q}) จะเกิดมาจากกระแสความถี่มูลฐานซีแควนซ์ลบ (ในกรณีที่โหลดสมดุล) หรือเกิดจากกระแสฮาร์โมนิกเท่านั้น ในกรณีหลังนี้เราสามารถตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกได้โดยกรองแยกเอาองค์ประกอบไฟสลับออกมาด้วยวงจรกรองผ่านสูงซึ่งเมื่อเรานำองค์ประกอบนี้ไปแปลงกลับเป็นกระแสโดยใช้สมการที่ (2.19) ก็จะได้กระแสฮาร์โมนิกในรูปของสเปซเวกเตอร์

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & -e_\beta \\ e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

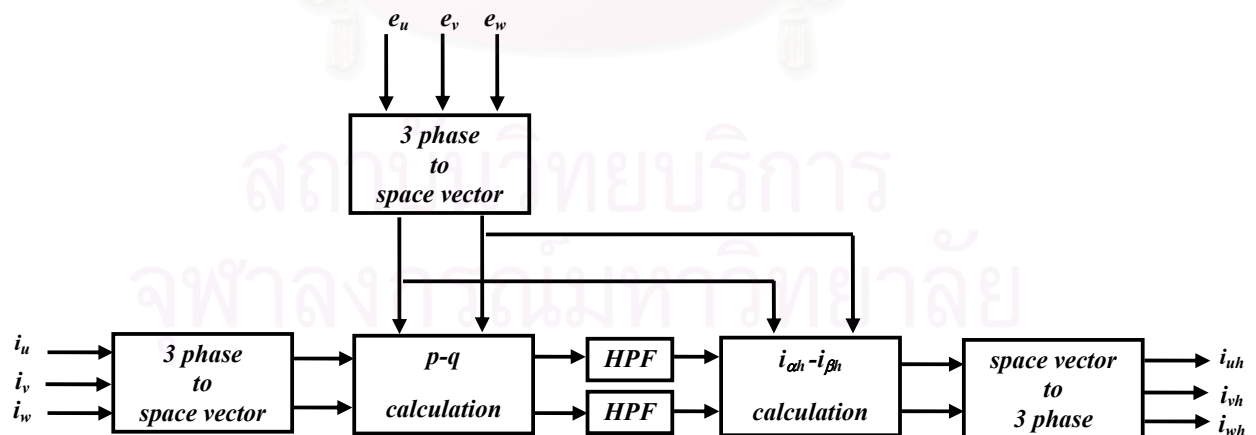
โดยที่ i_{ch} และ $i_{\beta h}$ คือองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกบนแกน α และ β ตามลำดับ ค่ากระแสฮาร์มอนิกในรูปสเปซเวกเตอร์สามารถนำไปแปลงกลับเป็นกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟสตามได้ ตามสมการที่ (2.20)

$$\begin{bmatrix} i_{uh} \\ i_{vh} \\ i_{wh} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ch} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

โดยที่ i_{uh} i_{vh} และ i_{wh} คือค่าของกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟสของเฟส u v และ w ตามลำดับ หลักการคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกตามวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ตามรูปที่ 2.3

ในกรณีที่โหลดมีความไม่สมดุล เราจะต้องมีหลักการเพิ่มเติมในการกำจัดกระแสความถี่มูลฐานซึ่งควรถูกแยกออกไปซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้ ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่าการตรวจจับกระแส ฮาร์มอนิกโดยวิธีนี้ยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายประการคือ

- แรงดันแหล่งจ่ายต้องมีความสมดุล
- เมื่อมีฮาร์มอนิกอันดับต่ำในระบบการกรองแยกเอาองค์ประกอบเหล่านี้ออกมาจากองค์ประกอบความถี่มูลฐานจะทำได้ยาก
- ไม่สามารถแยกตรวจจับเฉพาะบางฮาร์มอนิกได้



HPF = high-pass filter

รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ

2.2.2 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีวงจรถองบนแกนหมุน

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีการนี้เราสามารถที่จะตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับหรือตรวจจับเฉพาะอันดับที่ต้องการก็ได้

ก) การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้มีหลักการสำคัญคือต้องกรองเอาสัญญาณกระแสความถี่มูลฐานทิ้งไปและเก็บเอาไว้เฉพาะสัญญาณกระแสฮาร์มอนิก โดยจะเริ่มจากแปลงกระแส 3 เฟสไปเป็นสเปซเวกเตอร์ จากนั้นจะทำการแปลงกระแสสเปซเวกเตอร์บนแกน $\alpha - \beta$ ไปอยู่บนแกนหมุน d-q ขององค์ประกอบความถี่มูลฐานดังแสดงในรูปที่ 2.4 การแปลงเวกเตอร์กระแสไปอยู่บนแกนหมุน d-q ที่ความถี่ 50 Hz สามารถทำได้โดยการคูณเวกเตอร์กระแสด้วย $e^{-j\omega t}$ เมื่อ ω คือค่าความถี่มูลฐานเป็น rad/s เราสามารถเขียนสมการการแปลงให้อยู่ในรูปสมการเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.21)

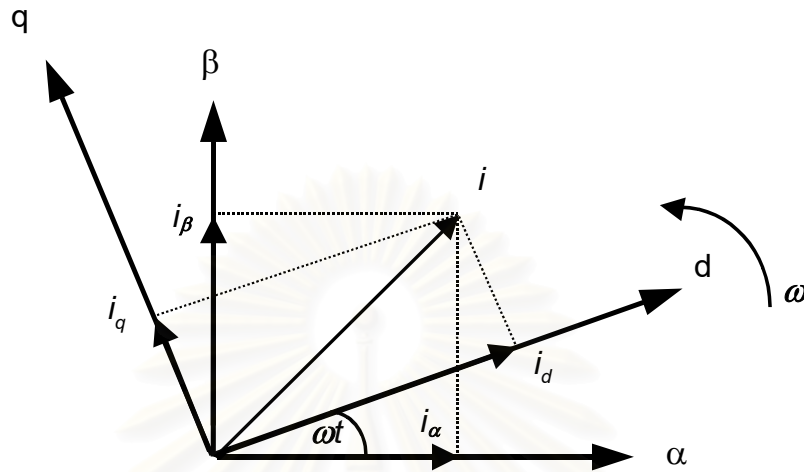
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

โดยที่ i_d และ i_q คือองค์ประกอบของกระแสบนแกนหมุน d และ q ขององค์ประกอบความถี่มูลฐานตามลำดับ บนแกนหมุน d-q กระแสความถี่มูลฐานอันดับบวกจะกลายมาเป็นสัญญาณกระแสตรง ส่วนกระแสฮาร์มอนิกอื่น ๆ จะกลายเป็นสัญญาณกระแสสลับ เราสามารถกรองแยกเอาเฉพาะสัญญาณกระแสสลับออกมาได้โดยใช้วงจรถองผ่านสูง จากนั้นจึงทำการแปลงกระแสบนแกน d-q กลับไปเป็นกระแสสเปซเวกเตอร์บนแกน $\alpha - \beta$ โดยการคูณด้วย $e^{j\omega t}$ ซึ่งสามารถแสดงในรูปเมทริกซ์ดังสมการที่ (2.22)

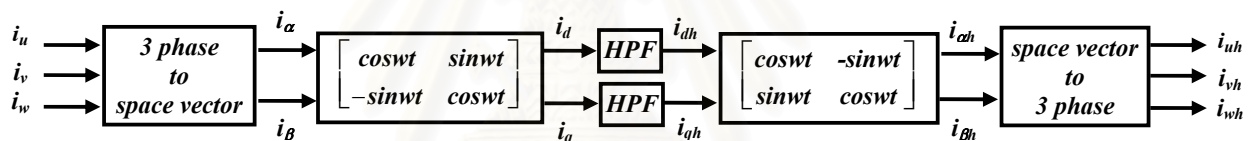
$$\begin{bmatrix} i_{ch} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

โดยที่ i_{dh} และ i_{qh} คือองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d และ q ขององค์ประกอบความถี่มูลฐานตามลำดับ จากกระแสฮาร์มอนิกในรูปสเปซเวกเตอร์เมื่อแปลงกลับมาเป็นกระแสในระบบ 3 เฟสก็จะได้กระแสฮาร์มอนิกตามต้องการ ในกรณีที่โหลดมีกระแสความถี่มูลฐานซีแวนซ์ลบบ่อยด้วยเราก็ต้องใช้หลักการนี้เพื่อกรองเอาสัญญาณกระแสความถี่มูลฐานอันดับลบทิ้งไปโดยจะใช้การแปลงไปอยู่บนแกนหมุนของกระแสความถี่มูลฐานอันดับลบแทนแล้วจึงกรองเอากระแสองค์ประกอบมูลฐานอันดับลบซึ่งจะเป็นกระแสตรงบนแกนหมุนทิ้งไป ขั้นตอนการตรวจจับ

กระแสฮาร์มอนิกในกรณีที่กระแสไม่มีองค์ประกอบความถี่มูลฐานอันดับลบแสดงโดยสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.5 (สรรคัทธิพงษ์ โหมยิตเกษม, 2539)



รูปที่ 2.4 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิงซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ 50 Hz



$$\omega = 100\pi \text{ rad/s.}$$

HPF = high-pass filter

รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับโดยใช้วิธีวงจรถอบบนแกนหมุน

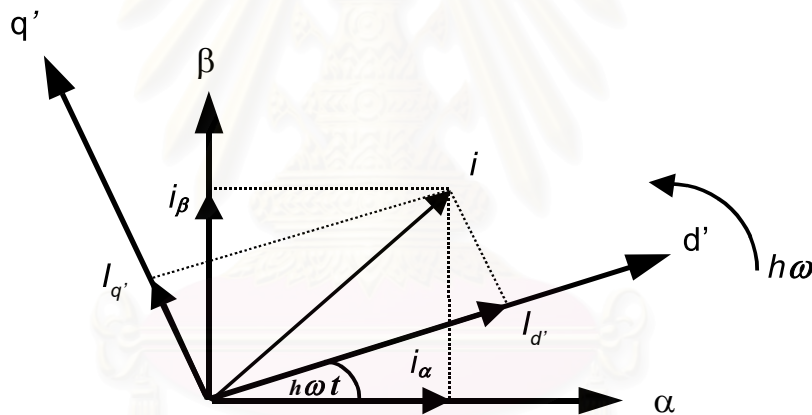
โดยวิธีการนี้จะเห็นได้ว่าเรายังคงสามารถตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องแม้ว่าแรงดันด้านแหล่งจ่ายจะมีฮาร์มอนิกหรือความไม่สมดุล อย่างไรก็ตาม หน้าที่ของระบบไฟฟ้าอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยเสมอ ดังนั้นการแปลงแกนให้ได้ความถี่ตรงกับความถี่มูลฐานของระบบจริงย่อมต้องมีความผิดพลาดเกิดขึ้นซึ่งการตรวจจับก็จะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้โดยมีค่าน้อยขึ้นอยู่กับความถี่ของความถี่ในการแปลงแกนและคุณลักษณะการกรองของวงจรกรองผ่านสูงที่ใช้ ยิ่งวงจรกรองผ่านสูงมีการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายและเฟสมากในย่านความถี่ต่ำ ความคลาดเคลื่อนเมื่อความถี่ผิดเพี้ยนก็จะมาก เราอาจต้องมีการทำเฟสล็อกเพื่อให้ได้ความถี่การแปลงแกนมีความถูกต้องมากขึ้น

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกนในกรณีที่ระบบมีฮาร์มอนิกอันดับต่ำปนอยู่ก็ยังคงมีปัญหาเช่นเดียวกับการใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆคือการกรองแยกกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่ำเหล่านั้นออกจากกระแสองค์ประกอบความถี่มูลฐานจะทำให้ยาก ในความเป็น

จริงแล้วการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆซึ่งใช้แรงดันเป็นตัว
 คูณในการหาค่า p และ q นั้นมีความคล้ายคลึงกับการแปลงแกนเพียงแต่ใช้สเปซเวกเตอร์ของแรง-
 ดันโดยตรงแทนที่จะใช้ $e^{j\omega t}$ ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดปัญหาความถี่การแปลงแกนไม่ตรงกับความถี่
 ระบบกำลังแต่ก็จะมีปัญหาอื่นแทนดังได้กล่าวมาแล้ว

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

ในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับกระทำได้โดยแปลงกระแสใน 3
 เฟสไปเป็นสเปซเวกเตอร์ จากนั้นเราจะแปลงสเปซเวกเตอร์ของกระแสไปอยู่บนแกนหมุนที่ความถี่
 ฮาร์มอนิกในอันดับและซีแควนซ์ที่ต้องการตรวจจับโดยการคูณด้วย $e^{-jh\omega t}$ เมื่อ h คืออันดับและ
 ซีแควนซ์ของฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับ (ยกตัวอย่างเช่น $h = -5$ หมายถึงฮาร์มอนิกที่ 5 ซีแควนซ์
 ลบ) และ ω คือค่าความถี่มูลฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยสมการการแปลงแกนหมุนที่อยู่ในรูป
 เมทริกซ์แสดงได้ดังสมการที่ (2.23)



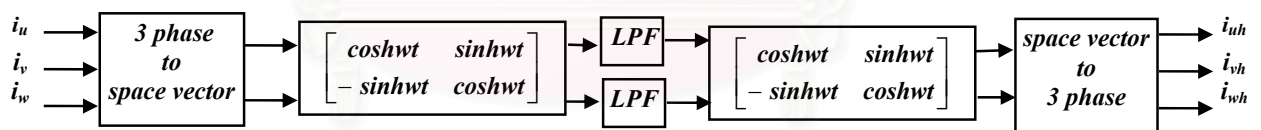
รูปที่ 2.6 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิง ซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ $h\omega$

$$\begin{bmatrix} i_{d'} \\ i_{q'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(h\omega t) & \sin(h\omega t) \\ -\sin(h\omega t) & \cos(h\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

โดยที่ $i_{d'}$ และ $i_{q'}$ คือองค์ประกอบของกระแสบนแกนหมุน d' และ q' ขององค์ประกอบความถี่
 ฮาร์มอนิกอันดับที่ h ตามลำดับ เมื่อทำการแปลงแกนแล้วกระแสฮาร์มอนิกที่มีอันดับและซีแควนซ์
 เดียวกับแกนหมุนจะกลายเป็นสัญญาณกระแสตรงซึ่งเราจะกรองเอาสัญญาณส่วนนี้เก็บเอาไว้โดย
 ใช้วงจรกรองผ่านต่ำ ส่วนกระแสฮาร์มอนิกอื่นๆรวมทั้งกระแสความถี่มูลฐานจะกลายเป็น
 องค์ประกอบกระแสสลับบนแกนหมุนนี้และจะถูกกรองทิ้งไป จากนั้นเราจึงทำการแปลงกระแส
 ฮาร์มอนิกที่กรองเก็บไว้ได้ในรูปกระแสตรงกลับมาอยู่บนแกนนิ่งโดยใช้สมการที่ (2.24)

$$\begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(h\omega t) & -\sin(h\omega t) \\ \sin(h\omega t) & \cos(h\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d'h} \\ i_{q'h} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

โดยที่ $i_{d'h}$ และ $i_{q'h}$ คือองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d' และ q' ขององค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ h ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการแปลงสเปซเวกเตอร์ของกระแสฮาร์มอนิกไปเป็นกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟสก็จะได้กระแสฮาร์มอนิกในอันดับและซีแควนซ์ที่ต้องการ หลักการคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกตามที่กล่าวมาสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.7 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก โดยวิธีนี้จะยังคงมีปัญหาในการกรองแยกเอาความถี่ฮาร์มอนิกที่อยู่ใกล้กันออกมาได้ยากเช่นเดียวกับวิธีการตรวจจับโดยใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆและวิธีการแปลงแกนหมุนแบบตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ แผนภาพโบทในรูปที่ 2.8 แสดงผลตอบเชิงความถี่ของตัวตรวจจับเป็นตัวอย่างกรณีตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ซีแควนซ์บวก โดยที่เราใช้วงจรกรองผ่านต่ำแบบอันดับ 1 เป็น $\frac{\omega_c}{s + \omega_c}$ เมื่อ ω_c คือความถี่หักมุมในรูปที่ 2.8ก) เราใช้ความถี่หักมุมค่าสูงซึ่งจะให้ผลตอบในสภาวะชั่วครู่ที่เร็วแต่การกรองทิ้งความถี่ที่อยู่ใกล้เคียงกับความถี่ที่จะตรวจจับและความถี่มูลฐานจะทำได้ไม่ดี ในขณะที่รูปที่ 2.8ข) เมื่อใช้ความถี่หักมุมค่าต่ำการกรองทิ้งความถี่ที่ไม่ต้องการจะทำได้ดีแต่อย่างไรก็ตามตัวตรวจจับจะมีผลตอบภาวะชั่วครู่ที่ช้า ดังนั้นจากปัญหาที่กล่าวมาเราสามารถสรุปได้ว่าการตรวจจับฮาร์มอนิกโดยวิธีการใช้วงจรกรองบนแกนหมุนจะไม่สามารถมีคุณลักษณะที่ดีในการกรองแยกกระแสความถี่ที่ต้องการออกจากกระแสความถี่อื่นๆพร้อมกันกับการมีผลตอบภาวะชั่วครู่ที่เร็วได้



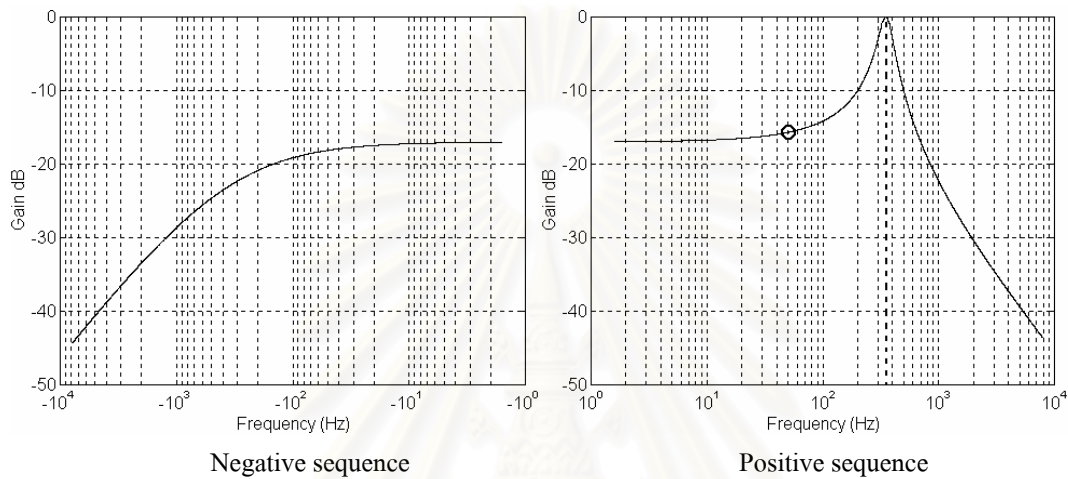
$\omega = 100\pi \text{ rad/s.}$
 $LPF = \text{low-pass filter}$
 $h = \text{harmonic order}$

รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h โดยใช้วงจรกรองบนแกนหมุน

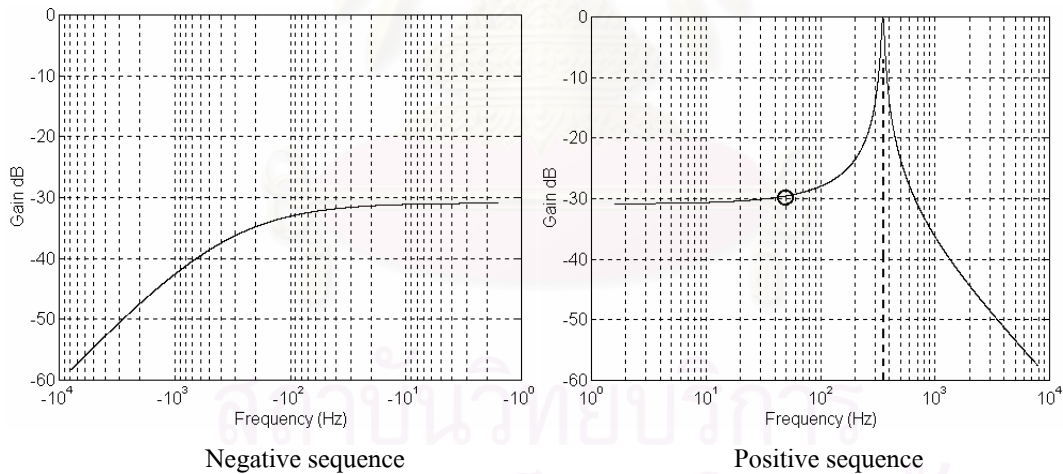
2.2.3 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีวิเคราะห์สเปกตรัม

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอาจทำได้โดยการนำกระแสมาวิเคราะห์หาสเปกตรัมโดยตรงด้วยการทำ DFT (Discrete Fourier Transform) ซึ่งนิยมใช้เทคนิคการคำนวณด้วยการทำ FFT (Fast Fourier Transform) (S. Bernard, 1996) หรืออาจใช้เทคนิคอื่นๆอย่างเช่น การคำนวณโดยใช้ Neural Network ผลลัพธ์ที่

ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมโดยทั่วไปจะได้เป็นขนาดและเฟสของกระแสฮาร์โมนิกที่ต้องการ เราจะนำข้อมูลขนาดและเฟสของกระแสฮาร์โมนิกนี้ไปสร้างเป็นกระแสจริงเพื่อใช้จ่ายเป็นกระแสชดเชย ในการสร้างกระแสชดเชยจะต้องมีการทำเฟสล็อกเพื่อทำให้กระแสที่สร้างได้มีความถี่ตรงกับระบบไฟฟ้ากำลังที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟต่ออยู่ด้วย รายละเอียดของการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกโดยวิธีนี้จะขอละไว้แต่จะขอกล่าวถึงคุณลักษณะที่สำคัญบางประการ



ก) $\omega_c = 100\pi$ rad/s



ข) $\omega_c = 20\pi$ rad/s

รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกด้วยวิธีวงจรบนแกนหมุนเมื่อตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ที่ความเร็วขั้ว

การวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยการทำ FFT มีข้อดี และข้อด้อยคือ

ข้อดี

- ให้ค่า Fourier Transform ของทุกสเปกตรัมอย่างแม่นยำ สามารถแยกแยะกระแสฮาร์โมนิกที่อยู่ใกล้กันได้ดี

ข้อด้อย

- มีการคำนวณที่มากและยุ่งยาก
- ผลลัพธ์จากการคำนวณที่ได้จะเป็นข้อมูลขนาดและเฟสของกระแสฮาร์โมนิกที่ต้องการกำจัดไม่ใช่สัญญาณกระแสโดยตรง จึงต้องมีการคำนวณสร้างสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกที่ต้องการจากข้อมูลเหล่านี้อีกหนึ่ง
- ลักษณะการคำนวณซับซ้อนยากต่อการวิเคราะห์
- มีผลตอบที่ค่อนข้างช้าคือประมาณ 2 คาบเวลาของความถี่มูลฐาน 50 Hz โดยใช้ 1 คาบแรกสำหรับเก็บข้อมูลและอีกประมาณ 1 คาบสำหรับการคำนวณและสร้างกระแสชดเชย

การวิเคราะห์สเปกตรัมโดยใช้ Neural Network มีคุณลักษณะคล้ายกับการทำ FFT เพียงแต่เปลี่ยนวิธีการคำนวณมาใช้การคำนวณด้วย Neural Network ที่ได้รับการฝึกสอนมาอย่างเหมาะสม ซึ่งสามารถให้ผลการคำนวณที่รวดเร็วกว่ากัน แต่ยังคงต้องรอเก็บข้อมูลกระแสให้ครบคาบก่อนจึงจะเริ่มทำการชดเชยได้เช่นเดียวกับวิธี FFT

จากข้อดีข้อเสียของวิธีการตรวจจับฮาร์โมนิกที่ได้กล่าวมา ในงานวิจัยนี้เราจะเลือกใช้วิธีการตรวจจับอีกวิธีหนึ่งซึ่งเรียกว่าวิธีการทำ Recursive Discrete Fourier Transform (Recursive DFT)(สันต์ ศรีธรรมธำรง, 2541) โดยที่ Recursive DFT มีคุณลักษณะที่ดีกว่าวิธีก่อนๆคือ

- ทำการคำนวณสเปกตรัมโดยเลือกทำเฉพาะบางความถี่
- มีการคำนวณที่ไม่มากและไม่ยุ่งยากซับซ้อน ถ้าเราทำการคำนวณค่าสเปกตรัมที่เฉพาะบางความถี่
- สามารถทำการคำนวณได้ในแบบ Real-Time คือ สามารถทำการคำนวณปรับค่า DFT ได้ทันภายใน 1 คาบการสุ่มค่าสัญญาณเข้ามาใหม่
- ตัวตรวจจับที่ได้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายเพื่อการวิเคราะห์ได้
- สามารถนำไปใช้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งแบบที่กำจัดฮาร์โมนิกทุกอันดับหรือเฉพาะบางอันดับก็ได้
- มีผลตอบสนองรวดเร็วและมีการปรับค่าสัญญาณขาออกทันทีที่มีการสุ่มข้อมูลกระแสเข้ามาใหม่ค่าที่ได้จากการทำ Recursive DFT จะเป็นสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกที่ต้องการโดยตรง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นคำสั่งกระแสชดเชยได้

แต่ข้อเสียของ Recursive DFT คือ มีลักษณะเฟสที่ไม่ดีที่ความถี่สูงจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับระบบที่มีลักษณะการทำงานแบบวงรอบเปิด การที่นำตัวตรวจจับแบบนี้มาใช้กับระบบวงรอบปิดจะทำให้เกิดปัญหาด้านเสถียรภาพ ซึ่งต้องทำการแก้ไข หลักการพื้นฐานของ Recursive DFT สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.2.4 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วย Recursive Discrete Fourier Transform

2.2.4.1 หลักการพื้นฐานของ DFT

สัญญาณรายคาบแบบเวลาไม่ต่อเนื่องสามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลรวมของพจน์ $e^{\frac{j2\pi h}{N}}$ โดยที่ $h = 0, 1, -1, 2, -2 \dots$ และ N คือจำนวนข้อมูลต่อคาบ ดังแสดงตามสมการ (2.25) ซึ่งก็คืออยู่ในรูปผลรวมขององค์ประกอบความถี่ต่างๆ นั่นเอง

$$i(k) = \sum_{h=0}^{N-1} I_h e^{\frac{j2\pi hk}{N}} \quad (2.25)$$

เมื่อ I_h คือค่า DFT ของฮาร์มอนิกอันดับที่ h และ $i(k)$ เป็นสัญญาณเข้ามีคาบเท่ากับ N

สเปซเวกเตอร์ของกระแสในระบบกำลัง 3 เฟสจะถูกสุ่มค่าเข้ามาและนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบที่ความถี่ต่างๆได้ด้วยวิธีการทำ DFT เราสามารถคำนวณ DFT ของสัญญาณรายคาบแบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังสมการ (2.26)

$$I_h = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(k) \cdot W^{-hk} \quad (2.26)$$

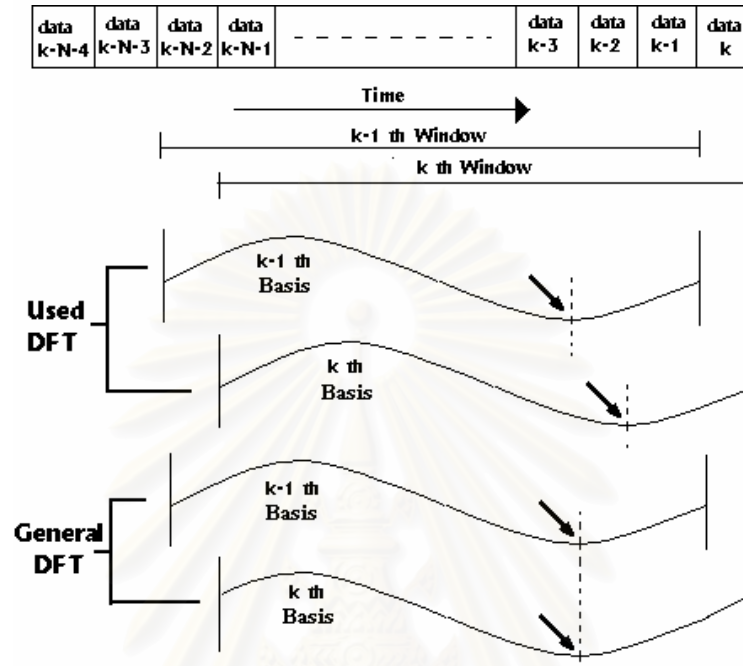
เมื่อ $W = e^{\frac{j2\pi}{N}}$

ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ตรวจจับเข้ามาอย่างต่อเนื่องเราจะต้องทำการเลื่อนกรอบข้อมูล (Sliding Window) N จุดไปตามเวลาเพื่อนำข้อมูล ณ จุดเวลาใหม่มาใช้ เราสามารถหาค่า DFT ณ จุดเวลาที่ k ได้ดังสมการ (2.27) คือ

$$I_h(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(k-n) \cdot W^{hn} \quad (2.27)$$

การทำ DFT ในลักษณะนี้เราเรียกว่า Running DFT ซึ่งจะวิเคราะห์ข้อมูลตั้งแต่จุดที่ $k-N+1$ จนถึงจุดปัจจุบันคือ k โดยเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่เลื่อนไปกับกรอบข้อมูล (Sliding Basis) ค่า $I_h(k)$ ที่

ได้จะต่างกับค่า I_h ที่ได้จากสมการที่ (2.26) ซึ่งใช้สัญญาณอ้างอิงที่ไม่เลื่อนไปกับกรอบ ข้อมูล เมื่อเทียบสัญญาณอ้างอิงทั้งสองกรณีจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะของสัญญาณอ้างอิงสำหรับการทำ DFT แบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงแบบที่ใช้ในการทำ DFT ทั่วไป

2.2.4.2 Recursive Discrete Fourier Transform (Recursive DFT)

การทำ Running DFT แบบ Sliding Basis ตามสมการที่ (2.27) นั้นเราสามารถจัดการคำนวณให้อยู่ในรูปสมการ Recursive ได้ดังสมการที่ (2.28) (R. Hartley, 1990)

$$I_h(k) = W^h I_h(k-1) + \frac{1}{N} (i(k) - i(k-N)) \quad (2.28)$$

ในสมการที่ (2.28) ค่า DFT ณ จุดเวลาปัจจุบัน ($I_h(k)$) สามารถหาค่าได้จากค่า DFT เก่าเมื่อจุดเวลาที่แล้ว ($I_h(k-1)$) คูณด้วย W^h และปรับค่าใหม่ด้วยเทอม $\frac{1}{N}$ คูณกับผลต่างของสัญญาณที่สุ่มค่าเข้ามาใหม่ ($i(k)$) กับสัญญาณเมื่อคาบเวลาที่แล้ว ($i(k-N)$) ในกรณีที่กระแสนอยู่ใในสถานะอยู่ตัวและมีคาบพอดีเท่ากับ N ค่าผลต่าง ($i(k) - i(k-N)$) จะมีเป็นศูนย์ตลอด ค่า DFT ณ จุดเวลาใหม่จะสามารถหาได้โดยใช้ค่า DFT เก่าแต่เพียงอย่างเดียว ถ้ามองในเชิง Fourier Transform ในความหมายทั่วไปก็คือจะได้ขนาดและเฟสขององค์ประกอบที่ต้องการมีค่าคงที่ แต่ในที่นี้ขนาดของ DFT

ที่ได้จะมีค่าคงที่แต่จะมีเฟสที่เปลี่ยนไปกับเวลาเรื่อยๆตามการคูณเข้ามาด้วย W^h ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1 สัญญาณขาออกที่ได้จะเป็นกระแสร่วมอนิกอันดับที่ h พอดี

ในการคำนวณ Recursive DFT นั้นเราจะเห็นได้ว่าในแต่ละครั้งที่มีการสุ่มค่ากระแสมา การหาค่า DFT ใหม่ของแต่ละซาร์มอนิกมีการคำนวณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้การคำนวณหาค่า DFT ของแต่ละซาร์มอนิกจะเป็นอิสระต่อกันเราจึงสามารถเลือกที่จะคำนวณหากระแสร่วมอนิกเฉพาะบางอันดับที่ต้องการได้ ถ้าเราทำการคำนวณหากระแสร่วมอนิกบางอันดับการคำนวณที่ต้องทำจะน้อยมากเมื่อเทียบกับการทำ FFT ทำให้สามารถที่จะคำนวณได้เสร็จภายในหนึ่งคาบการสุ่ม ตัวตรวจจับที่ได้จะมีลักษณะ Real-Time ซึ่งต่างจากวิธีการทำ FFT ที่ให้ค่ากระแสร่วมอนิกแต่ไม่สามารถคำนวณได้ในแบบ Real-Time เนื่องจากมีปริมาณการคำนวณมากในการปรับค่าสเปกตรัมในแต่ละครั้ง สมการที่ (2.28) เมื่อทำการแปลง z จะได้เป็นสมการที่ (2.29)

$$I_h(z) = z^{-1}W^h I_h(z) + \frac{1}{N}(i(z) - z^{-N}i(z)) \quad (2.29)$$

สมการที่ (2.29) สามารถที่จะจัดรูปเพื่อหาฟังก์ชันโอนย้ายเชิงเส้นใน z -Domain จาก $i(z)$ ไปยัง $I_h(z)$ ได้ดังสมการที่ (2.30)

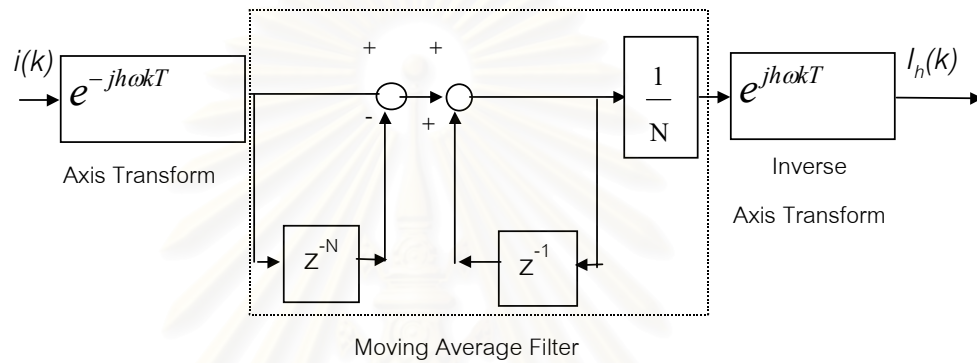
$$D_h(z) = \frac{I_h(z)}{i(z)} = \frac{1}{N} \frac{1 - z^{-N}}{1 - W^h z^{-1}} \quad (2.30)$$

2.2.4.3 การคำนวณ Recursive DFT บนแกนหมุน

เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์ในการคำนวณ Recursive DFT บนแกนนิ่ง เราจะเปลี่ยนวิธีการคำนวณ Recursive DFT จากการคำนวณบนแกนนิ่งไปทำบนแกนหมุนที่มีความถี่และทิศทางการหมุน(เมื่อเทียบกับแกนนิ่ง)เท่ากับความถี่และทิศทางการหมุนของสเปซเวกเตอร์ของกระแสร่วมอนิกที่จะทำการตรวจจับ ($h\omega$) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยวิธีการนี้สัญญาณสเปซเวกเตอร์ของกระแสจะถูกแปลงให้ไปอยู่บนแกนหมุน ($h\omega$) จากนั้นจึงนำไปทำการคำนวณตามฟังก์ชันโอนย้ายซึ่งได้จากการแปลงฟังก์ชันโอนย้ายบนแกนนิ่งของการทำ Recursive DFT มาอยู่บนแกนหมุน โดยใช้หลักการแปลงดังนี้คือ ฟังก์ชันโอนย้ายใน z -Domain บนแกนนิ่ง $P(z)$ เมื่อแปลงมาอยู่บนแกนหมุนที่มีความถี่ ($h\omega$) จะกลายมาเป็นฟังก์ชัน $P(W^{-h}z)$ ดังนั้นเราจะได้ฟังก์ชันโอนย้ายของการทำ Recursive DFT บนแกนหมุน $D'_h(z)$ ซึ่งแปลงมาจาก $D_h(z)$ มีค่าดังสมการที่ (2.31)

$$D'_h(z) = \frac{1}{N} \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}} \quad (2.31)$$

จากรูปสมการของ $D'_h(z)$ เราอาจพิจารณาได้ว่าการคำนวณ Recursive DFT บนแกนหมุนก็คือการคำนวณ Moving Average แบบ Recursive นั่นเอง ด้วยวิธีการแปลงแกนหมุนนี้เราจะพบว่า ขั้ว $1 - W^h z^{-1}$ ได้ถูกแปลงให้กลายเป็น $1 - z^{-1}$ ซึ่งเราสามารถที่จะคำนวณได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยไม่มีปัญหาเรื่องความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมแสดงการคำนวณ Recursive DFT แบบเต็มคาบบนแกนหมุน

รูปที่ 2.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการคำนวณ Recursive DFT บนแกนหมุน จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าโครงสร้างของตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่ใช้ Recursive DFT ในลักษณะนี้จะคล้ายคลึงกันกับการตรวจจับฮาร์มอนิกโดยใช้วงจรรองผ่านต่ำบนแกนหมุน โดยจะมีความแตกต่างตรงที่การทำ Recursive DFT จะใช้ Moving Average ในขณะที่วิธีวงจรรองบนแกนหมุนทั่วไปเราจะใช้วงจรรองผ่านต่ำธรรมดานั่นเอง

2.2.5 การชดเชยผลของเวลาประวิงอันเนื่องมาจากการคำนวณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

2.2.5.1 หลักการในการชดเชย

ในทางปฏิบัติจริงนั้นการควบคุมการทำงานวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องใช้ช่วงเวลาระยะหนึ่งในการคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิก การควบคุมบัสไฟตรง ฯลฯ ดังนั้นเราต้องกำหนดคาบเวลาการควบคุมหรือคาบเวลาการสุ่มตัวอย่างให้ยาวเพียงพอที่จะทำให้เราสามารถทำการคำนวณต่างๆได้เสร็จสิ้นภายในหนึ่งคาบการสุ่มนี้ โดยปรกติเรานิยามกำหนดความยาวของคาบการสุ่มให้มากกว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณเล็กน้อยเพื่อให้ได้ความเร็วการสุ่มที่สูงที่สุดซึ่งจะทำให้ได้ความละเอียดของข้อมูลสูง ดังนั้นโดยทั่วไปเวลาประวิงที่เกิดจากการคำนวณของไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีค่าประมาณ 1 คาบการสุ่ม ผลของเวลาประวิงนี้จะทำให้ข้อมูลกระแสฮาร์

มอดูลที่ได้จากการคำนวณมีค่าแล้วค่าจริงและทำให้การกำจัดกระแสมอดูล ค่อยประสิทธิภาพลง
อย่างไรก็ตาม การตรวจจับกระแสมอดูลโดยใช้ Recursive DFT นั้นเราสามารถหาคะเอียด
ของเวลาประวิงในส่วนนี้ได้ดังที่จะได้อธิบายต่อไปนี้

การทำ DFT แบบ Sliding Window จะสามารถหาคะเอียดของเวลาประวิงได้
โดยใช้การคำนวณตามสมการที่ (2.32) คือ

$$\begin{aligned} I_h(k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(k-n) \cdot W^{h(n+1)} \\ &= I_h W^{h(k+1)} \\ &= i_h(k+1) \end{aligned} \quad (2.32)$$

เมื่อ $i_h(k)$ คือค่าของกระแสมอดูลอันดับที่ h ณ เวลาปัจจุบัน k

ค่าที่ได้จากการทำ DFT ในลักษณะนี้แตกต่างจากการทำ DFT แบบเดิมตรงที่ค่า
มุมเฟสของฮาร์โมนิกอันดับที่ h ที่ได้จะมีการเลื่อนเฟสไปเท่ากับค่ามุมเฟสของกระแสมอดูล ที่
เปลี่ยนแปลงใน 1 คาบการสุ่มซึ่งสามารถตีความได้ว่าเป็นการคาดคะเน (Prediction) ค่ากระแสมอดูล
ที่ได้อันเวลาปัจจุบันไปอีก 1 คาบการสุ่ม สมการ (2.32) สามารถคำนวณในลักษณะ
Recursive ได้โดยใช้สมการที่ (2.33)

$$I_h(k) = W^h I_{ch}(k-1) + \frac{W^h}{N} (i(k) - i(k-N)) \quad (2.33)$$

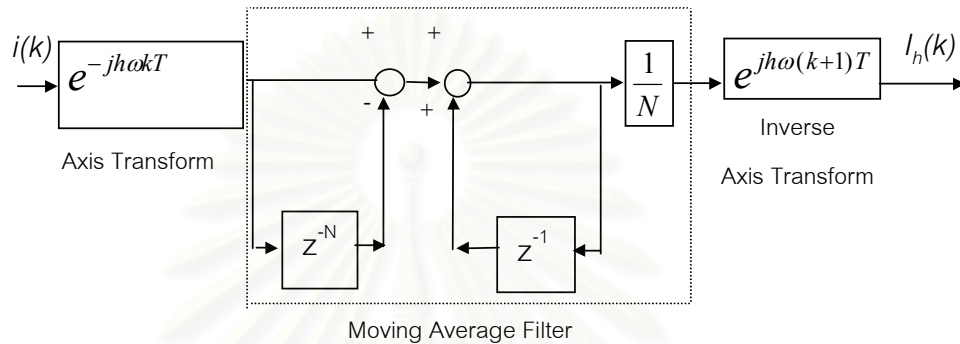
เราสามารถทำการแปลง Z แก่สมการที่ (2.33) และหาฟังก์ชันโอนย้ายใน z -
Domain $D_{ch}(z)$ จาก $i(z)$ ไปยัง $I_h(z)$ ได้ดังสมการที่ (2.34)

$$D_{ch}(z) = \frac{W^h}{N} \frac{1-z^{-N}}{1-W^h z^{-1}} \quad (2.34)$$

2.2.5.2 การคำนวณ Recursive DFT ที่มีการหาคะเอียดของเวลาประวิงบนแกนหมุน

ฟังก์ชันโอนย้าย $D_{ch}(z)$ ในสมการที่ (2.34) นั้นจะมีความแตกต่างจากฟังก์ชันโอนย้าย
ในการทำ Recursive DFT ธรรมดาตรงที่มีการคูณด้วยค่าคงตัว W^h เพิ่มขึ้นมาเท่านั้น เราสามารถทำการ
คูณนี้ได้โดยง่ายเมื่อเราคำนวณ Recursive DFT บนแกนหมุนโดยเพียงเพิ่มค่าดัชนีเวลาจาก k เป็น $k+1$
ในการแปลงกลับจากแกนหมุนไปแกนนิ่งเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11

จากหลักการชดเชยผลของเวลาประวิงเราจะเห็นได้ว่า เราต้องทำการเลื่อนมุมเฟสเท่ากับ ωhT ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันสำหรับกระแสร่มอนิกแต่ละความถี่ที่ต้องการหา ดังนั้นในกรณีที่เราจะจับกระแสร่มอนิกทุกอันดับเราจะไม่สามารถชดเชยผลของเวลาประวิงโดยใช้หลักการนี้ได้ ทั้งนี้เนื่องจากว่าถึงแม้เราจะสามารถคาดคะเนค่าของกระแสในส่วนองค์ประกอบมูลฐานได้แต่เราไม่สามารถคาดคะเนค่าของกระแสไหลตได้นั่นเอง



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมแสดงการคำนวณ Recursive DFT แบบเติมคาบบนแกนหมุนเมื่อชดเชยผลของเวลาประวิง

2.3 ตำแหน่งการตรวจจับกระแส

ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาดำเนินการตรวจจับกระแสเพื่อสร้างแรงดันของวงจรกรองแอกทีฟ โดยจะวิเคราะห์ผลของค่าความผิดพลาดของอัตราขยายของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสที่มีต่อลักษณะสมบัติการกรองของวงจรกรองแอกทีฟ ตำแหน่งในการตรวจจับกระแสร่มอนิกมีทั้งหมด 3 ตำแหน่ง

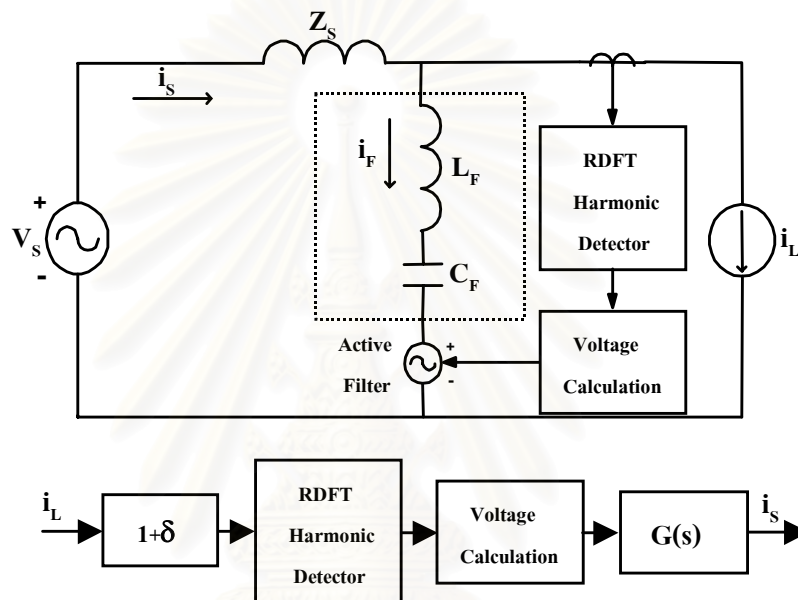
1. ตรวจจับกระแสด้านไหลต
2. ตรวจจับกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟ
3. ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย

โดยทั่วไปคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสที่ตำแหน่งต่างๆเป็นดังนี้คือ

อุปกรณ์ตรวจจับกระแสทางด้านไหลตและด้านแหล่งจ่ายจะมีปัญหาของความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงเพราะต้องทำการวัดผ่าน CT ที่ติดตั้งอยู่ในระบบ ในขณะที่การตรวจจับกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟเป็นการตรวจจับกระแสภายในวงจรกรองแอกทีฟเอง เราจึงสามารถเลือกอุปกรณ์ตรวจจับกระแสที่มีคุณภาพสูงได้จึงไม่มีปัญหาของค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ตรวจจับกระแส

2.3.1 วิธีตรวจจับกระแสทางด้านไหลต

ในกรณีนี้เราจะตรวจจับสนะทางด้านโพลตามาคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกของโพลและนำไปคำนวณแรงดันของวงจรกรองแอกทีฟดังแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อพิจารณาจากบล็อกไดอะแกรมจะพบว่าระบบจะทำงานในลักษณะเป็นวงรอบเปิด ดังนั้นจะไม่มีปัญหาด้านเสถียรภาพ การตรวจจับสนะแบบนี้มี ข้อดีคือ ง่ายไม่ซับซ้อนและให้คุณสมบัติการกรองที่ดีในกรณีที่การตรวจจับสนะมีลักษณะเป็นออคมคิต แต่ในทางปฏิบัติแล้วเราจะไม่สามารถกำจัดฮาร์โมนิกได้หมดเนื่องจากความไม่เป็นออคมคิตของอุปกรณ์ตรวจจับสนะ



$$G(s) = \frac{C_F s}{C_F (L_S + L_F) s^2 + C_F R_s + 1}$$

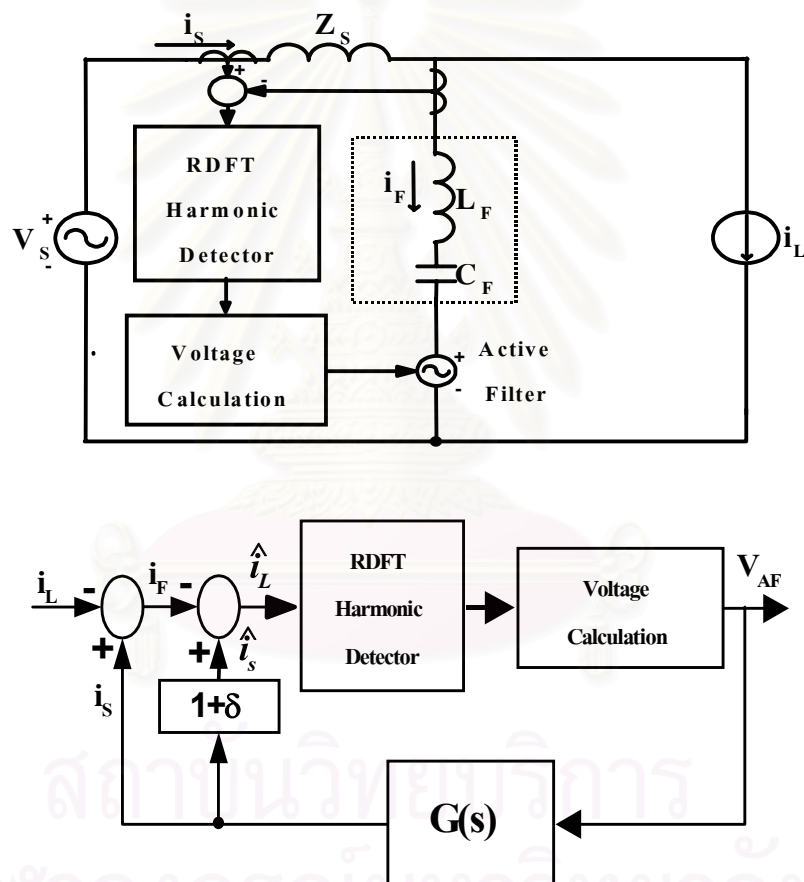
δ : ค่าความผิดพลาดของอัตราขยายของอุปกรณ์ตรวจจับสนะ

รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสและบล็อกไดอะแกรมในกรณีตรวจจับสนะทางด้านโพล

2.3.2 วิธีตรวจจับสนะทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟ

จากที่กล่าวมาแล้วว่าการตรวจจับสนะทางด้านโพลโดยตรงมีข้อเสีย คือถ้าอุปกรณ์ตรวจจับสนะมีความผิดพลาดจะทำให้กำจัดฮาร์โมนิกไม่หมด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอการตรวจจับสนะสองจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.13 การตรวจจับสนะในกรณีนี้เราจะตรวจจับสนะทั้งทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟมาลบกัน เพื่อคำนวณหาค่ากระแสทางด้านโพลแทนการตรวจจับสนะทางด้านโพลโดยตรง ข้อดีของการตรวจจับสนะลักษณะนี้คือ ความไม่เป็นออคมคิตของอุปกรณ์ตรวจจับสนะทางด้านแหล่งจ่ายจะไม่มีผลต่อคุณสมบัติการกำจัดฮาร์โมนิก เนื่องจากในสถานะอยู่ตัวกระแสฮาร์โมนิกทางด้านแหล่งจ่ายจะเป็นศูนย์ถึงแม้อัตราขยายจะผิดพลาดก็ไม่มีผลต่อการ

ตรวจจับ ดังนั้นการเลือกอุปกรณ์ตรวจจับกระแสก็ไม่จำเป็นต้องมีความแม่นยำสูง ส่วนอุปกรณ์ตรวจจับกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟซึ่งจะติดตั้งอยู่ภายในวงจรกรองแอกทีฟอยู่แล้ว ก็จะเลือกแบบที่มีความแม่นยำสูงได้ การตรวจจับแบบนี้ก็จะไม่มีปัญหากรณีโหลดหลายตัวด้วย แต่จากบล็อกไดอะแกรมของรูปที่ 2.13 ที่คำนึงถึงค่าความผิดพลาดของอัตราขยายของกระแสทางด้านแหล่งจ่าย จะเห็นว่าในกรณีที่อุปกรณ์ตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายไม่มีค่าความผิดพลาดของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายแล้ว ระบบก็จะทำงานเหมือนกับการตรวจจับกระแสทางด้านโหลด คือระบบจะทำงานในลักษณะวงรอบเปิด แต่เมื่อมีค่าความผิดพลาดของอัตราขยายกระแสทางด้านแหล่งจ่ายระบบจะทำงานในลักษณะวงรอบปิด ดังนั้นเราจึงต้องคำนึงถึงผลของเสถียรภาพของระบบด้วย

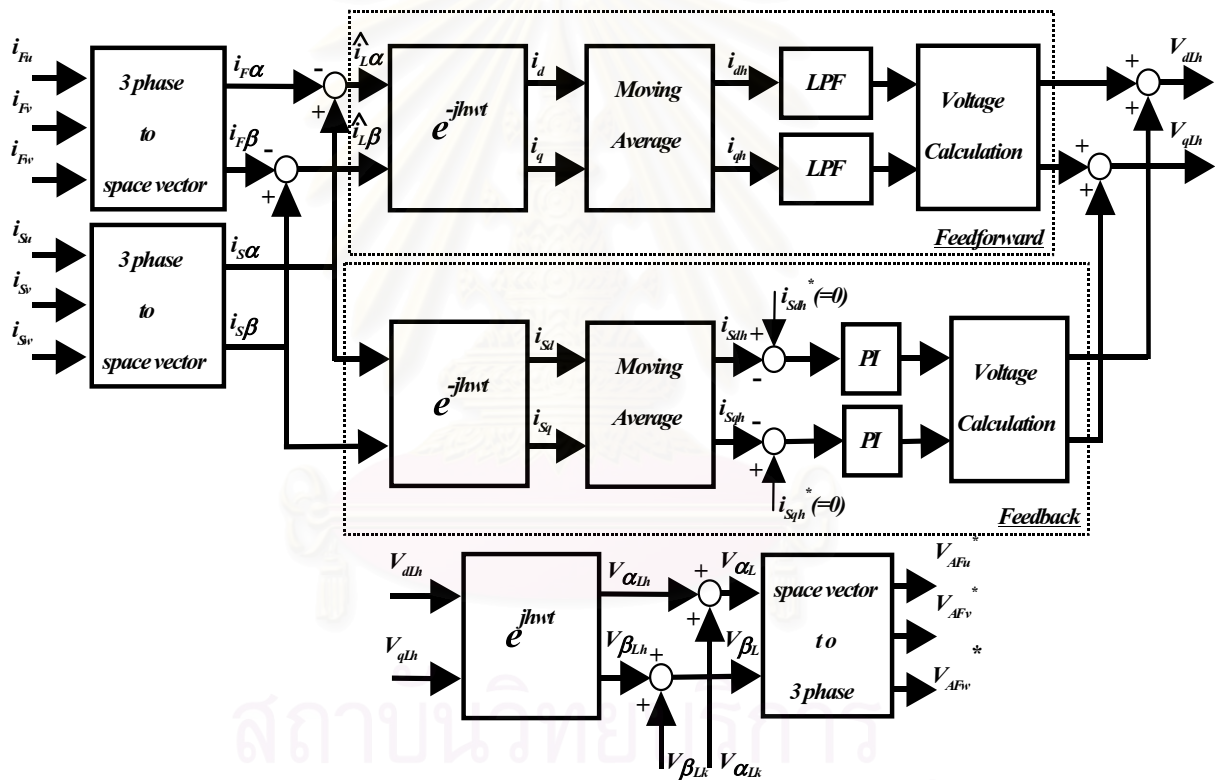


รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสและบล็อกไดอะแกรมในกรณีตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟ

2.4 วงจรควบคุม

ในส่วนควบคุมการทำงานของวงจรกรองแอกทีฟ เราจะตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟมาลบกัน แทนการตรวจจับกระแสทางด้านโหลดโดยตรง

ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อก่อน แล้วนำไปผ่านตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก(Moving Average Filter) เพื่อไปคำนวณหาแรงดันที่วงจรกรองแอกทีฟที่ควรสร้างตามสมการที่ (2.1) อย่างไรก็ตาม การคำนวณในลักษณะป้อนไปหน้านี้จะต้องอาศัยค่า L_F และ C_F ที่ถูกต้อง ถ้าค่าเหล่านี้ผิดพลาดจากค่าจริง จากสมการที่ (2.1) ก็จะทำให้เราคำนวณค่า $L5$ และ $L7$ คลาดเคลื่อนด้วยเป็นผลให้ไม่สามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกให้ เป็นศูนย์ได้ ดังนั้นเราจึงต้องเพิ่มส่วนป้อนกลับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายด้วยตัวควบคุม PI เข้ามาเป็นส่วนคำนวณแรงดันป้อนกลับซึ่งจะทำให้สามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายให้เป็น ศูนย์ได้ บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมทั้งหมด แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 โดยจะเห็นว่ามีส่วนของวงจรกรองผ่านต่ำต่อเพิ่มเข้ามาหลังจากวงจรกรอง Moving Average วงจรกรองผ่านต่ำนี้มีไว้เพื่อแก้ปัญหาละเอียดภาพ ซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดในบทต่อไป



$$\omega = 100\pi \text{ rad/s.}$$

h = อันดับและซีแควนซ์ของฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับ

k = อันดับและซีแควนซ์ของฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับอื่นๆ ที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิก
อันดับที่ h

LPF = low-pass filter

รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ

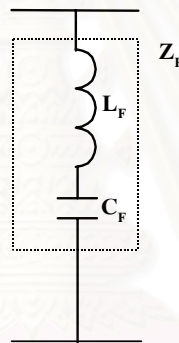
บทที่ 3

เสถียรภาพและการออกแบบวงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริด

ในบทนี้เรานำเอาทฤษฎีและหลักการที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 มาใช้ในการออกแบบระบบวงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดที่ใช้รีเคอร์ซีฟดีเอฟที ดังนั้นการออกแบบจะแยกพิจารณาเป็นสองส่วนหลักได้แก่ส่วนของวงจรกรองพาสซีฟและส่วนของวงจรกรองแอกทีฟ

3.1 การออกแบบวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูน

ได้กล่าวมาแล้วว่าเราจะใช้วงจรกรองแอกทีฟอนุกรมกับวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูน ดังนั้นในการออกแบบวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เราจะพิจารณาจากโหลดที่ใช้ในงานวิจัย วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูน

ระบบที่ใช้เป็นระบบ 3 เฟส 3 สาย 380 V 50Hz โหลดที่ใช้เป็นวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส ควบคุมมอดูเลชันที่ 60 องศา ขนาด 2.5 kVA มีตัวประกอบกำลัง 0.48

ในการออกแบบเราจะเริ่มจากการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ ที่ชดเชยค่ากำลังงานรีแอกทีฟให้ระบบไฟฟ้ามีตัวประกอบกำลังเป็น 0.9 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} Q(\text{kVar}) &= W(\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \\ &= 1200(1.83 - 0.48) \\ &= 1615 \text{ Var} \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
 C_F &= \frac{Q}{2\pi V_{\text{line}}^2} & (3.2) \\
 &= \frac{1615}{2\pi \times 50 \times 380^2} \\
 &= 35 \mu\text{F}
 \end{aligned}$$

โดยที่ C_F คือ ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองพาสซีฟแบบคัตออฟเฟส

Q คือ ค่ากำลังงานรีแอกทีฟ 3 เฟส ที่ต้องการชดเชย

V_{line} คือ ค่าแรงดันระหว่างสาย

ดังนั้นระบบที่ใช้ในการวิจัยนี้จะใช้ ตัวเก็บประจุขนาด 35 μF พิกัด 450 V

เมื่อได้ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองแล้วในขั้นต่อไปจะทำการพิจารณาหาค่าความเหนี่ยวนำ (L_F) ของวงจรกรองพาสซีฟแบบคัตออฟเฟส ซึ่งหาได้โดยการกำหนดจุดเรโซแนนซ์ของวงจรกรองพาสซีฟแบบคัตออฟเฟสให้มีค่าต่ำกว่าความถี่ฮาร์โมนิกที่มีในระบบประมาณหนึ่งอันดับ แต่ในกรณีนี้เนื่องจากวงจรกรองพาสซีฟแบบคัตออฟเฟสจะต้องต่ออนุกรมกับวงจรกรองแอกทีฟเพื่อกำจัดฮาร์โมนิก โดยที่วงจรกรองแอกทีฟจะสร้างแรงดันและทำตัวเหมือนตัวเหนี่ยวนำค่าลบไปหักล้างกับตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองพาสซีฟแบบคัตออฟเฟส ทำให้พฤติกรรมของวงจรโดยรวมเป็นเสมือนวงจรกรองพาสซีฟแบบจูนที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ต้องการกำจัด ดังนั้นเราจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบให้จุดเรโซแนนซ์ของวงจรกรองพาสซีฟแบบคัตออฟเฟสมีค่าต่ำกว่าฮาร์โมนิกอันดับที่ต่ำที่สุดในระบบมาก ทั้งนี้เพื่อให้วงจรกรองแอกทีฟไม่ต้องสร้างแรงดันมีค่าสูงซึ่งจะทำให้พิกัดของวงจรกรองแอกทีฟเล็กลงได้

ดังนั้นในการวิจัยนี้เราจะเลือกจุดเรโซแนนซ์ของวงจรกรองพาสซีฟแบบคัตออฟเฟสมีค่าเท่ากับ $f_r = 225\text{Hz}$ ($n=4.5$) ซึ่งเป็นจุดสูงที่สุดที่จะเป็นวงจรกรองพาสซีฟแบบคัตออฟเฟส

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F C_F}} \quad (3.3)$$

$$225 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F \times 35\mu\text{F}}}$$

$$L_F = 14.3\text{mH}$$

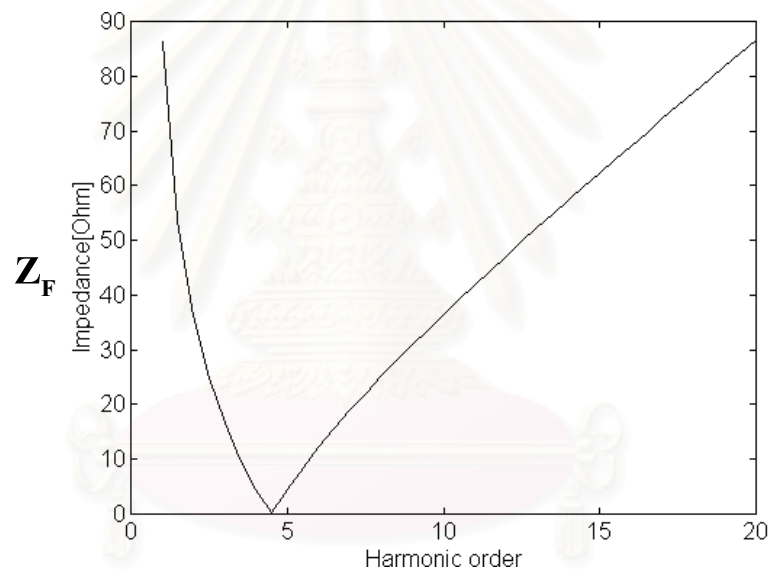
โดยที่ f_r คือ จูเรโซแนนซ์ของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูน

n คือ อันดับของฮาร์โมนิก

ดังนั้นระบบที่ใช้ในการวิจัยนี้จะใช้ค่าความเหนี่ยวนำประมาณ 14.5mH

จากที่กล่าวมาแล้วว่าวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนนี้จะต่ออนุกรมกับวงจรกรองแอกทีฟเพื่อกำจัดกระแสฮาร์โมนิก ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านวงจรกรองพาสซีฟจะมีค่าสูงเท่ากับขนาดกระแสฮาร์โมนิกที่ต้องการกำจัดรวมกับกระแสชดเชยค่าตัวประกอบกำลังจึงต้องออกแบบค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์เพื่อไว้ด้วย

จากค่าที่ออกแบบได้ทั้งหมดเมื่อทำการเขียนกราฟของอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ ของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนที่ได้ออกแบบจะได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ ของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนที่ออกแบบ

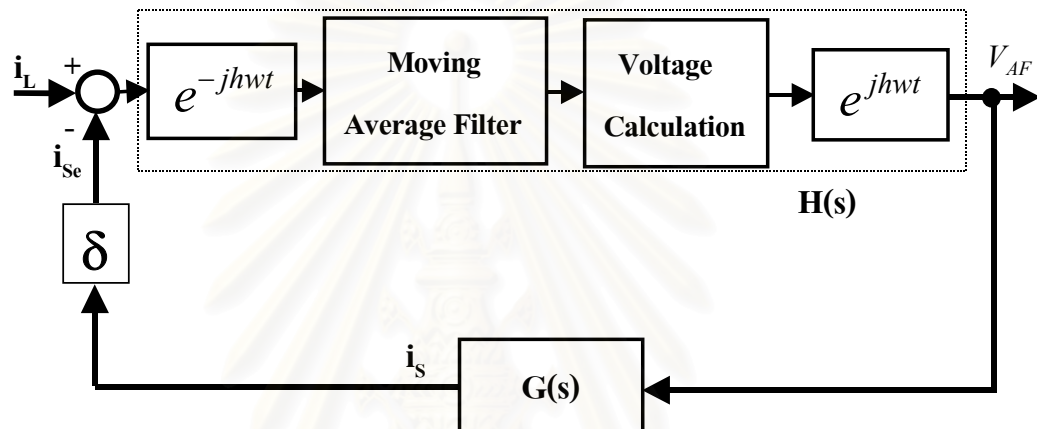
3.2 การออกแบบวงจรกรองแอกทีฟ

ตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ว่าวงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดนี้จะใช้การตรวจจับกระแสสองจุดเพื่อลดผลของค่าความผิดพลาดของอัตราขยายกระแสทางด้านแหล่งจ่าย จึงทำให้ระบบทำงานในลักษณะวงรอบปิด และใช้วิธีรีเฟรชเฟลิกซ์พีดีเอพีในการคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกเพื่อสร้างแรงดันของวงจรกรองแอกทีฟซึ่งมีข้อเสียคือ มีลักษณะเฟสที่ไม่ดีที่ความถี่สูงไม่เหมาะกับระบบวงรอบปิดจะทำให้เกิดปัญหาทางด้านเสถียรภาพขึ้น ดังนั้นการออกแบบวงจรกรองแอกทีฟในส่วนการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกและส่วนคำนวณแรงดันสามารถนำมาใช้ได้เลย แต่ประเด็นที่จะต้องพิจารณาคือการออกแบบระบบให้มีเสถียรภาพ

3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพและผลการวิเคราะห์

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.13 เราสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นบล็อกไดอะแกรมที่จะใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยยังไม่คิดถึงผลของส่วนคำนวณแรงดันป้อนกลับ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพนี้เราจะให้มีค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ตรวจจับกระแส ± 20 เปอร์เซ็นต์และตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

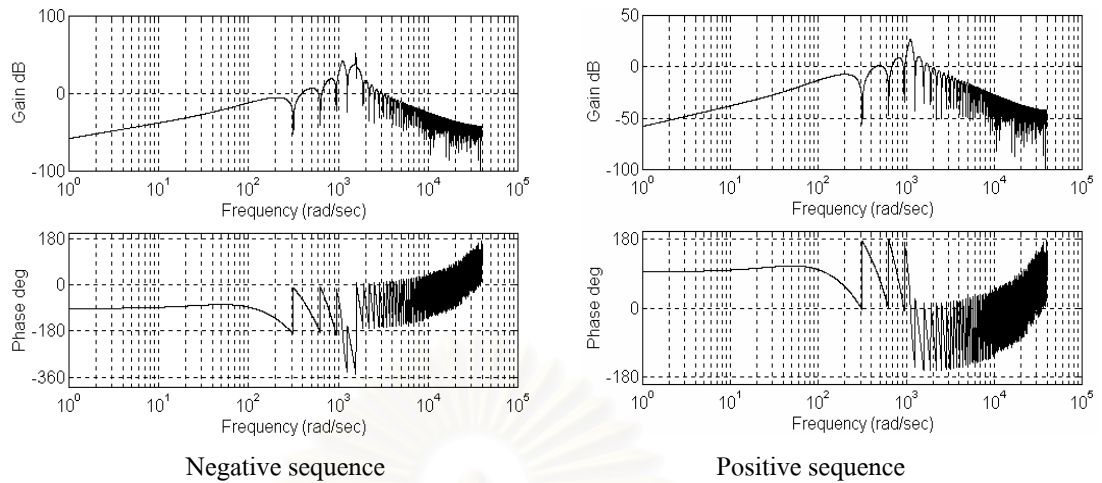
จากการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้วิธีโบเดพล็อตของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดพบว่าในกรณีที่มีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นระบบจะขาดเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4



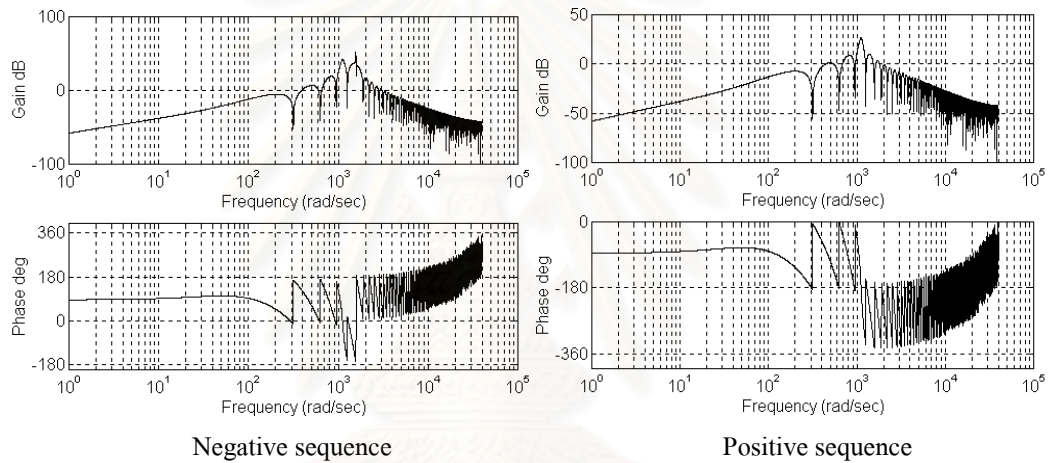
h คือ อันดับและซีแควนซ์ของฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับ

รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรองแยกที่ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) กรณีค่าความผิดพลาด -20%



(ข) กรณีค่าความผิดพลาด +20%

รูปที่ 3.4 ผลโบเดพล็อตที่ยังไม่ได้แก้ปัญหาเสถียรภาพกรณีค่าความผิดพลาด ± 20 เปอร์เซ็นต์

3.4 การแก้ไขปัญหาเสถียรภาพในส่วนการป้อนไปหน้าของแรงดัน

การแก้ไขปัญหาเสถียรภาพจะใช้ทฤษฎีอัตราขยายค่าเล็ก (small gain theorem) โดยมีเงื่อนไขเพียงพอสำหรับเสถียรภาพคือ

$$\|\delta * H(s) * G(s)\|_{\infty} < 1 \tag{3.4}$$

โดยที่ H(s) คือฟังก์ชันโอนย้ายในส่วนตรวจจับฮาร์มอนิกและสร้างแรงดัน

จากสมการที่ (3.4) จะเห็นว่าถ้าเราสามารถทำให้ค่าอัตราขยายสูงสุดของระบบวงรอบเปิดมีค่าน้อยกว่าหนึ่งได้ ก็จะเป็นเงื่อนไขที่เพียงพอที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ดังนั้นในการปรับปรุงระบบให้เป็นไปตามสมการที่ (3.4) เราจะทำโดยคิดวงจรกรองผ่านต่ำเข้าไปในระบบ

เพื่อคัดอัตราขยายวงรอบเปิดของระบบให้ต่ำกว่าหนึ่ง ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับแก้ปัญหาระบบที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากเฟสที่ไม่ดีได้ เนื่องจากเฟสจะเป็นยังไงก็ตามก็จะไม่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบ

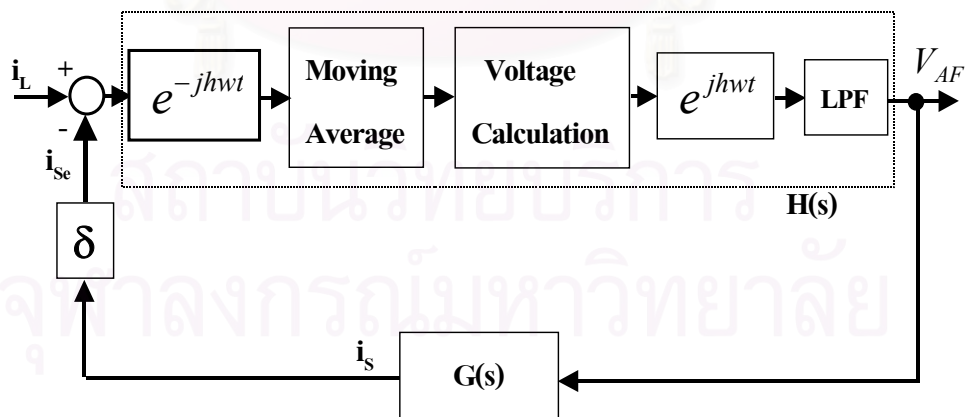
จากที่กล่าวมาแล้วว่าเราจะแก้ไขเสถียรภาพโดยติควงจรกรองผ่านต่ำเข้าไปที่ระบบเพื่อให้ได้ตามเงื่อนไขอัตราขยายค่าเล็ก (small gain theorem) ซึ่งการคิดมีสองวิธีคือ

1. ติควงจรกรองผ่านต่ำบนแกนนิ่ง
2. ติควงจรกรองผ่านต่ำบนแกนหมุน

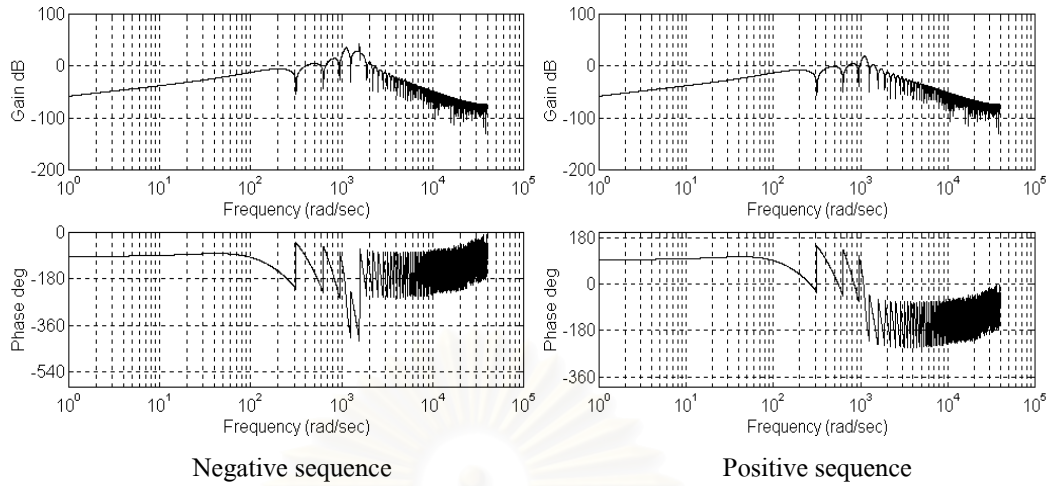
ซึ่งเราจะพิจารณาแต่ละกรณีดังต่อไปนี้

ก) การแก้ไขปัญหาเสถียรภาพโดยติควงจรกรองผ่านต่ำบนแกนนิ่ง

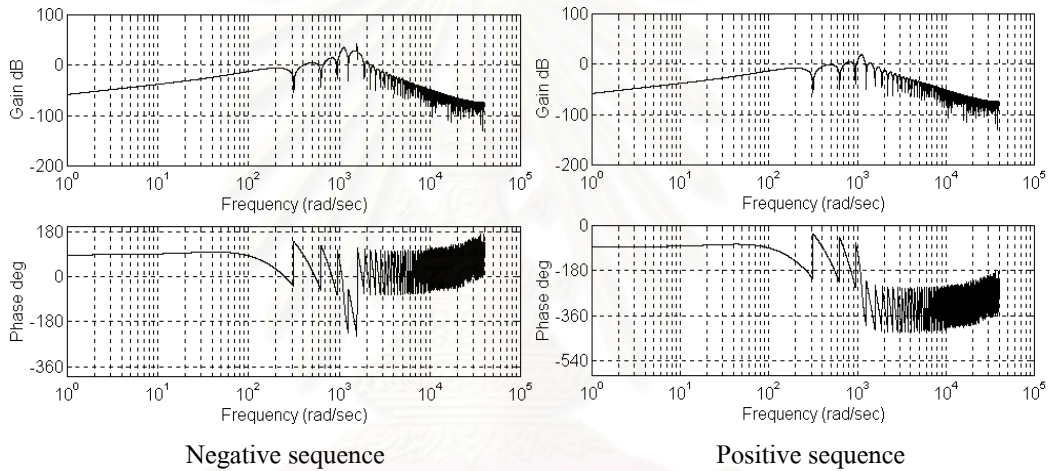
เมื่อติควงจรกรองผ่านต่ำเข้าไปในระบบบนแกนนิ่งจะสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และเมื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยวิธีโบเดพล็อตของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิด พบว่าในกรณีที่ติควงจรกรองผ่านต่ำที่ค่าความถี่หักมมมีค่าเท่ากับ 100 Hz ระบบก็ยังไม่สอดคล้องตามเงื่อนไขเสถียรภาพที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 3.6 และเมื่อลดค่าความถี่หักมมของวงจรกรองผ่านต่ำลงเหลือ 1 Hz ดังแสดงในรูปที่ 3.7 พบว่าค่าอัตราขยายของระบบเป็นไปตามเงื่อนไขเสถียรภาพที่ต้องการ แสดงว่าการติควงจรกรองผ่านต่ำบนแกนนิ่งนี้สามารถทำให้ระบบเป็นไปตามเงื่อนไขเสถียรภาพได้เมื่อลดค่าความถี่หักมมลง แต่จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าจะต้องใช้ค่าความถี่หักมมที่มีค่าต่ำในการทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ซึ่งเป็นผลทำให้ระบบตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกมีผลตอบสนองที่ช้าเนื่องจากค่าความถี่หักมมของวงจรกรองผ่านต่ำ ทำให้สูญเสียข้อดีของวิธีตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอพท์



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมเมื่อทำการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพโดยติควงจรกรองผ่านต่ำบนแกนนิ่ง

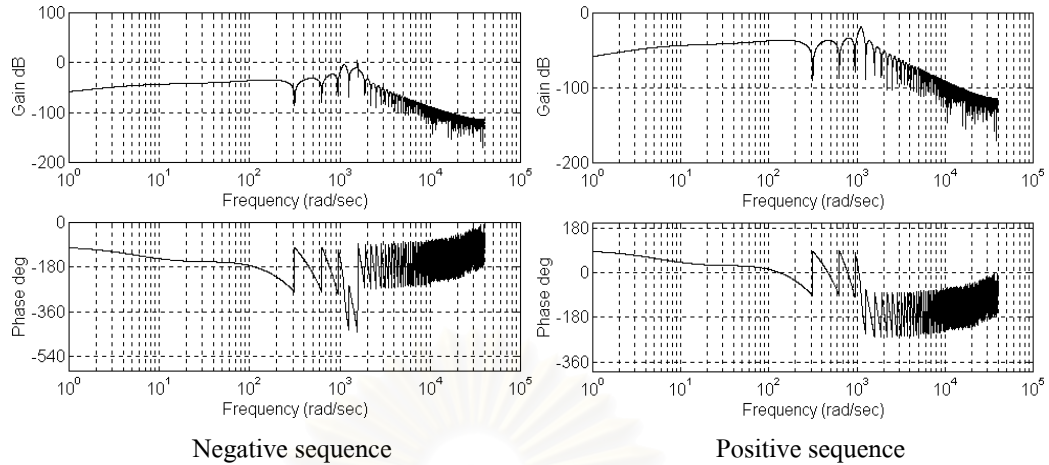


(ก) ค่าความผิดพลาด -20 เปอร์เซ็นต์

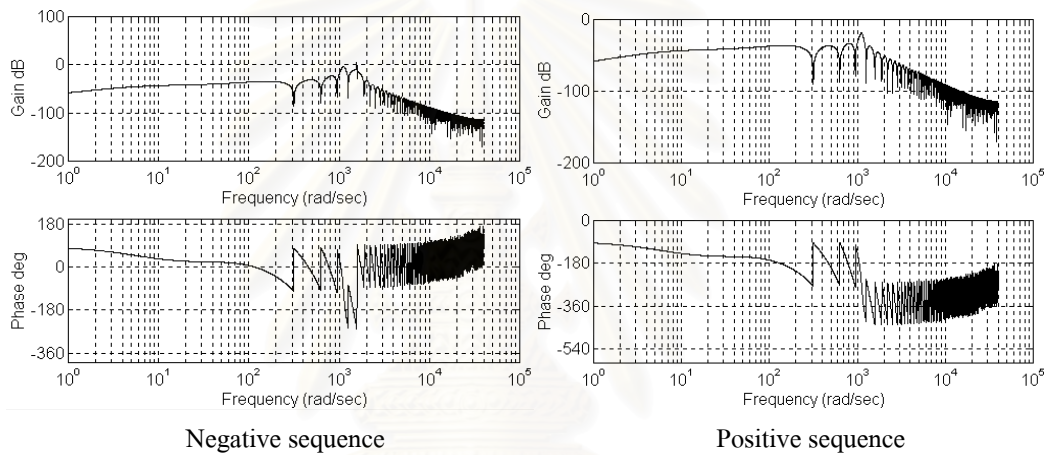


(ข) ค่าความผิดพลาด +20 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 3.6 ผลโบเดพล็อตกรณีติดวงจรกรองผ่านต่ำบนแกนนิ่งที่ค่าความถี่หักมุม 100 Hz



(ก) ค่าความผิดพลาด -20 เปอร์เซ็นต์

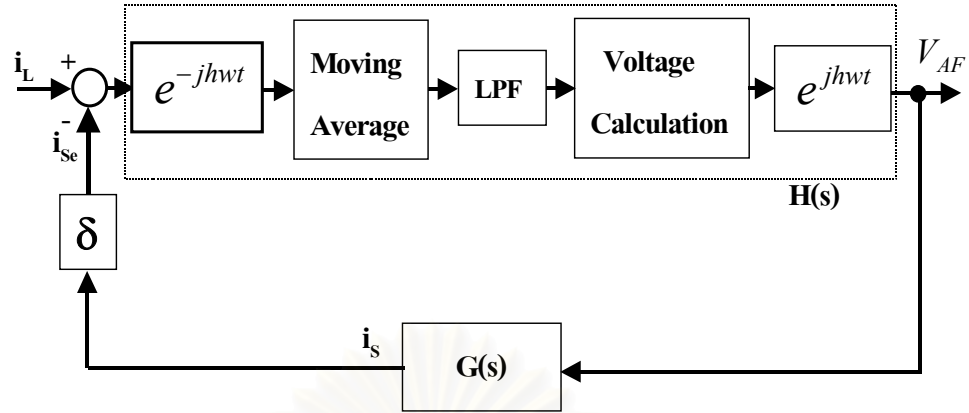


(ข) ค่าความผิดพลาด +20 เปอร์เซ็นต์

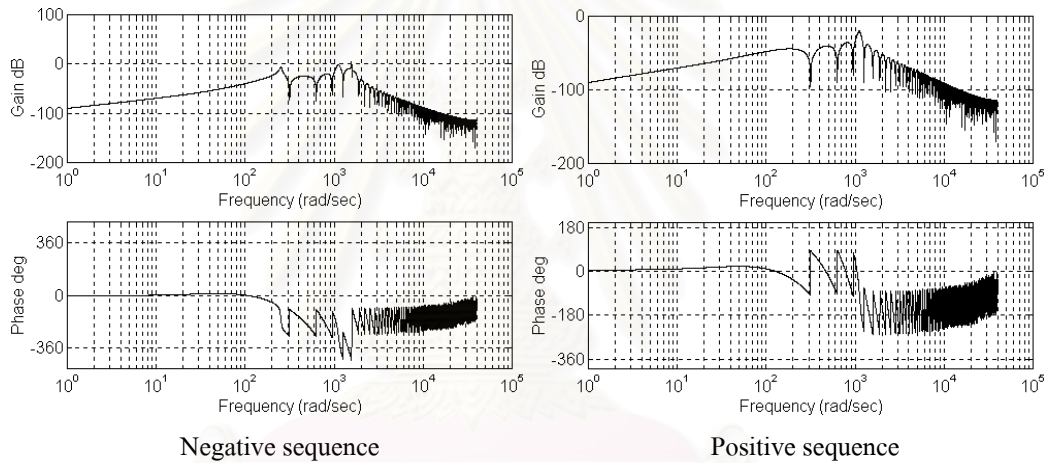
รูปที่ 3.7 ผลโบเดพล็อตกรณีติดวงจรกรองผ่านต่ำบนแกนนิ่งที่ค่าความถี่หักมุม 1 Hz

ข) การแก้ไขปัญหาเสถียรภาพโดยติดวงจรกรองผ่านต่ำบนแกนหมุน

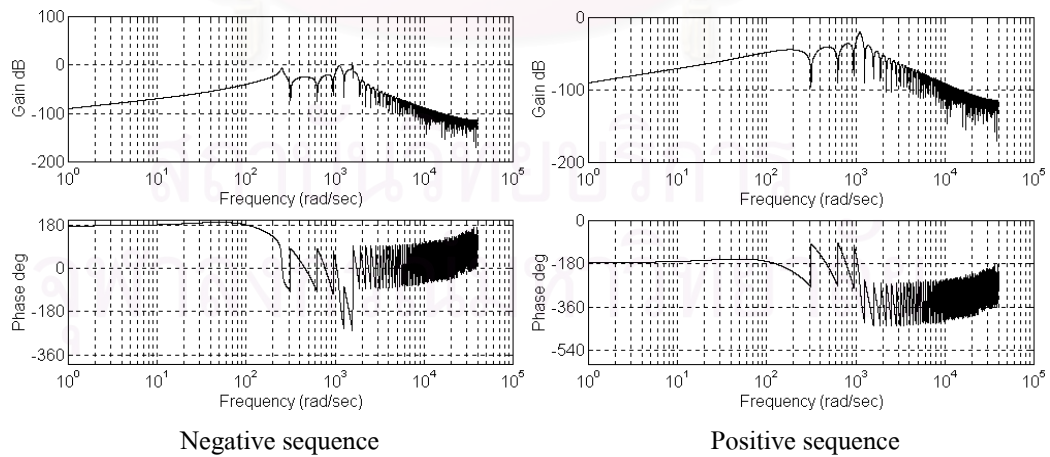
เมื่อติดวงจรกรองผ่านต่ำบนแกนหมุนเข้าไปในระบบดังแสดงในรูปที่ 3.8 เพื่อให้ระบบเป็นไปตามเงื่อนไขเสถียรภาพที่ต้องการ โดยที่วงจรกรองผ่านต่ำมีค่าความถี่หักมุม 100 Hz จากโบเดพล็อตในรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าระบบมีอัตราขยายวงรอบเปิดน้อยกว่าหนึ่งตลอดย่านความถี่เป็นไปตามเงื่อนไขเสถียรภาพที่ต้องการกล่าวคือระบบก็จะมีเสถียรภาพ แต่การติดวงจรกรองผ่านต่ำเข้าไปในระบบตรงส่วนตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุนนั้น ก็จะมีผลเกี่ยวกับผลตอบสนองในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยโดยความเร็วในการตอบสนองก็จะขึ้นกับค่าความถี่หักมุมของวงจรกรองผ่านต่ำเช่นกัน ซึ่งอาจจะทำให้สูญเสียข้อดีของผลตอบสนองที่เร็วของการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีรีโวลต์ซีฟดีเอฟทีไป แต่จากการที่เราใช้ค่าความถี่หักมุมที่ 100Hz นั้น ซึ่งเป็นค่าที่สูงทำให้ไม่มีผลกระทบต่อความเร็วในการตอบสนอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพด้วยวิธีนี้



รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมเมื่อทำการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพโดยคิวงจรกรองผ่านต่ำบนแกนหมุน



(ก) ค่าความผิดพลาด -20 เปอร์เซ็นต์



(ข) ค่าความผิดพลาด +20 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 3.9 ผล โบริคพล็อตกรณีคิวงจรกรองผ่านต่ำบนแกนหมุนที่ค่าความถี่หักมุม 100 Hz



รูปที่ 3.10 ช่วงเวลาตอบสนองในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่แปลงเป็นแรงดันของวงจรถองแอกทีฟด้วยวิธีต่างๆ

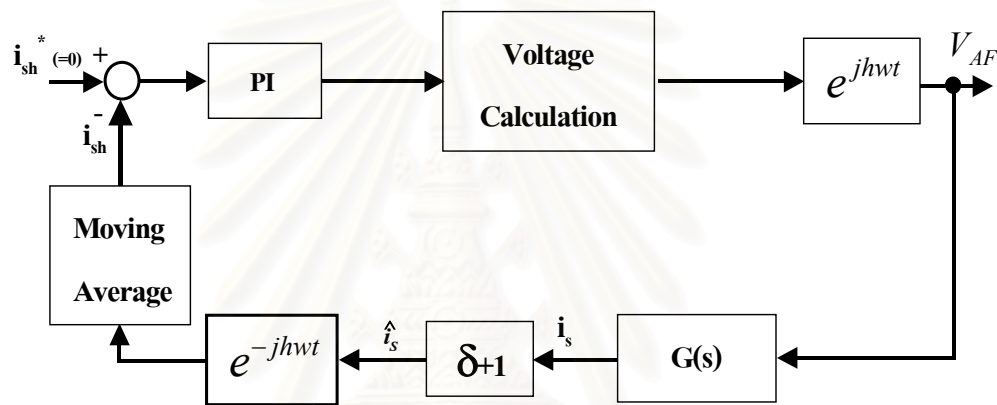
รูปที่ 3.10 จะแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองในสถานะชั่วคราวของการสร้างแรงดันเมื่อใช้วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยรีเคอร์ซีฟดีเอฟที่ ได้ทำการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพคือ มีวงจรถองผ่านตัวบนแกนหมุนซึ่งมีค่าความถี่หักมุมเท่ากับ 100 Hz เปรียบเทียบกับการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีต่างๆ ที่ทำการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 โดยมีวิธีการบนแกนหมุนมีค่าความถี่หักมุมที่ 10 Hz และวิธีตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยรีเคอร์ซีฟดีเอฟที่ทั่วไป ที่ไม่มีวงจรถองผ่านตัวอยู่ จากผลจะเห็นว่าผลตอบสนองของวิธีตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยรีเคอร์ซีฟดีเอฟที่ทำการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพแล้วคือมีวงจรถองผ่านตัวที่ค่าความถี่หักมุม 100 Hz ยังมีผลตอบสนองที่เร็วอยู่ ดังนั้นการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพด้วยวิธีการติดวงจรถองผ่านตัวบนแกนหมุนนี้ ไม่ทำให้เสียข้อดีของรีเคอร์ซีฟดีเอฟที่และเมื่อเทียบกับวิธีกรองบนแกนหมุนแล้วก็ยังคงดีกว่าคือไม่มีผลของความถี่ข้างเคียงที่ไม่ต้องการเข้ามารบกวน

3.5 เสถียรภาพเมื่อมีส่วนการป้อนกลับกระแสแหล่งจ่าย

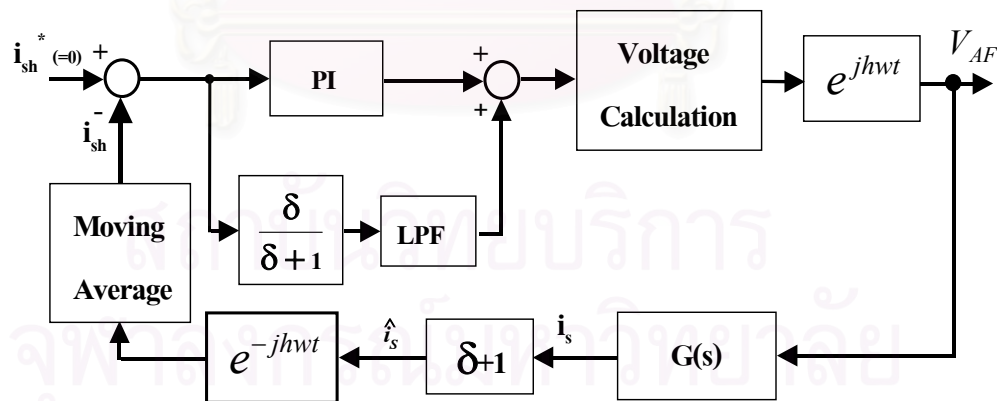
จากหัวข้อที่ 2.4 ในบทที่ 2 ที่กล่าวถึงระบบที่ต้องมีส่วนคำนวณแรงดันป้อนกลับแบบ PI เข้ามา ดังนั้นเราจึงต้องพิจารณาถึงเสถียรภาพในส่วนนี้รวมด้วย โดยเราจะวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้แผนภูมิไนควิสต์ (Nyquist plot) เพื่อดูเสถียรภาพ

เราสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมในส่วนคำนวณแรงดันป้อนกลับแบบ PI ได้ดังรูปที่ 3.11 ดังนั้นจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.11 เราสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อมีทั้งส่วนการป้อนไปหน้าและส่วนการป้อนกลับได้ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งจะเห็น

ได้ว่าเราสามารถทำให้เป็นไปตามเงื่อนไขเสถียรภาพตามที่ต้องการได้ โดยอาศัยค่า K_p และ K_i ของตัวควบคุมแบบ PI เป็นตัวกำหนด ซึ่งการออกแบบค่า K_p และ K_i นี้สามารถทำได้ไม่ยาก เนื่องจากหลักการออกแบบตัวควบคุมแบบ PI นี้เราไม่สนใจผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ PI เราจะสนใจแต่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบนั้นเราจะมีส่วนคำนวณแรงดันป้อนไปหน้าที่ไวในการกำจัดฮาร์มอนิกอยู่แล้ว ดังนั้นในส่วนคำนวณแรงดันป้อนกลับนี้จึงไม่จำเป็นต้องออกแบบให้มีผลตอบสนองที่ไว เราสามารถออกแบบตัวควบคุม PI ให้มีผลตอบสนองที่ช้าได้ โดยจะคำนึงถึงแต่ให้ระบบมีเสถียรภาพเป็นสำคัญ ดังนั้นจึงสามารถออกแบบค่า K_p และ K_i ได้ง่าย



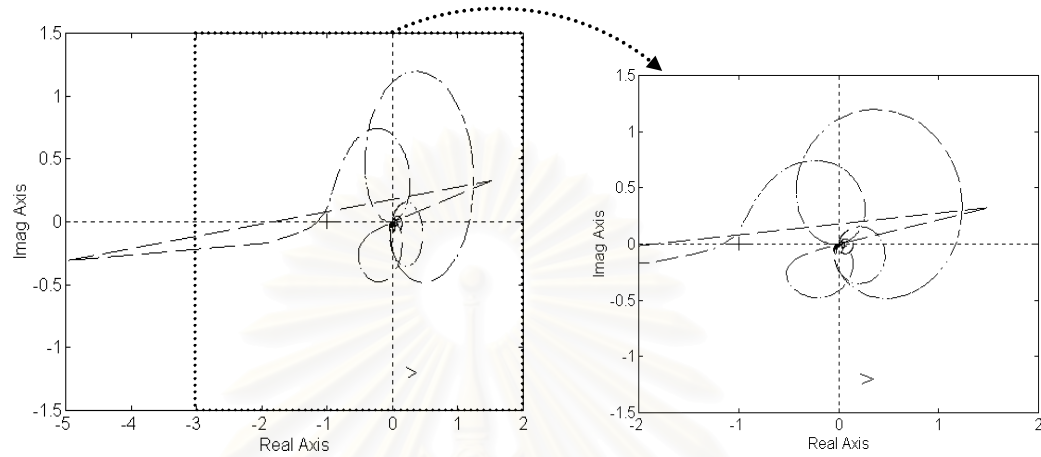
รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมเฉพาะในส่วนคำนวณแรงดันป้อนกลับแบบ PI



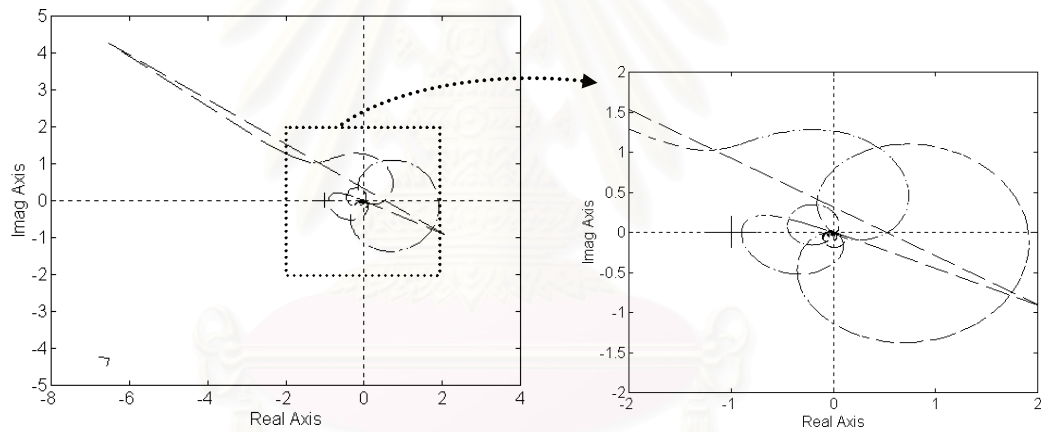
รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมเมื่อมีทั้งส่วนการป้อนไปหน้าและส่วนการป้อนกลับ

จากที่กล่าวมาเราจึงออกแบบค่า K_p และ K_i ให้มีค่าน้อยๆ เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ โดยไม่สนใจผลตอบสนอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ให้ค่า K_p เท่ากับ -0.1 และค่า K_i มีค่าเท่ากับ -0.01 จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อ

วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยวิธีแผนภูมิในควิสด์ของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งจะเห็นว่าระบบเมื่อมีส่วนการป้อนกลับรวมเข้ามาระบบก็ยังคงมีเสถียรภาพตามที่ต้องการ



(ก) ค่าความผิดพลาด -20 เปอร์เซ็นต์



(ข) ค่าความผิดพลาด $+20$ เปอร์เซ็นต์

Negative sequence - - - - -

Positive sequence ———

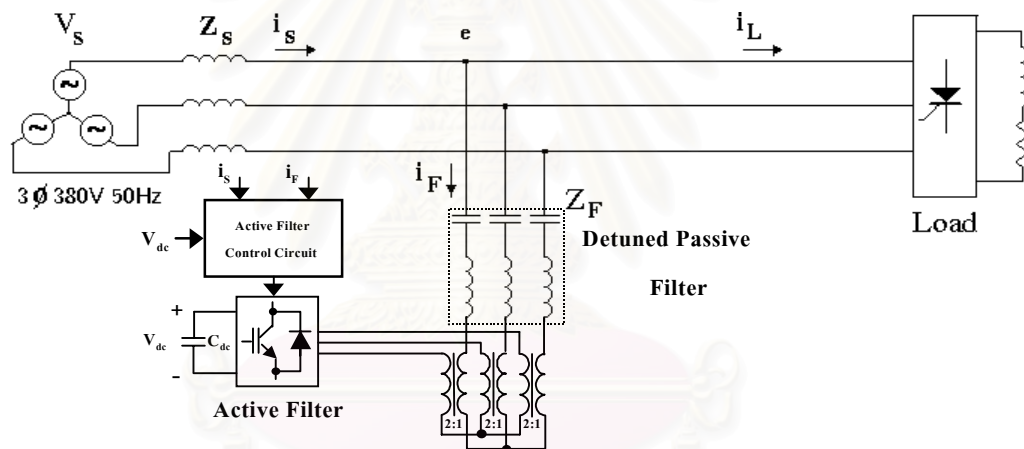
รูปที่ 3.13 แผนภูมิในควิสด์ของระบบเมื่อมีทั้งส่วนการป้อนไปหน้าและส่วนการป้อนกลับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะ โครงสร้างทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ สำหรับโครงสร้างโดยรวมของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนอนุกรมกับวงจรกรองแอกทีฟเป็นแบบไฮบริด จะถูกต่อขนานอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด วงจรกรองแอกทีฟจะตรวจจับกระแสสองจุดคือกระแสทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสที่ผ่านวงจรกรองพาสซีฟมาคำนวณแรงดันที่ต้องสร้างด้วยตัวประมวลผลดิจิทัลและอาศัยหม้อแปลงแรงดันเฟสเดียว 3 ตัวเป็นตัวเชื่อมต่อกับวงจรพาสซีฟแบบดีจูน อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้จะเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดที่ไม่ต้องใช้ส่วนป้อนแรงดันไฟตรง(กิตติพนธ์ สิทธิเลิศพิศาล, 2539)(ดูรายละเอียดการออกแบบในภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของวงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริด

โครงสร้างโดยรวมระบบจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆด้วยกันคือ

1. ส่วนของระบบกำลัง
2. ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์
3. ส่วนภาคการตรวจจับสัญญาณต่างๆ และส่วนควบคุม

สำหรับรายละเอียดในแต่ละส่วนของวงจรมัน เราจะพิจารณาแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของฮาร์ดแวร์และส่วนซอฟต์แวร์ ดังจะได้อธิบายถึงในหัวข้อต่อไป

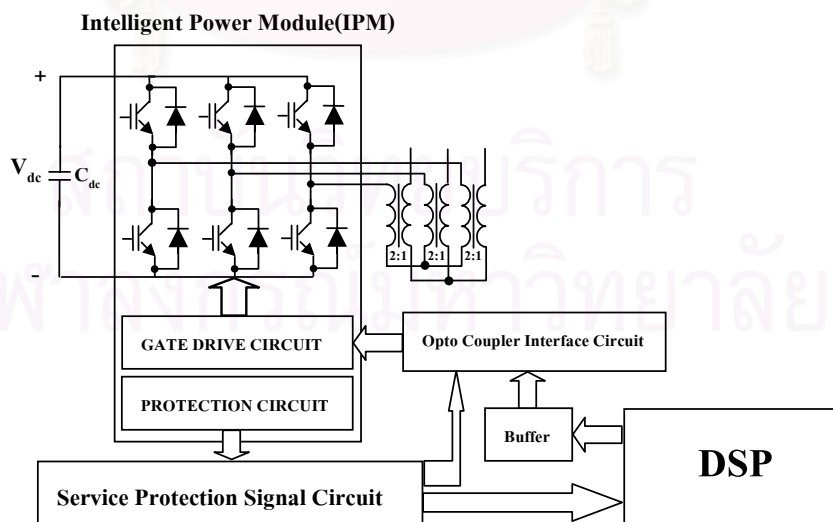
4.1 ฮาร์ดแวร์ของระบบ

4.1.1 ส่วนของระบบกำลัง

- อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Z_s) มีค่าเป็น 8.5mH 3 ตัว
- วงจรกรองพาสซีฟแบบคิงูน ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ (L_f) ขนาด 14.5mH 3 ตัว และตัวเก็บประจุไฟฟ้าสถิต (C_f) ขนาด 35uF 450 V จำนวน 3 ตัว
- โหลดเป็น วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟสควบคุมมอดูเลชันขนาด 2.5kVA ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน 55Ω และตัวเหนี่ยวนำขนาด 51mH

4.1.2 ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์

- รายละเอียดของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยมีส่วนต่างๆ ดังนี้คือ
 - หม้อแปลงแรงดันเฟสเดียว 3 ตัว อัตราส่วนจำนวนรอบเป็น 2:1
 - ตัวเก็บประจุไฟตรง (C_{dc}) ขนาด 2875uF ขนาดพิกัดแรงดัน 600V
 - Intelligent Power Module (IPM) ขนาดพิกัด 600V 10A ภายในประกอบด้วย
 1. ชุดสวิทช์กำลังพร้อมไดโอด 6 ชุด
 2. ชุดขั้วนำเกตของ IGBT 6 ชุด โดยที่ 3 ชุดบนจะใช้แหล่งจ่ายไฟแยกกัน ส่วน 3 ชุดล่างจะใช้แหล่งจ่ายชุดเดียวกัน
 3. ชุดวงจรป้องกัน
 - Opto Coupler Interface Circuits
 - Buffer



รูปที่ 4.2 โครงสร้างส่วนของวงจรกรองแอกทีฟ

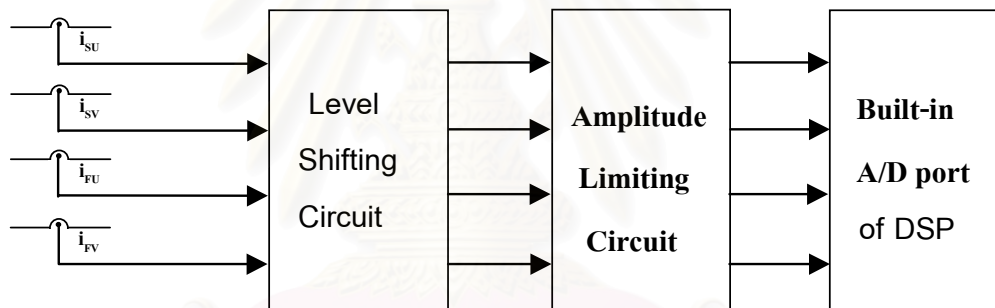
4.1.3 ส่วนการตรวจจับสัญญาณต่างๆ และส่วนควบคุม

ในส่วนนี้จะแยกเป็นภาคคือภาคการตรวจจับสัญญาณ ภาคการควบคุมและภาคการป้องกัน

4.1.3.1 ภาคการตรวจจับสัญญาณต่างๆ ประกอบด้วย

ก) ส่วนตรวจจับกระแส

เราจะทำการตรวจจับกระแสในระบบเพื่อใช้ในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก โดยจะทำการตรวจจับกระแสทั้งหมด 4 จุด ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.3 ชุดตรวจจับกระแสจะทำการวัดกระแสทางด้านแหล่งจ่าย 2 เฟส คือ เฟส U และ เฟส V และกระแสผ่าน วงจรกรองพาสซีฟ 2 เฟส คือ เฟส U และ เฟส V โดยใช้ตัวตรวจจับกระแสตรง (DC-CT) ค่ากระแสที่วัดได้จะถูกนำไปปรับระดับและจำกัดขนาดก่อนจะถูกส่งไปยังพอร์ทของตัวประมวลผลดิจิทัล ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล



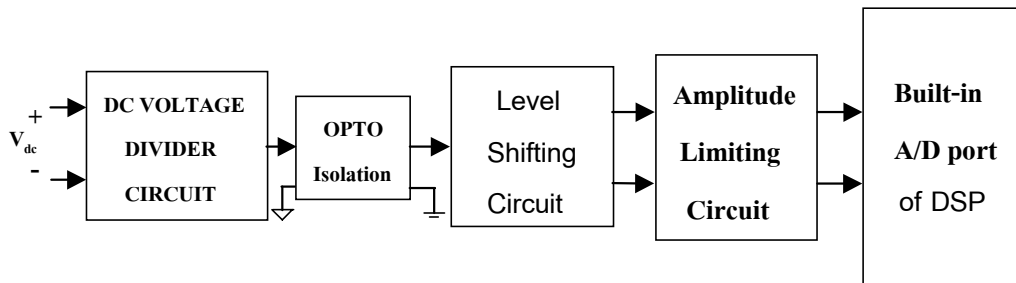
รูปที่ 4.3 ส่วนตรวจจับสัญญาณกระแส

ข) ส่วนตรวจจับแรงดันบัลไฟตรง

อินเวอร์เตอร์เป็นชนิดที่ไม่ต้องใช้ส่วนป้อนแรงดันไฟตรงและจะมีการตรวจจับแรงดันบัลไฟใช้ในการควบคุม โดยจะรับค่าแรงดันบัลไฟตรงมาทอนระดับแรงดันให้มีค่าต่ำลง จากนั้นแยกโคตทางไฟฟ้าด้วย opto isolator ค่าที่ได้จะนำไปปรับระดับและจำกัดขนาดก่อนจะถูกส่งไปยัง พอร์ทของ DSP ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ดังแสดงในรูปที่ 4.4

4.1.3.2 ภาคการควบคุม

ในส่วนนี้จะประกอบด้วย บอร์ด DSP TMS320F243 จำนวน 1 บอร์ด ซึ่งจะรับค่ากระแสและแรงดันที่ตรวจจับได้แล้วนำไปคำนวณหาค่าแรงดันที่ต้องการและสร้างออกมาเป็นสัญญาณ PWM เพื่อขับสวิตช์ของ IPM



รูปที่ 4.4 ส่วนตรวจจับแรงดันบัสไฟตรง

4.1.3.3 ภาครองป้องกัน

ในส่วนของภาครองป้องกันนั้นจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์

- ส่วนฮาร์ดแวร์มีวงจรป้องกันภายใน IPM เอง และส่วนที่เป็นวงจรถ่ายนอกที่รับสัญญาณแจ้งจาก IPM เมื่อเกิดข้อผิดพลาดขึ้นในระบบเพื่อหยุดการทำงานของวงจรจับนำเกต อีกส่วนคือส่วนป้องกันแรงดันบัสถ้าเกินที่เราต้องการจะทำการตัดวงจรรองแอกทีฟออกจากระบบทันที

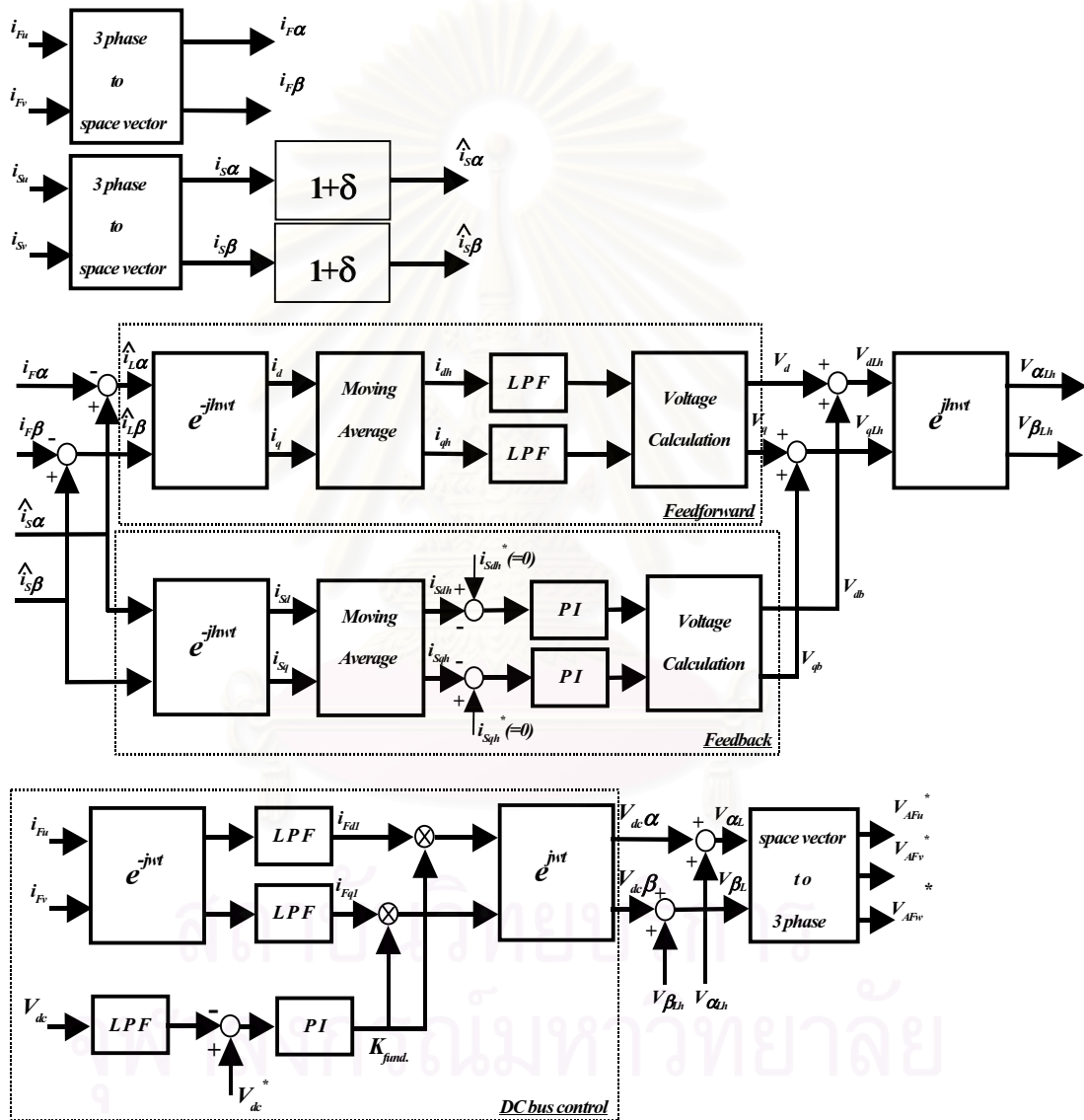
- ส่วนซอฟต์แวร์รับสัญญาณแจ้งจาก IPM เมื่อเกิดข้อผิดพลาดจะส่งสัญญาณเข้าไปในบอร์ด DSP แล้วจะทำการหยุดสัญญาณสวิตช์ PWM ที่ DSP สร้าง

4.2 ซอฟต์แวร์ของระบบ

ในส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการคำนวณแรงดันของวงจรรองแอกทีฟ สามารถเขียนแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.5

จากบล็อกไดอะแกรมเราสามารถอธิบายได้ว่าในส่วนแรก DSP จะอ่านค่ากระแสทางด้านแหล่งจ่าย (i_{s_u}, i_{s_v}) และกระแสที่ไหลผ่านวงจรรองพาสซีฟ (i_{F_u}, i_{F_v}) แล้วแปลงสัญญาณกระแสทั้งสองให้อยู่ในรูป space vector ($i_{s\alpha}i_{s\beta}$ และ $i_{F\alpha}i_{F\beta}$) จากนั้นส่วนของการคำนวณป้อนไปหน้า จะคำนวณหาค่ากระแสโหลด ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) แล้วนำไปแปลงเป็นค่าที่อ้างอิงบนแกนอ้างอิงซึ่งหมุนไปด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการจะตรวจจับ (hw) ($i_p i_q$) จากนั้นจะคำนวณหาค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก (i_{dih}, i_{qh}) โดยอาศัย Moving Average Filter และผ่านวงจรกรองผ่านต่ำได้ค่าไปคำนวณเป็นแรงดันในส่วนป้อนไปหน้า ที่จะรวมกับค่าแรงดันในส่วนป้อนกลับ ซึ่งในส่วนป้อนกลับนี้จะใช้ค่า $i_{s\alpha}i_{s\beta}$ พิจารณบนแกนอ้างอิงซึ่งหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการจะตรวจจับ (hw) ($i_{sp} i_{sq}$) มาคำนวณหาค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก (i_{sdh}, i_{sqh}) โดยอาศัย Moving Average Filter และผ่านตัวควบคุม PI ออกมาได้ค่าไปคำนวณแรงดันป้อนกลับ เมื่อได้ค่าแรงดันรวมของสองส่วนนี้แล้ว (V_{dLh}, V_{qLh}) ก็แปลงค่ากลับมาอยู่

ในรูปของสเปซเวกเตอร์ ($V_{\alpha Lh}, V_{\beta Lh}$) ส่วนในกรณีที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกหลายอันดับ เราจะตรวจจับหาแรงดันรวมสองส่วนให้ครบทุกอันดับก่อน จากนั้นจึงนำแรงดันฮาร์มอนิกทุกอันดับที่ต้องการกำจัดมารวมกันเป็นแรงดันคำสั่ง แล้วนำไปรวมกับแรงดันที่ได้จากส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงแล้วแปลงค่ากลับมาเป็นค่าที่อ้างอิงบนแกนอ้างอิงในระบบ 3 เฟส ก็จะได้แรงดันคำสั่งของวงจรกรองแอกทีฟ ($V_{AFu}^*, V_{AFv}^*, V_{AFw}^*$) ตามที่ต้องการ แล้วนำไปสร้างสัญญาณสวิทช์ PWM



- $\omega = 100\pi$ rad/s.
- h = อันดับและซีแควนซ์ของฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับ
- LPF = low-pass filter

รูปที่ 4.5 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของ DSP ในระบบวงจรกรองแอกทีฟในการคำนวณหาแรงดัน

ซอฟต์แวร์ทั้งหมดสามารถเขียนแสดงเป็น PDL (Program Development Language) และแสดงไดอะแกรมเวลาที่ใช้ได้ดังแสดงต่อไปนี้

4.2.1 การกำจัดฮาร์มอนิกอันดับเดียว

ซอฟต์แวร์โมดูลนี้จะใช้การอินเทอร์รัปต์ทุกๆ 50 ไมโครวินาที และโปรแกรมในการบริการอินเทอร์รัปต์จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 44 ไมโครวินาที

A HYBRID PARALLEL ACTIVE FILTER USING RECURSIVE DFT

ELIMINATE 1 ORDER

MODULE : ACTIVE FILTER

Initialize

Initialize all variables

Initialize all timers and enable timer interrupt

Loop here and wait for interrupt only

Switching Frequency Interrupt Service Routine

Read source current and passive filter current and DC bus voltage ($i_{Su}, i_{Sv}, i_{Fu}, i_{Fv}, V_{dc}$)

Input $i_{Su}, i_{Sv}, i_{Fu}, i_{Fv}, V_{dc}$ from built-in A/D

Convert to space vector α - β axis ($i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ และ $i_{f\alpha}, i_{f\beta}$)

Calculate i_s error $(1+\delta)i_s$

Calculate load current ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$)

Feedforward

Find equivalent inductance voltage

Convert $i_{L\alpha}, i_{L\beta}$ to rotating d-q axis (i_d, i_q)

Moving average (i_{dh}, i_{qh})

Low-pass filter

Voltage calculation (V_d, V_q)

Feedback

Find equivalent inductance voltage

Convert $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ to rotating d-q axis (i_{sd}, i_{sq})

Moving average (i_{sdh}, i_{sqh})

Calculate current error

Calculate PI controller

Voltage calculation (V_{ab}, V_{qb})

Calculate total equivalent inductance voltage

$$V_{dLh} = V_d + V_{db}$$

$$V_{qLh} = V_q + V_{qb}$$

Convert to space vector α - β axis ($V_{\alpha Lh}, V_{\beta Lh}$)

DC bus control

Find K_{fund} Gain

Read V_{dc} pass Low-pass filter

Calculate voltage error

Calculate PI output (K_{fund} Gain)

Find fundamental component of passive filter current

Convert $i_F \alpha, i_F \beta$ to rotating d-q axis

Low-pass filter (i_{Fd}, i_{Fq})

Calculate compensating voltage for DC bus control

$$K_{fund} * i_{Fd} \text{ and } K_{fund} * i_{Fq}$$

Convert to space vector α - β axis ($V_{dc\alpha}, V_{dc\beta}$)

Calculate active filter voltage

$$V_{\alpha L} = V_{\alpha Lh} + V_{dc\alpha}$$

$$V_{\beta L} = V_{\beta Lh} + V_{dc\beta}$$

Convert to stationary u-v axis ($V_{Afu}^*, V_{Afv}^*, V_{Afv}^*$)

Generate PWM signal

Find zero voltage

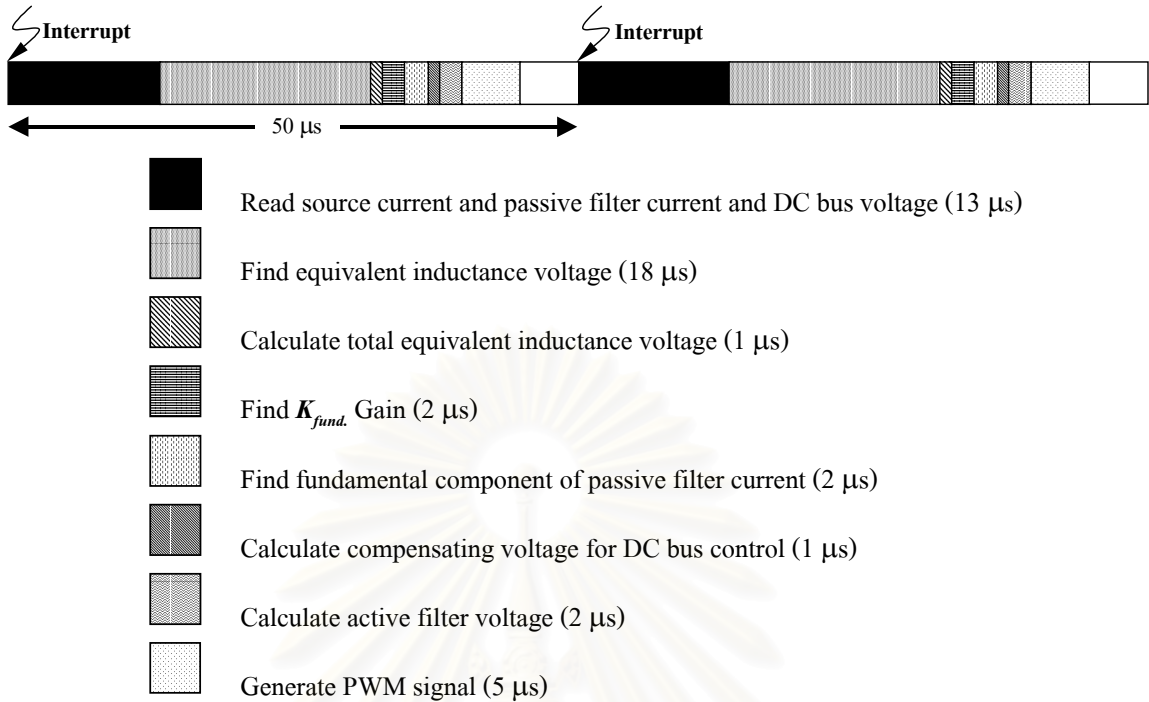
Add zero voltage to active filter voltage

Calculate timing of switching pattern

Compensate deadtime

Return

END ACTIVE FILTER



รูปที่ 4.6 ไคอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์กรณีกำจัดฮาร์มอนิก 1 อันดับ

4.2.2 การกำจัดฮาร์มอนิก 2 อันดับ

ซอฟต์แวร์โมดูลนี้จะใช้การอินเทอร์รัปต์ทุกๆ 100 ไมโครวินาที และโปรแกรมในการบริการอินเทอร์รัปต์จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 63 ไมโครวินาที

A HYBRID PARALLEL ACTIVE FILTER USING RECURSIVE DFT

ELIMINATE 2 ORDER

MODULE : ACTIVE FILTER

Initialize

Initialize all variables

Initialize all timers and enable timer interrupt

Loop here and wait for interrupt only

Switching Frequency Interrupt Service Routine

Read source current and passive filter current and DC bus voltage ($i_{Su}, i_{Sv}, i_{Fu}, i_{Fv}, V_{dc}$)

Input $i_{Su}, i_{Sv}, i_{Fu}, i_{Fv}, V_{dc}$ from built-in A/D

Convert to space vector α - β axis ($i_{s\alpha}, i_{s\beta}$)

Calculate i_s error $(1+\delta)i_s$

Calculate load current ($\hat{i}_{L\alpha}, \hat{i}_{L\beta}$)

Find 1st equivalent inductance voltage

Feedforward

Find equivalent inductance voltage

Convert $\hat{i}_{L\alpha}, \hat{i}_{L\beta}$ to rotating d'1-q'1 axis ($i_{d'1}, i_{q'1}$)

Moving average ($i_{d'1}, i_{q'1}$)

Low-pass filter

Voltage calculation ($V_{d'1}, V_{q'1}$)

Feedback

Find equivalent inductance voltage

Convert $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ to rotating d'1-q'1 axis ($i_{sd'1}, i_{sq'1}$)

Moving average ($i_{sd'1}, i_{sq'1}$)

Calculate current error

Calculate PI controller

Voltage calculation ($V_{db'1}, V_{qb'1}$)

Calculate total equivalent inductance voltage

$$V_{dL'1} = V_{d'1} + V_{db'1}$$

$$V_{qL'1} = V_{q'1} + V_{qb'1}$$

Convert to space vector α - β axis ($V_{\alpha L'1}, V_{\beta L'1}$)

Find 2nd equivalent inductance voltage

Feedforward

Find equivalent inductance voltage

Convert $\hat{i}_{L\alpha}, \hat{i}_{L\beta}$ to rotating d'2-q'2 axis ($i_{d'2}, i_{q'2}$)

Moving average ($i_{d'2}, i_{q'2}$)

Low-pass filter

Voltage calculation ($V_{d'2}, V_{q'2}$)

Feedback

Find equivalent inductance voltage

Convert $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ to rotating d'2-q'2 axis ($i_{sd'2}, i_{sq'2}$)

Moving average ($i_{sd'2}$, $i_{sq'2}$)

Calculate current error

Calculate PI controller

Voltage calculation ($V_{ab'2}$, $V_{qb'2}$)

Calculate total equivalent inductance voltage

$$V_{dL'1} = V_{d'2} + V_{ab'2}$$

$$V_{qL'1} = V_{q'2} + V_{qb'2}$$

Convert to space vector α - β axis ($V_{\alpha L'2}$, $V_{\beta L'2}$)

DC bus control

Find K_{fund} Gain

Read V_{dc} pass Low-pass filter

Calculate voltage error

Calculate PI output (K_{fund} Gain)

Find fundamental component of passive filter current

Convert $i_{F\alpha}$, $i_{F\beta}$ to rotating d-q axis

Low-pass filter (i_{Fd1} , i_{Fq1})

Calculate compensating voltage for DC bus control

$$K_{fund} * i_{Fd1} \text{ and } K_{fund} * i_{Fq1}$$

Convert to space vector α - β axis ($V_{dc\alpha}$, $V_{dc\beta}$)

Calculate active filter voltage

$$V_{\alpha L} = V_{\alpha L'1} + V_{\alpha L'2} + V_{dc\alpha}$$

$$V_{\beta L} = V_{\beta L'1} + V_{\beta L'2} + V_{dc\beta}$$

Convert to stationary u-v axis (V_{Afu}^* , V_{Afv}^* , V_{Afw}^*)

Generate PWM signal

Find zero voltage

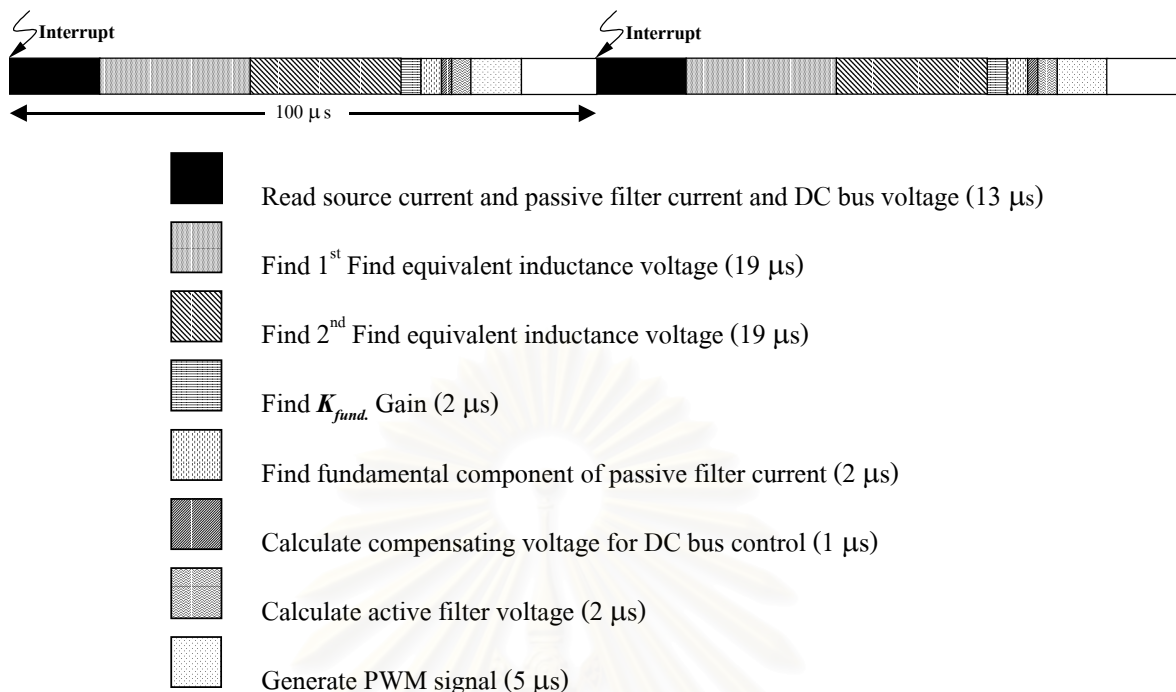
Add zero voltage to active filter voltage

Calculate timing of switching pattern

Compensate deadtime

Return

END ACTIVE FILTER



รูปที่ 4.7 ไคอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์กรณีกำจัดฮาร์มอนิก 2 อันดับ

4.2.3 กรณีการกำจัดฮาร์มอนิกมากกว่า 2 อันดับหรือหลายอันดับ

จากซอฟต์แวร์โมดูล PDL จะเห็นว่าถ้าต้องการกำจัดฮาร์มอนิกเพิ่มก็เพียงแค่เพิ่มส่วนคำนวณแรงดันเสมือนตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งประกอบด้วยส่วนคำนวณแรงดันป้อนไปหน้ารวมกับส่วนคำนวณแรงดันป้อนกลับ(equivalent inductance voltage) ขึ้นมาในอันดับที่ต้องการกำจัด แล้วรวมกับแรงดันอันดับอื่นๆ แต่ก็พบว่าในการกำจัดฮาร์มอนิกหลายอันดับเพิ่มขึ้นก็จะต้องใช้เวลาในการอินเทอร์รัปต์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

EQUIVALENT INDUCTANCE VOLTAGE

MODULE : equivalent inductance voltage

Feedforward

Find equivalent inductance voltage

Convert $\overset{\Delta}{i}_{L\alpha}, \overset{\Delta}{i}_{L\beta}$ to rotating d'h-q'h axis ($i_{d'h}, i_{q'h}$)

Moving average ($i_{d'h}, i_{q'h}$)

Low-pass filter

Voltage calculation ($V_{d'h}$, $V_{q'h}$)

Feedback

Find equivalent inductance voltage

Convert $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ to rotating d'h-q'h axis ($i_{sd'h}, i_{sq'h}$)

Moving average ($i_{sd'h}, i_{sq'h}$)

Calculate current error

Calculate PI controller

Voltage calculation ($V_{db'h}$, $V_{qb'h}$)

Calculate total equivalent inductance voltage

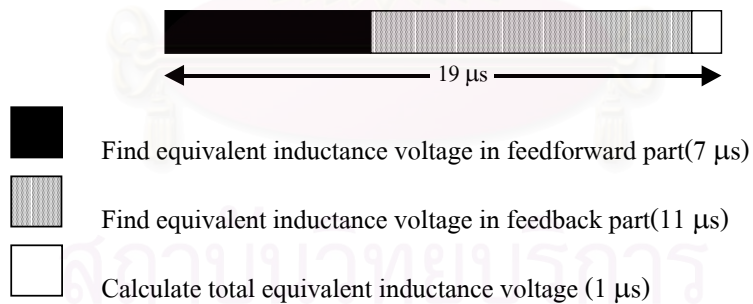
$$V_{dL'h} = V_{d'h} + V_{db'h}$$

$$V_{qL'h} = V_{q'h} + V_{qb'h}$$

Convert to space vector α - β axis ($V_{\alpha L'h}$, $V_{\beta L'h}$)

END equivalent inductance voltage

โดยที่ h คือ อันดับของฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับ



รูปที่ 4.8 ไตอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์ส่วนสร้างแรงดันเสมือนตัวเหนี่ยวนำ

บทที่ 5

ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

ในบทนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกของวงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดที่ใช้การตรวจจับกระแสสองจุดคือกระแสด้านแหล่งจ่ายและกระแสที่ไหลผ่านวงจรกรองพาสซีฟและใช้วิธีรีเฟอร์ซีฟเฟียฟตีในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกและจะแสดงให้เห็นถึงขนาด kVA ของวงจรกรองแอกทีฟที่ทำการต่ออนุกรมกับวงจรกรองพาสซีฟเป็นแบบไฮบริดนี้ว่าสามารถลดขนาด kVA ลงได้จริง เราจะทดสอบการทำงานของระบบโดยอาศัยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาตามที่กล่าวในบทที่ 4 โดยระบบที่ใช้ในการทดสอบนี้จะเป็นระบบ 3 เฟส 3 สาย 380 V 50Hz อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Z_s) มีค่าเป็น $j2.67\Omega$ (0.046 pu.) ต่อรวมกับโหลดวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟสควบคุมมุมจุดชนวนที่ 60 องศา ขนาด 2.5 kVA ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน 55Ω และตัวเหนี่ยวนำ 51mH วงจรกรองแอกทีฟสร้างแรงดันโดยอินเวอร์เตอร์ผ่านหม้อแปลง 2:1 เป็นตัวเชื่อมต่อกับระบบกำลัง

ผลการทดลองการทำงานของระบบที่จะนำเสนอในบทนี้จะแยกเป็นกลุ่มการทดลองเพื่อแสดงถึงความถูกต้องของทฤษฎีในการกำจัดฮาร์มอนิก ความเหมาะสมของตำแหน่งในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก ความถูกต้องของทฤษฎีในการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพ และผลการเปรียบเทียบขนาด kVA ของวงจรกรองแอกทีฟเมื่อทำการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบต่างๆ

5.1 การทดลองเมื่อไม่มีวงจรกรองแอกทีฟแต่มีวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูน

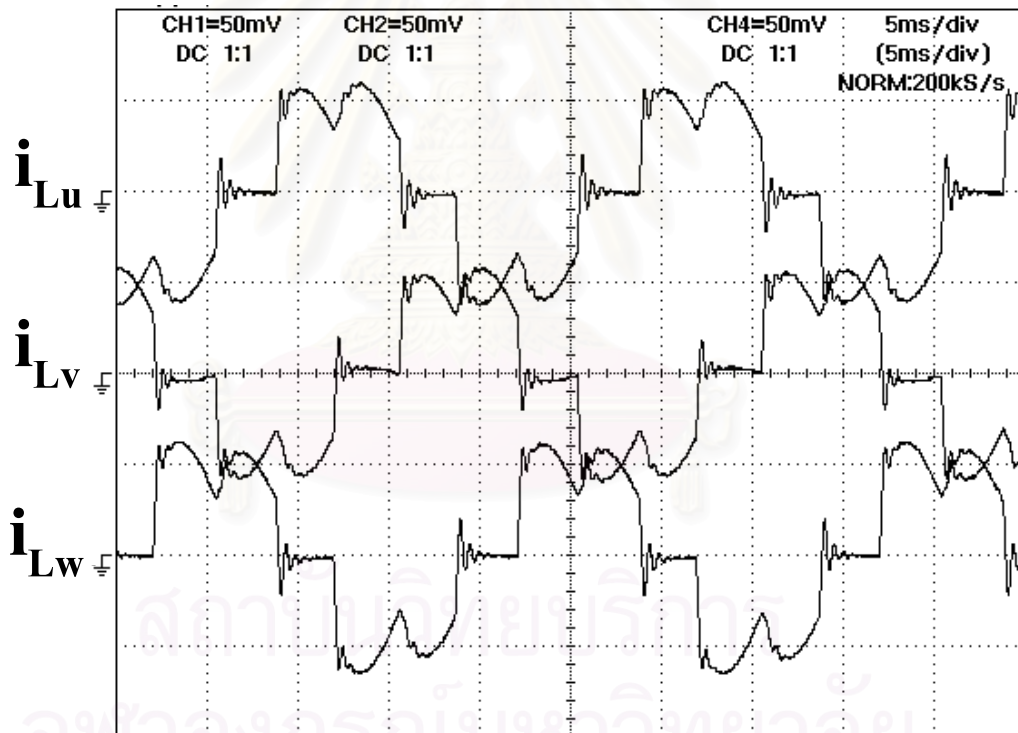
ในการทดลองนี้เราจะทำการทดลองระบบที่ไม่มีวงจรกรองแอกทีฟแต่ยังมีวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนอยู่ เพื่อจะดูผลของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่เกิดขึ้น ทั้งนี้เพื่อชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติการกรองของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูน

5.1.1 กรณีไม่ติดวงจรกรองแอกทีฟและวงจรกรองพาสซีฟในระบบ

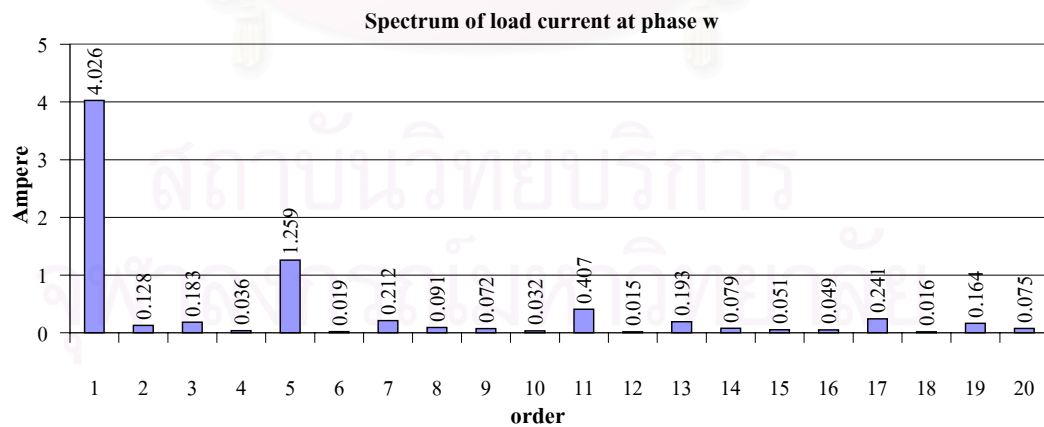
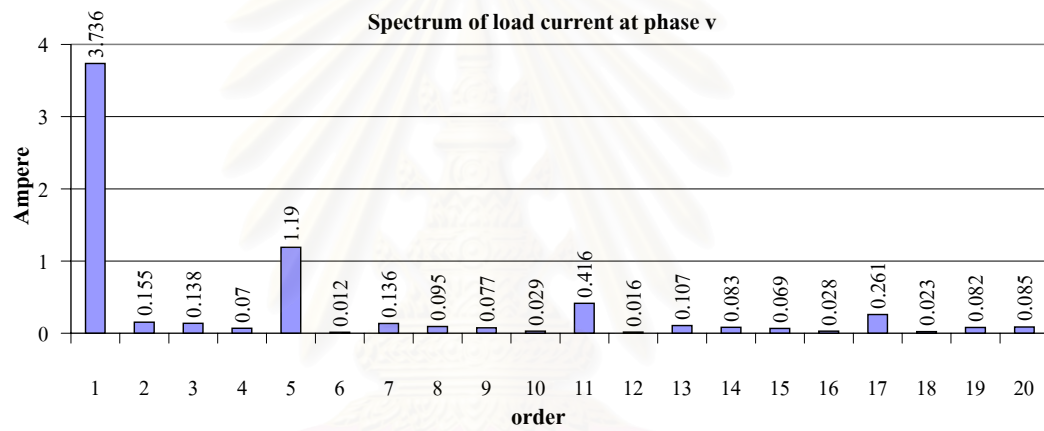
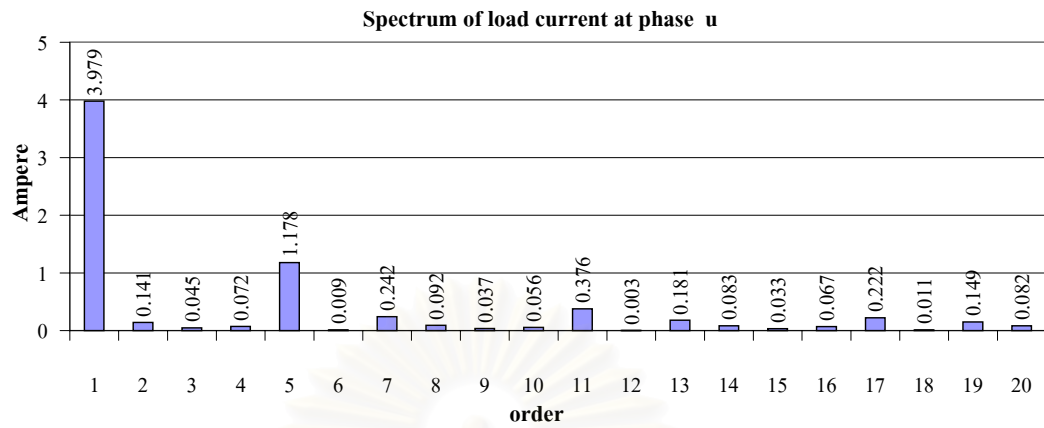
ผลการทดสอบการทำงานนี้ต้องการแสดงให้เห็นถึงลักษณะของกระแสฮาร์มอนิกทางด้านโหลดที่เกิดขึ้นในระบบ 3 เฟส โดยที่ในระบบสมดุลปกติทั่วไปจะไม่มีกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 เกิดขึ้นกล่าวคือฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 เป็นซีแควนซ์ศูนย์ แต่จากผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมของกระแส 3 เฟสของโหลดที่เกิดขึ้นดังในรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบเกิดไม่สมดุลทำให้ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 เกิดขึ้นได้ กล่าวคือฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ไม่เป็นซีแควนซ์ศูนย์

5.1.2 กรณีไม่ติดวงจรกรองแอคทีฟแต่มีวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูน

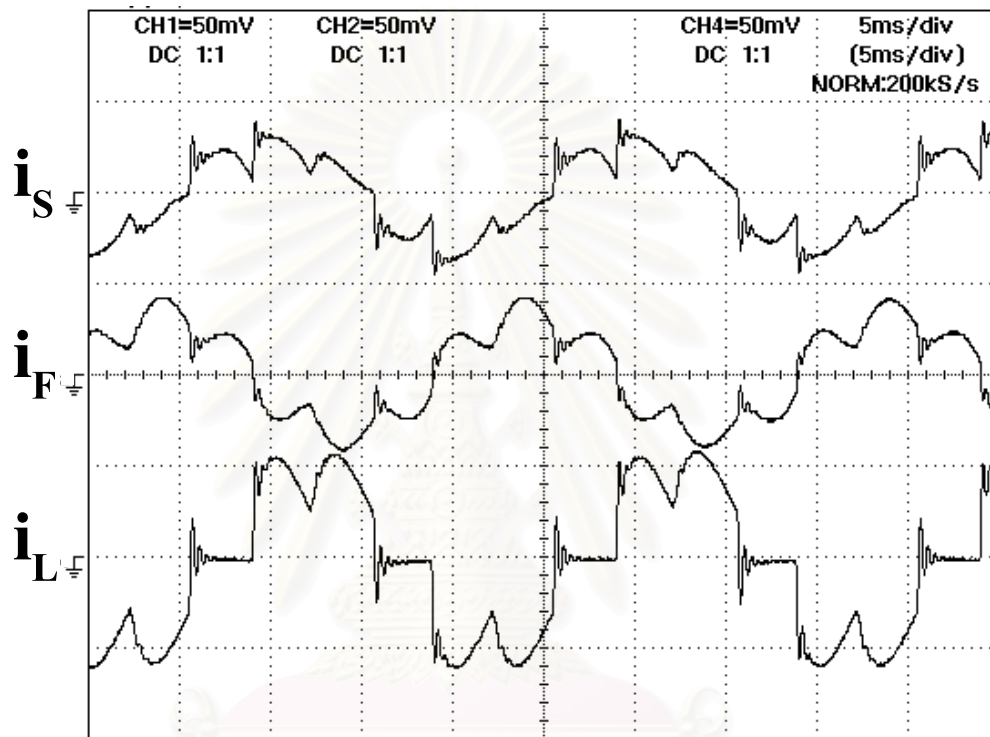
จะได้ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมของกระแส ณ ตำแหน่งต่างๆในระบบดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นว่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ที่เกิดขึ้นทางด้านแหล่งจ่ายจะมีขนาดใหญ่ขึ้น(0.297 A) ในขณะที่ทางด้านโหลดมีค่าเพียง 0.117 A ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากว่าวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนที่ใช้ในการทดลองนี้มีความถี่เรโซแนนซ์อยู่ประมาณอันดับที่ 4 ทำให้ระบบมีเรโซแนนซ์ขนานอยู่ใกล้ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ซึ่งถ้าในระบบที่สมดุลจะไม่มีฮาร์มอนิกที่ 3 เกิดขึ้นก็จะเป็นไร แต่ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าระบบเป็นแบบไม่สมดุลเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ขึ้นได้ตามที่กล่าวมาแล้ว จึงเกิดการขยายฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 นี้เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการพิจารณาฮาร์มอนิกอันดับสูงขึ้นไปก็จะพบว่ามีขนาดลดลงตามคุณสมบัติของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูน



รูปที่ 5.1 รูปคลื่นกระแสโหลดวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟสควบคุมมุมจุดชนวนที่ 60 องศาของระบบ (5A/div)

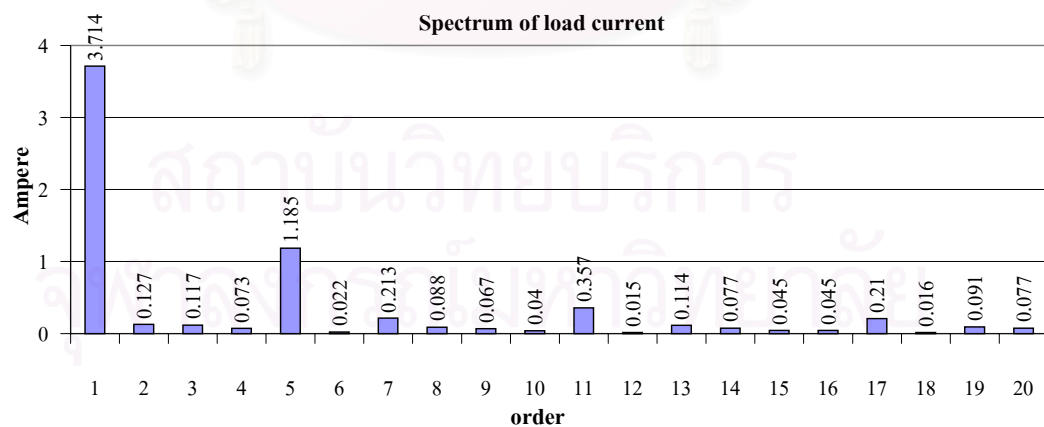
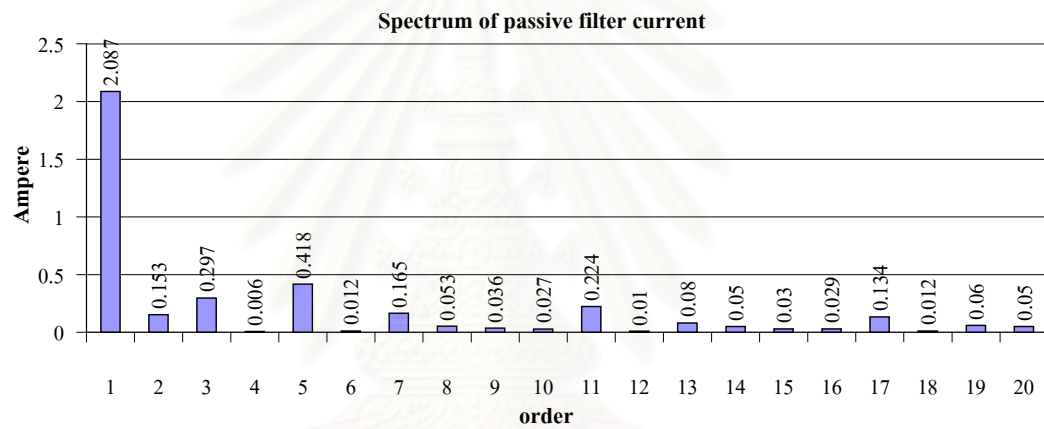
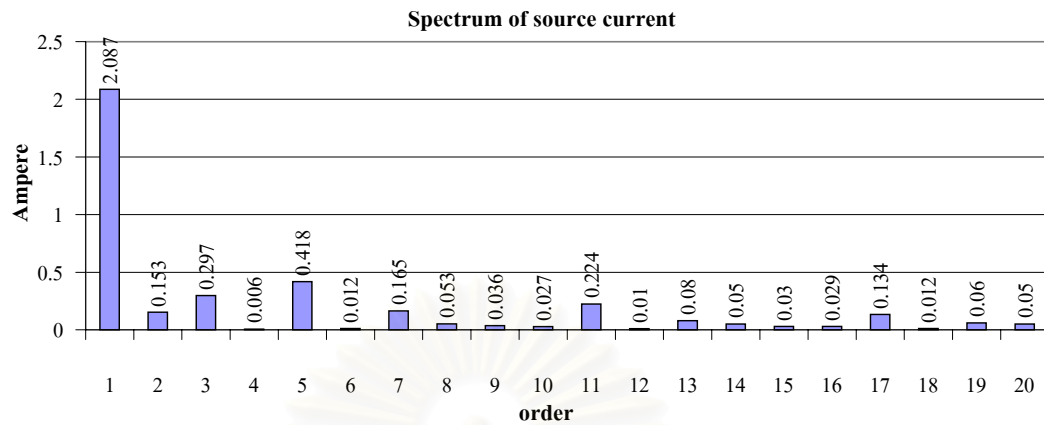


รูปที่ 5.2 สเปกตรัมของกระแสโหลดของระบบ 3 เฟส



รูปที่ 5.3 รูปคลื่นกระแสของระบบกรณีไม่ติดวงจรกรองแอกทีฟแต่มีวงจรกรองพาสซีฟแบบคัตจูน
(5A/div)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.4 สเปกตรัมของกระแสของระบบกรณีไม่ติดตั้งจรรองแอกทีฟแต่มีวงจรกรองพาสซีฟแบบคูลูน

5.2 การทดลองการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองพาสซีฟอนุกรมกับวงจรกรองแอกทีฟ

ในที่นี้เราจะทำการทดลองโดยให้วงจรกรองแอกทีฟกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 และเปรียบเทียบผลการทำงานเมื่อมีและไม่มีส่วนควบคุมป้อนกลับ ทั้งนี้เพื่อชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติการกรองของวงจรกรองพาสซีฟอนุกรมกับวงจรกรองแอกทีฟแบบไฮบริด และให้เห็นถึงคุณสมบัติการกรองที่ดีขึ้นเมื่อเราทำการเพิ่มส่วนควบคุมป้อนกลับเข้ามา

5.2.1 กรณีวงจรกรองแอกทีฟไม่มีส่วนวงจรควบคุมป้อนกลับ

ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆในระบบเป็นดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟในลักษณะนี้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ต้องการกำจัดออกไปได้ โดยพิจารณาได้จากค่ากระแสฮาร์มอนิกของอันดับที่ 5 และ 7 ที่ทำการกำจัด โดยกระแสทางด้านโหลดมีค่า 1.232 A และ 0.250 A จะลดลงเหลือ 0.172 A และ 0.120 A ที่กระแสทางด้านแหล่งจ่าย ตามลำดับ แต่เมื่อเราพิจารณาอัตราการลดทอนของกระแสฮาร์มอนิกในอันดับที่ทำการกำจัดจะพบว่า การลดทอนฮาร์มอนิกยังทำได้น้อย โดยสังเกตได้จากปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เหลืออยู่ทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อเทียบกับกระแสโหลด โดยที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5}$ มีค่าเท่ากับ 0.14 ในขณะที่ค่าอัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7}$ ของฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 มีค่าเท่ากับ 0.48 แสดงให้เห็นว่าวงจรกรองแอกทีฟที่ยังไม่มีส่วนควบคุมป้อนกลับนี้มีลักษณะสมบัติในการกรองฮาร์มอนิกยังได้ไม่ดี ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก ในทางปฏิบัติเกิดการคำนวณหาค่า L5 และ L7 คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ควรจะเป็น ส่งผลให้สร้างแรงดันที่จะมาหักล้างกับตัวเหนี่ยวนำจริงของวงจรกรองพาสซีฟแบบดิจิตอลผิดพลาด

5.2.2 กรณีวงจรกรองแอกทีฟมีส่วนควบคุมป้อนกลับ

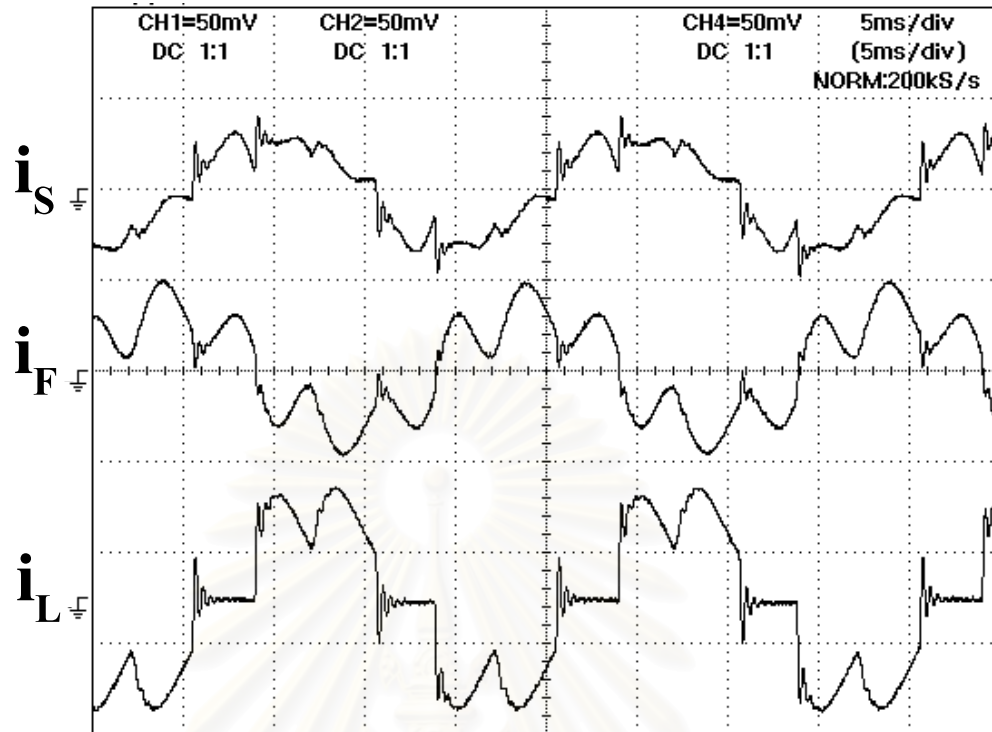
ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆในระบบเป็นดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ จากผลการทดสอบการทำงานที่ได้จะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟในลักษณะนี้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ต้องการกำจัดออกไปได้ โดยพิจารณาได้จากค่ากระแสฮาร์มอนิกของอันดับที่ 5 และ 7 ที่ทำการกำจัด โดยที่มีกระแสทางด้านโหลดมีค่า 1.163 A และ 0.230 A จะลดลงเหลือ 0.029 A และ 0.039 A ที่กระแสทางด้านแหล่งจ่ายตามลำดับ เราจะได้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มส่วนควบคุมป้อนกลับเข้ามา การลดทอนฮาร์มอนิกสามารถทำได้ดีขึ้น โดยมีอัตราการลดทอนของฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เป็น $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5}$ มีค่าเท่ากับ 0.025 ในขณะที่ค่าอัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7}$ ของฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 มีค่าเท่ากับ

0.17 แสดงให้เห็นว่าวงจรกรองแอกทีฟที่มีส่วนควบคุมป้อนกลับนี้มีลักษณะสมบัติในการกรองฮาร์มอนิกได้ดีขึ้น

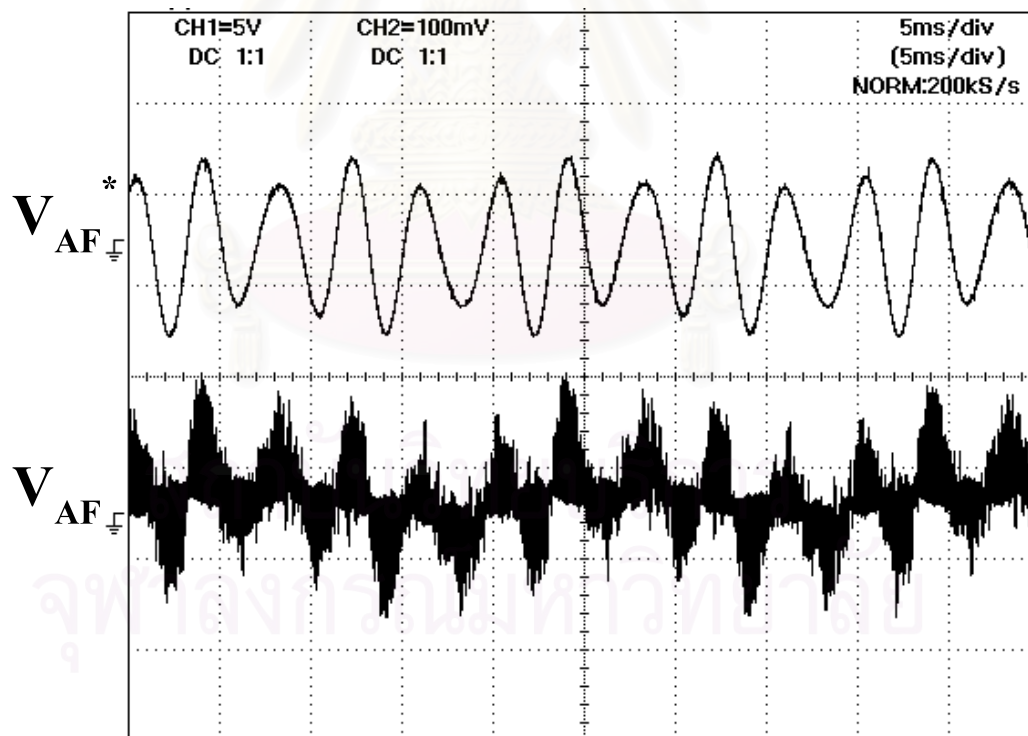
จากการทดลองเรายังสังเกตได้อีกว่าวงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดลักษณะนี้มีค่ากระแสองค์ประกอบมูลฐานมีขนาดลดลงเนื่องจากผลของคาปาซิเตอร์ของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นข้อดีของวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูนและกระแสฮาร์มอนิกอื่นๆ ในระบบที่ไม่ได้ทำการกำจัดจะไม่มีเปลี่ยนแปลง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

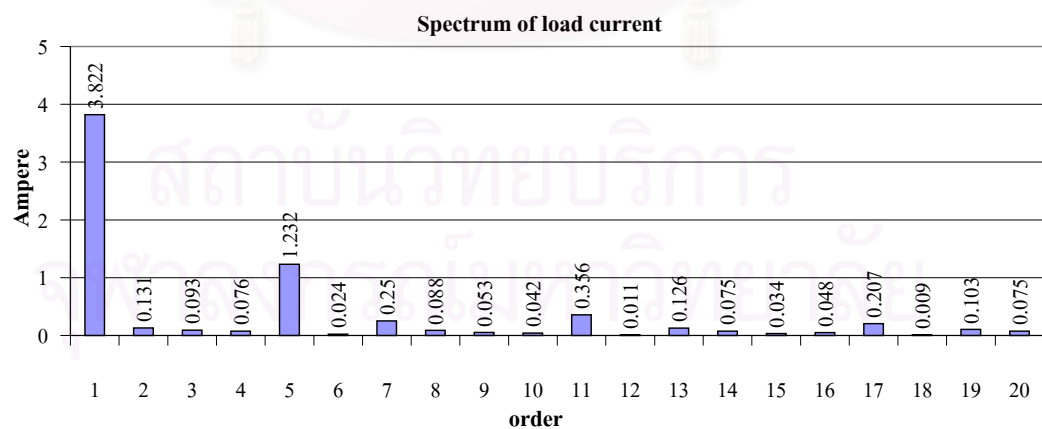
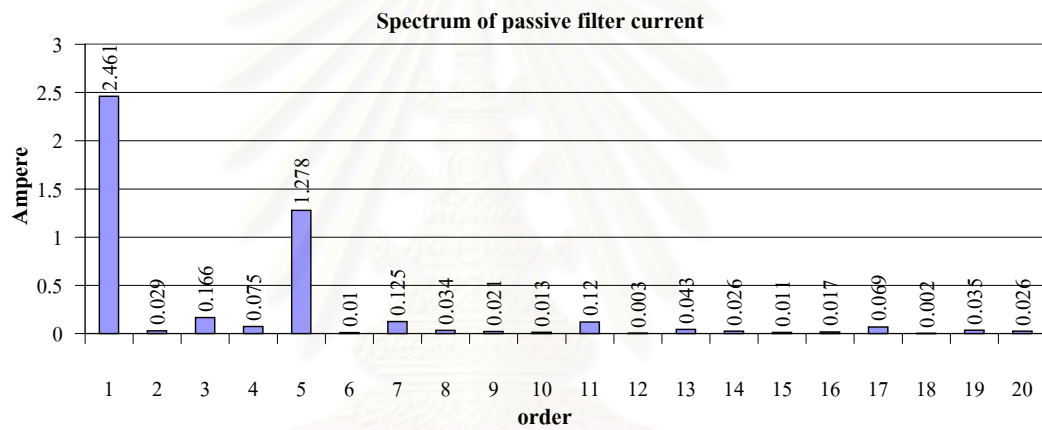
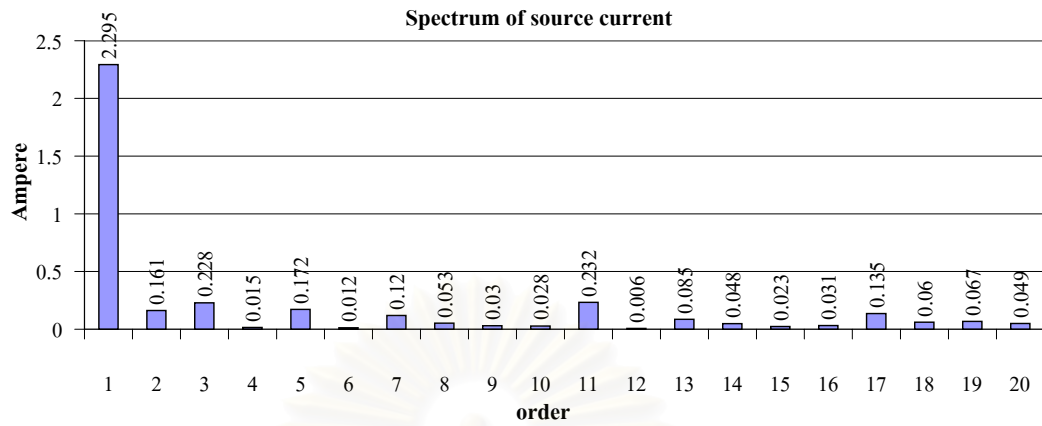


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)

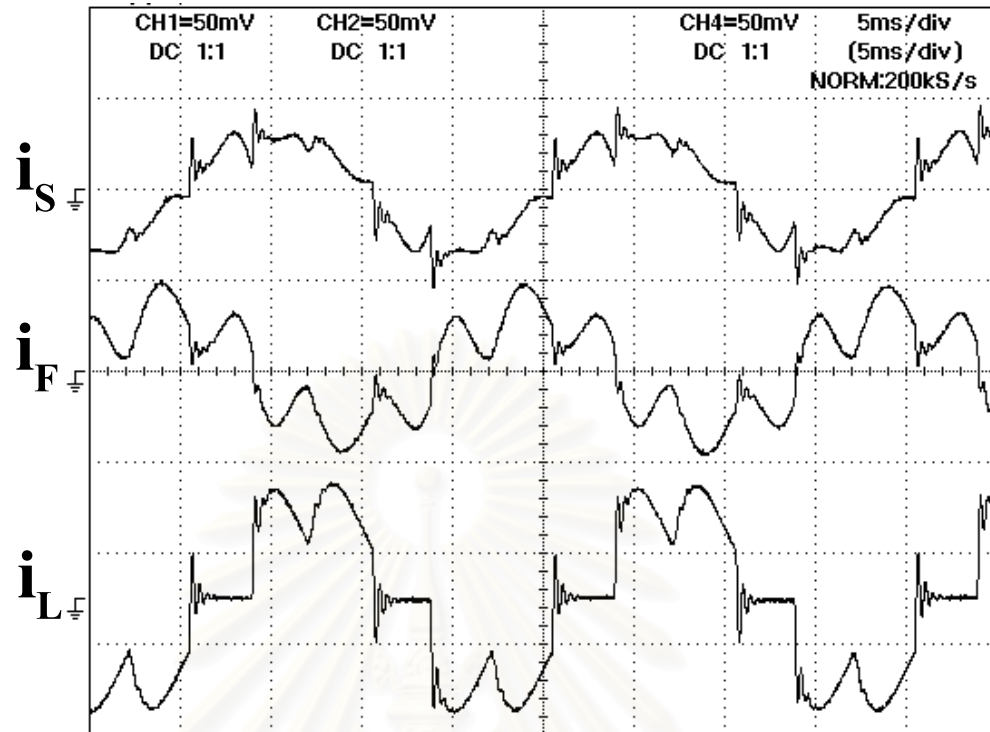


(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (50V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (50V/div)

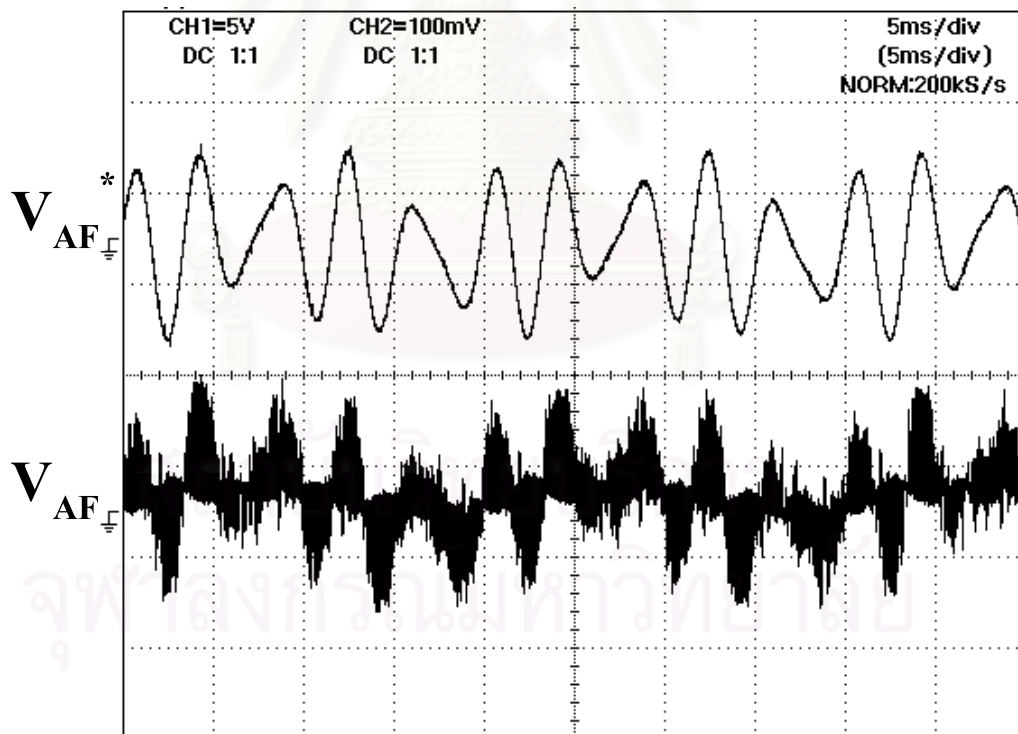
รูปที่ 5.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดครณีที่วงจรกรองแอกทีฟไม่มีส่วนควบคุมป้อนกลับ



รูปที่ 5.6 สเปกตรัมของกระแสของระบบที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดครณีที่วงจรกรองแอกทีฟไม่มีส่วนควบคุมป้อนกลับ

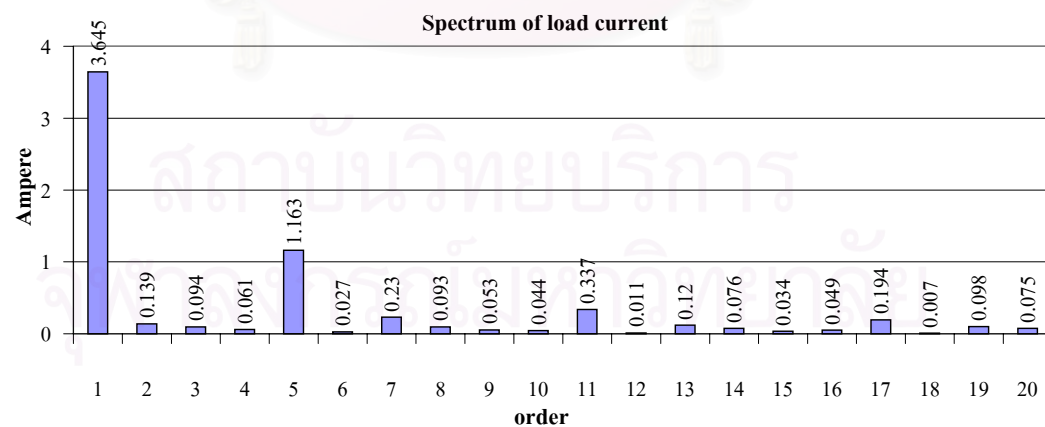
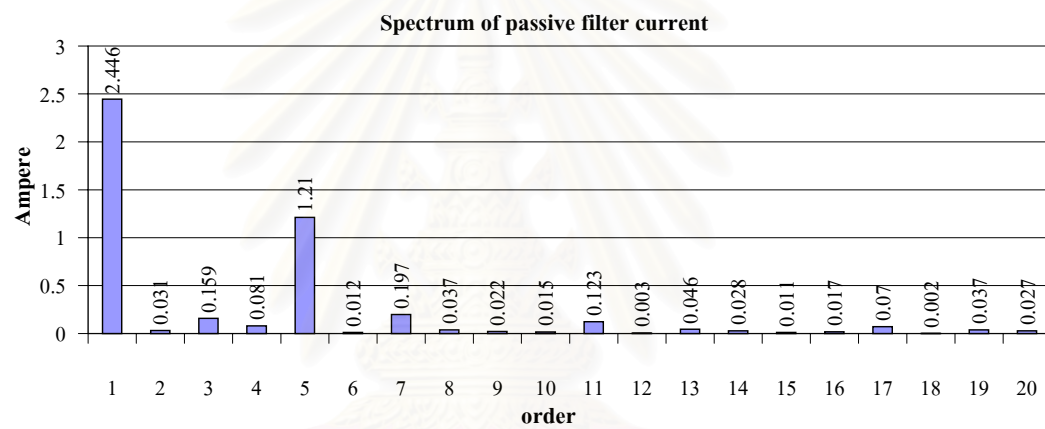
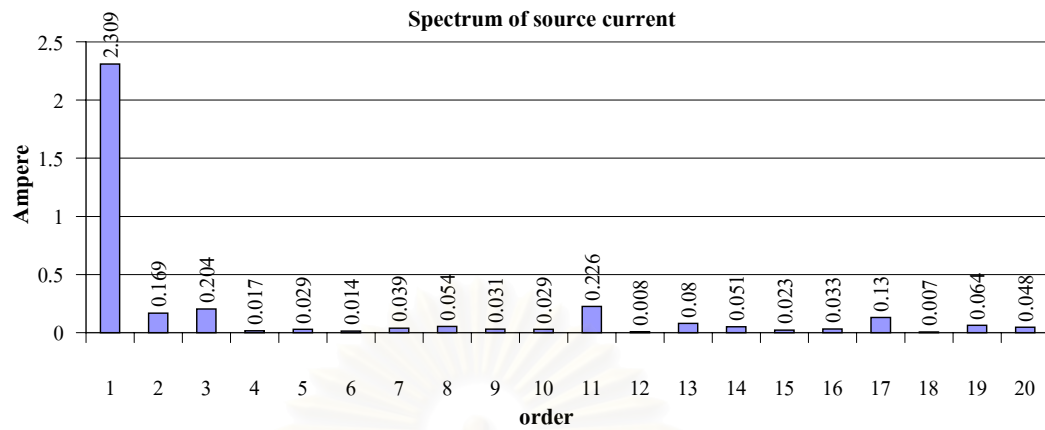


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)



(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (50V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (50V/div)

รูปที่ 5.7 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกรณีที่มีวงจรกรองแอกทีฟมีส่วนควบคุมป้อนกลับ



รูปที่ 5.8 สเปกตรัมของกระแสของระบบที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดครณีที่วงจรกรองแอกทีฟมีส่วนควบคุมป้อนกลับ

5.3 การทดลองศึกษาผลกระทบของค่าความผิดพลาดของอัตราขยายของอุปกรณ์ตรวจจับกระแส

ในหัวข้อนี้ เราจะทำการทดลองระบบเพื่อศึกษาผลของค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสที่มีต่อการกำจัดฮาร์มอนิก ตามที่ได้เสนอไปแล้วว่าในการตรวจจับกระแสสองจุดนั้น สามารถแก้ปัญหาระบบที่อุปกรณ์ตรวจจับกระแสมีค่าความผิดพลาดทางด้านแหล่งจ่ายแล้วทำให้คุณสมบัติการกรองของวงจรกรองแอกทีฟด้อยลง ไปนั้นสามารถแก้ปัญหานี้ได้

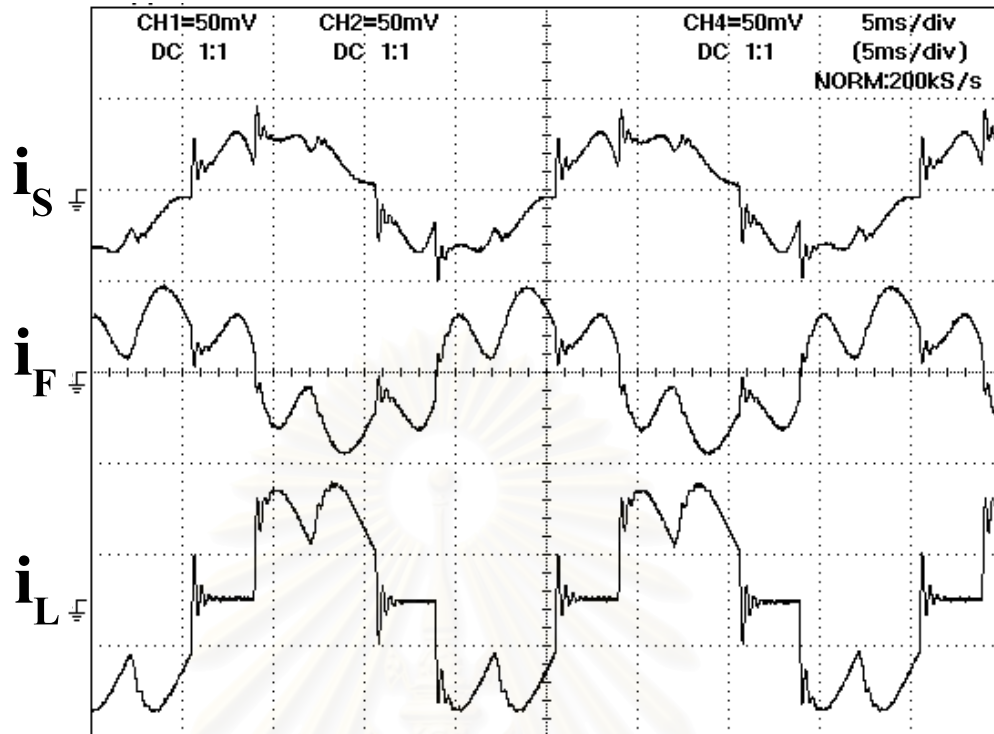
ในที่นี้เราจะทำการทดลองโดยให้วงจรกรองแอกทีฟกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 โดยให้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีค่าความผิดพลาดไป ± 20 เปอร์เซ็นต์ โดยเราจะเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลที่ได้ในหัวข้อ 5.2.2 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายไม่มีค่าความผิดพลาด

5.3.1 กรณีอุปกรณ์ตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีค่าความผิดพลาด +20 เปอร์เซ็นต์

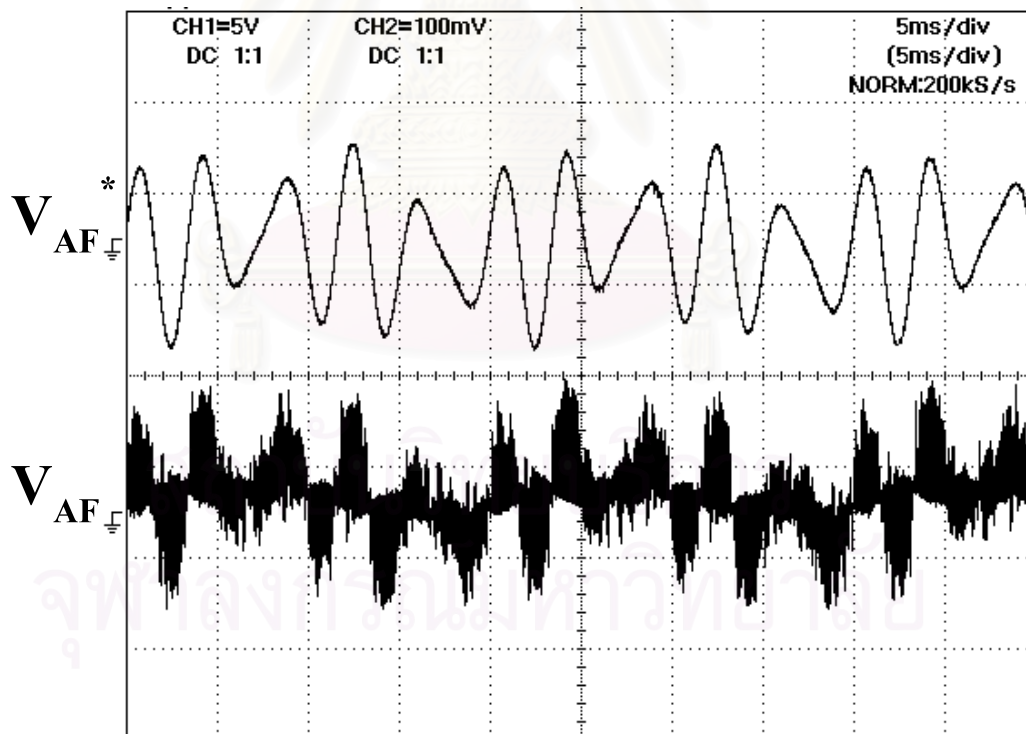
ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆในระบบเป็นดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ จากผลการทดสอบการทำงานจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟขานแบบไฮบริดนี้ยังสามารถกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ต้องการกำจัดออกไปได้ดีอยู่ โดยพิจารณาได้จากค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ที่ทำการกำจัด ทางด้านโหลดมีค่า 1.22 A และ 0.244 A จะลดลงเหลือ 0.023 A และ 0.038 A ที่กระแสทางด้านแหล่งจ่ายตามลำดับ โดยมีอัตราการลดทอนของฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เป็น $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5}$ มีค่าเท่ากับ 0.019 ในขณะที่ค่าอัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7}$ ของฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 มีค่าเท่ากับ 0.156 จากผลนี้เมื่อเราเปรียบเทียบกับผลการทดลองในข้อ 5.2.2 แล้วจะพบว่าวงจรกรองแอกทีฟลักษณะนี้ที่มีการตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายผิดพลาด ยังมีลักษณะสมบัติในการกรองฮาร์มอนิกได้ดีอยู่

5.3.2 กรณีอุปกรณ์ตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีค่าความผิดพลาด -20 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆในระบบเป็นดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ จากผลการทดสอบการทำงานจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟขานแบบไฮบริดนี้ยังสามารถกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ต้องการกำจัดออกไปได้ดีอยู่ โดยพิจารณาได้จากค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ที่ทำการกำจัด ทางด้านโหลดมีค่า 1.237 A และ 0.246 A จะลดลงเหลือ 0.039 A และ 0.044 A ที่กระแสทางด้านแหล่งจ่ายตามลำดับ โดยมีอัตราการลดทอนของฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เป็น $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5}$ มีค่าเท่ากับ 0.032 ในขณะที่ค่าอัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7}$ ของฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 มีค่าเท่ากับ 0.179 จากผลนี้เมื่อเราเปรียบเทียบกับผลการทดลองในข้อ 5.2.2 แล้วจะพบว่าวงจรกรองแอกทีฟลักษณะนี้ที่มีการตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายผิดพลาด ยังมีลักษณะสมบัติในการกรองฮาร์มอนิกได้ดีอยู่เช่นกัน

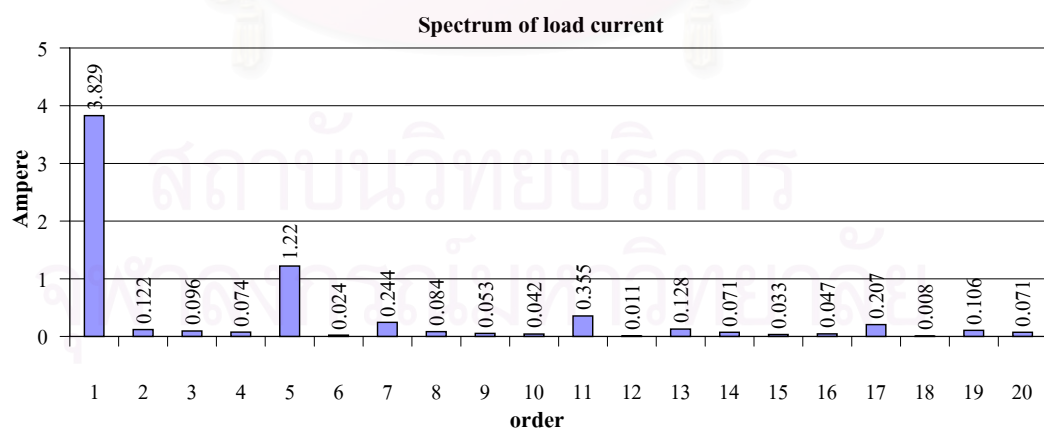
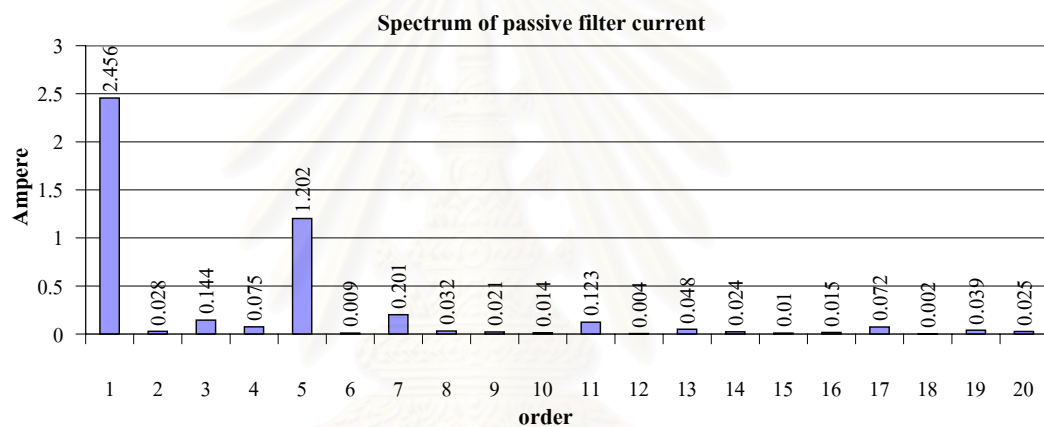
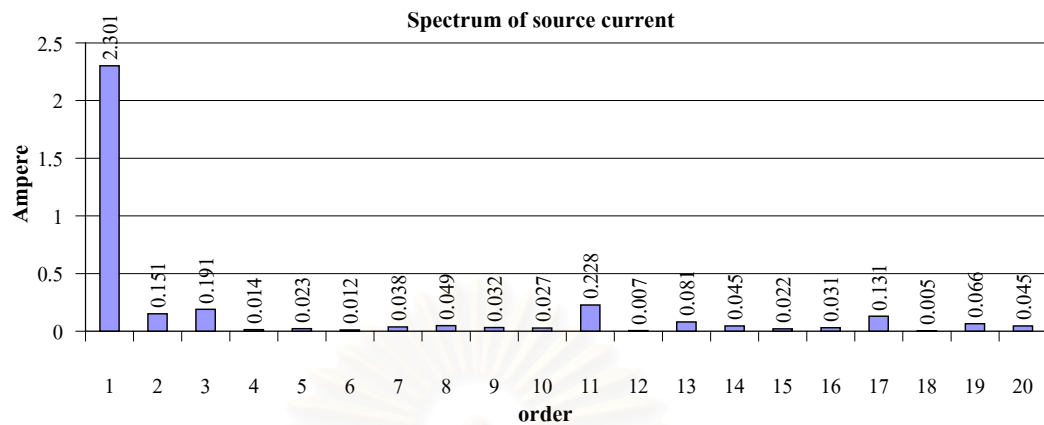


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)

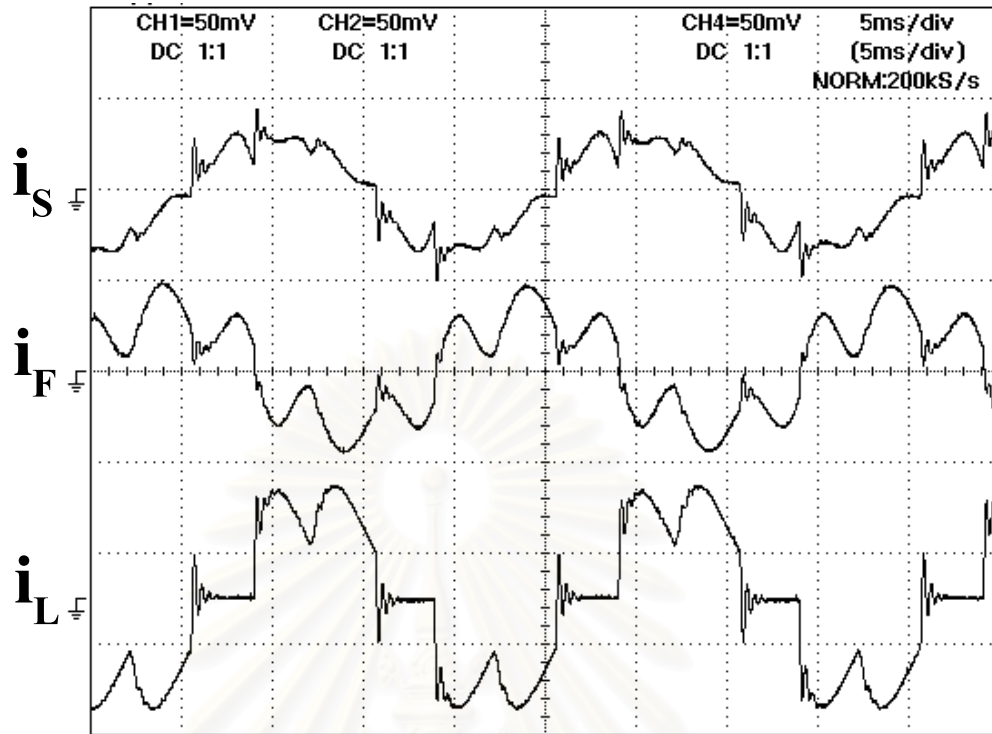


(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (50V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (50V/div)

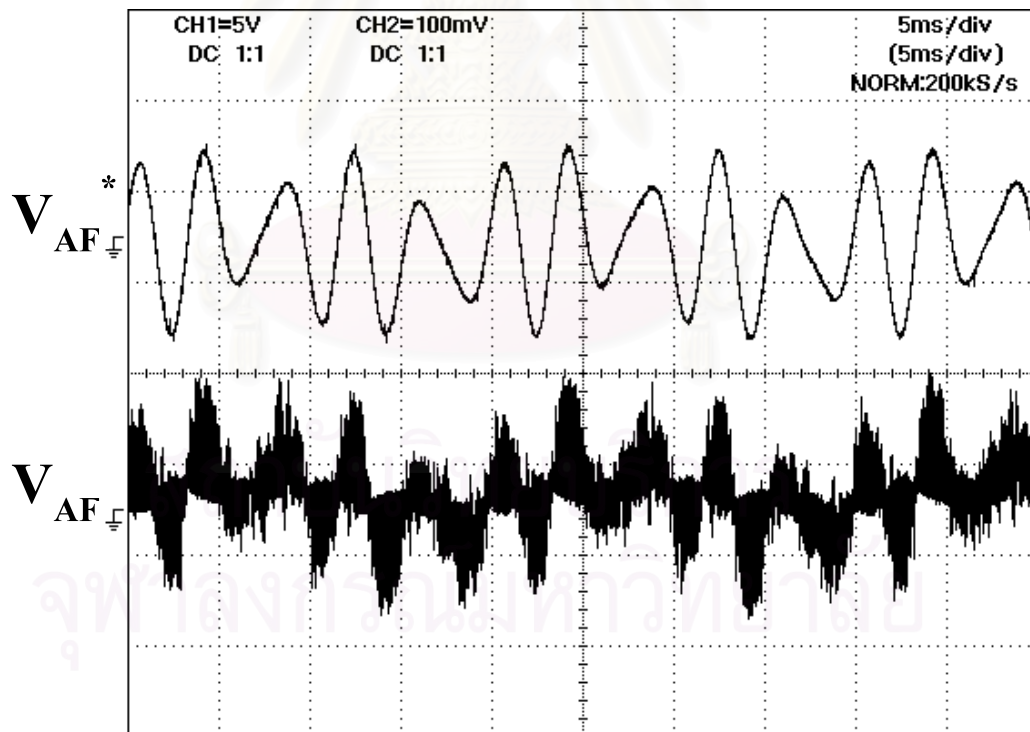
รูปที่ 5.9 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกรณีอุปกรณ์ตรวจ
จับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีความผิดพลาด +20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.10 สเปกตรัมของกระแสในระบบในกรณีที่อยู่ปรณัตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีค่าความผิดพลาด +20 เปอร์เซ็นต์

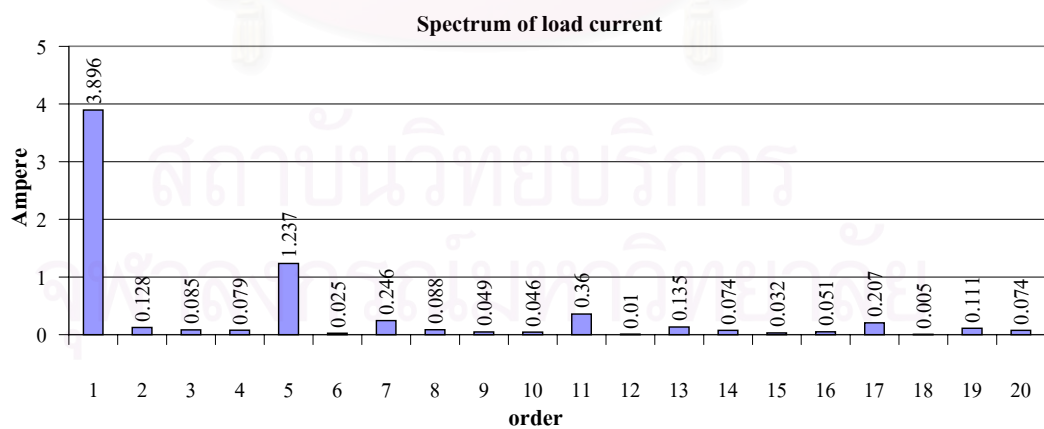
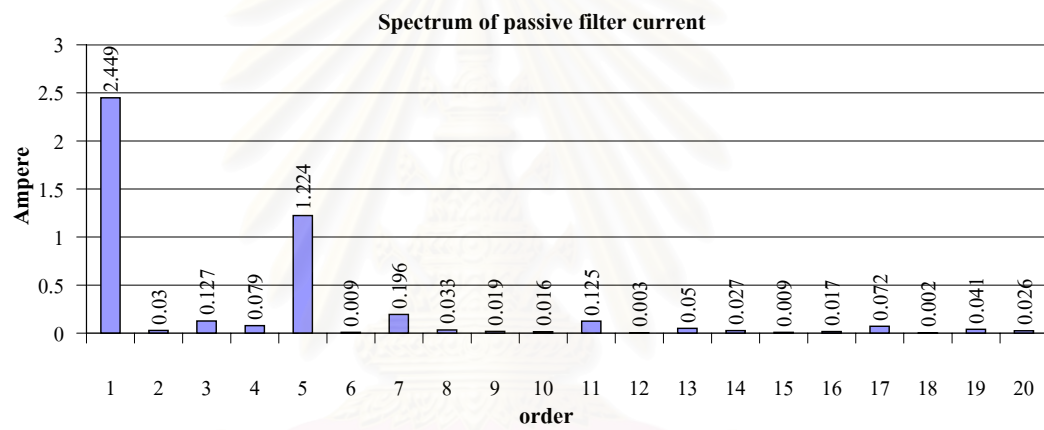
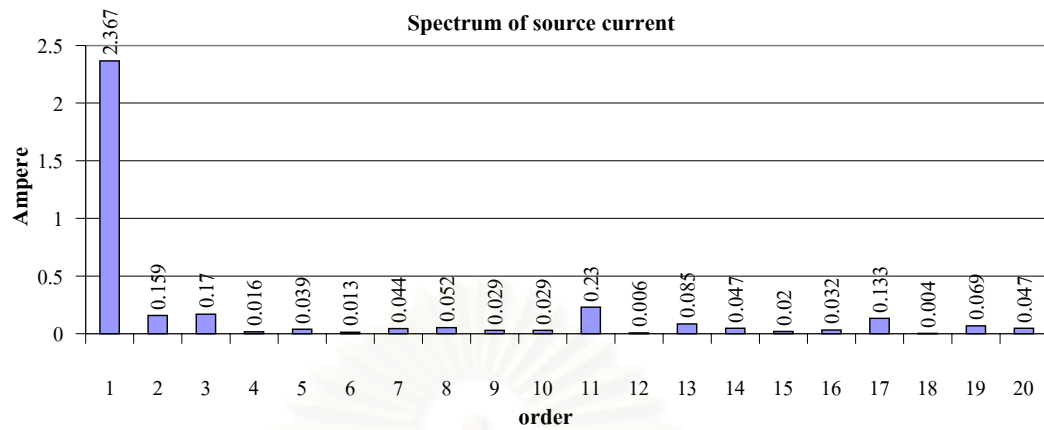


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)



(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (50V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (50V/div)

รูปที่ 5.11 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกรณีอุปกรณ์ตรวจ
จับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีความผิดพลาด -20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.12 สเปกตรัมของกระแสในระบบในกรณีที่อยู่ปรณต์ตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีค่าความผิดพลาด -20 เปอร์เซ็นต์

5.4 การทดลองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ

ในการทดลองกลุ่มนี้ เราจะทำการทดลองผลการกำจัดฮาร์มอนิกในลักษณะต่างๆ ตั้งแต่ กำจัดฮาร์มอนิก 1 อันดับ กำจัดฮาร์มอนิก 2 อันดับพร้อมกัน จนถึงกำจัดกระแสฮาร์มอนิก 6 อันดับพร้อมกัน ทั้งนี้เพื่อชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติการกรองที่ดีของวงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดนี้ ว่าสามารถกำจัดฮาร์มอนิกอันดับใดก็ได้ และสามารถกำจัดหลายอันดับพร้อมกัน โดยที่อันดับของฮาร์มอนิกไม่จำเป็นต้องติดกัน

5.4.1 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ละ 1 อันดับ

5.4.1.1 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่น สัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.13 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.14 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟลักษณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จาก 1.235 A เหลือ 0.019 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5}$ มีค่าเท่ากับ 0.015

5.4.1.2 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 7

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่น สัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.15 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.16 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟลักษณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 จาก 0.253 A เหลือ 0.038 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7}$ มีค่าเท่ากับ 0.15

5.4.1.3 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 11

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่น สัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.17 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.18 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟลักษณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 จาก 0.379 A เหลือ 0.028 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=11}$ มีค่าเท่ากับ 0.074

5.4.2 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิก 2 อันดับพร้อมกัน

5.4.2.1 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 7 และ 11

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่น สัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.19 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.20 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแยกที่ลักษณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 และ 11 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 จาก 0.253 A เหลือ 0.046 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7}$ มีค่าเท่ากับ 0.182 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ลดลงจาก 0.380 A เหลือ 0.038 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=11}$ มีค่าเท่ากับ 0.1

5.4.2.2 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5 และ 11

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่น สัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.21 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.22 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแยกที่ลักษณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 11 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จาก 1.216 A เหลือ 0.032 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5}$ มีค่าเท่ากับ 0.026 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ลดลงจาก 0.360 A เหลือ 0.032 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=11}$ มีค่าเท่ากับ 0.089

5.4.3 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิก 3 อันดับพร้อมกัน

5.4.3.1 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 7 และ 11

ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่น สัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.23 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.24 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแยกที่ลักษณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จาก 1.223 A เหลือ 0.038 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5}$ มีค่าเท่ากับ 0.031 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ลดลงจาก 0.249 A เหลือ 0.039 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7}$ มีค่าเท่ากับ 0.157 และกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ลดลงจาก 0.375 A เหลือ 0.035 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=11}$ มีค่าเท่ากับ 0.093

5.4.4 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิก 4 อันดับพร้อมกัน

5.4.4.1 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 7, 11 และ 13

ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.25 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.26 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแยกที่ฟลักซ์ขณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 11 และ 13 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จาก 1.192 A เหลือ 0.024 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5}$ มีค่าเท่ากับ 0.02 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ลดลงจาก 0.239 A เหลือ 0.056 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7}$ มีค่าเท่ากับ 0.23 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ลดลงจาก 0.349 A เหลือ 0.013 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=11}$ มีค่าเท่ากับ 0.037 และกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 ลดลงจาก 0.118 A เหลือ 0.030 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=13}$ มีค่าเท่ากับ 0.254

5.4.4.2 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 11, 13, 17 และ 19

ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.27 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.28 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแยกที่ฟลักซ์ขณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 13 17 และ 19 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 จาก 0.354 A เหลือ 0.005 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=11}$ มีค่าเท่ากับ 0.014 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 ลดลงจาก 0.135 A เหลือ 0.039 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=13}$ มีค่าเท่ากับ 0.289 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 17 ลดลงจาก 0.199 A เหลือ 0.010 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=17}$ มีค่าเท่ากับ 0.05 และกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 19 ลดลงจาก 0.086 A เหลือ 0.027 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=19}$ มีค่าเท่ากับ 0.314

5.4.4.3 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 11, 17 และ 19

ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.29 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.30 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแยกที่ฟลักซ์ขณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 11 17 และ 19 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จาก 1.199 A เหลือ 0.017 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5}$ มีค่าเท่ากับ 0.014 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ลดลงจาก 0.350 A เหลือ 0.015 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=11}$ มีค่าเท่ากับ 0.043 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 17 ลดลงจาก

0.187 A เหลือ 0.032 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=17}$ มีค่าเท่ากับ 0.171 และกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 19 ลดลงจาก 0.082 A เหลือ 0.013 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=19}$ มีค่าเท่ากับ 0.159

5.4.5 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิก 5 อันดับพร้อมกัน

5.4.5.1 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 7, 11, 13 และ 17

ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.31 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.32 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟลักษณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 11 13 และ 17 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จาก 1.221 A เหลือ 0.020 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5}$ มีค่าเท่ากับ 0.016 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ลดลงจาก 0.254 A เหลือ 0.055 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7}$ มีค่าเท่ากับ 0.217 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ลดลงจาก 0.357 A เหลือ 0.022 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=11}$ มีค่าเท่ากับ 0.062 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 ลดลงจาก 0.134 A เหลือ 0.029 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=13}$ มีค่าเท่ากับ 0.216 และกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 17 ลดลงจาก 0.209 A เหลือ 0.038 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=17}$ มีค่าเท่ากับ 0.182

5.4.5.2 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 11, 13, 17 และ 19

ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.33 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.34 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟลักษณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 11 13 17 และ 19 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จาก 1.203 A เหลือ 0.015 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5}$ มีค่าเท่ากับ 0.012 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ลดลงจาก 0.344 A เหลือ 0.019 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=11}$ มีค่าเท่ากับ 0.055 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 ลดลงจาก 0.125 A เหลือ 0.023 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=13}$ มีค่าเท่ากับ 0.184 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 17 ลดลงจาก 0.197 A เหลือ 0.037 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=17}$ มีค่าเท่ากับ 0.188 และกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 19 ลดลงจาก 0.082 A เหลือ 0.016 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=19}$ มีค่าเท่ากับ 0.195

5.4.5.3 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับที่ 7, 11, 13, 17 และ 19

ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.35 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.36 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟลักษณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 11 13 17 และ 19 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 จาก 0.258 A เหลือ 0.049 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7}$ มีค่าเท่ากับ 0.19 กระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 11 ลดลงจาก 0.358 A เหลือ 0.029 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=11}$ มีค่าเท่ากับ 0.081 กระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 13 ลดลงจาก 0.132 A เหลือ 0.032 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=13}$ มีค่าเท่ากับ 0.242 กระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 17 ลดลงจาก 0.204 A เหลือ 0.039 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=17}$ มีค่าเท่ากับ 0.191 และกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 19 ลดลงจาก 0.088 A เหลือ 0.014 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=19}$ มีค่าเท่ากับ 0.159

5.4.6 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์โมนิก 6 อันดับพร้อมกัน

5.4.6.1 วงจรกรองกำจัดกระแสฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับที่ 5 ถึง อันดับที่ 19

ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบเป็นดังรูปที่ 5.37 และสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสในกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.38 เราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟลักษณะนี้ สามารถลดกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 7 11 13 17 และ 19 ได้ตามต้องการโดยจะลดกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 จาก 1.178 A เหลือ 0.017 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=5}$ มีค่าเท่ากับ 0.014 กระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 จาก 0.247 A เหลือ 0.055 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=7}$ มีค่าเท่ากับ 0.223 กระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 11 ลดลงจาก 0.341 A เหลือ 0.020 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=11}$ มีค่าเท่ากับ 0.059 กระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 13 ลดลงจาก 0.124 A เหลือ 0.034 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=13}$ มีค่าเท่ากับ 0.274 กระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 17 ลดลงจาก 0.193 A เหลือ 0.032 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=17}$ มีค่าเท่ากับ 0.166 และกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 19 ลดลงจาก 0.080 A เหลือ 0.018 A อัตราการลดทอน $|i_{sh}|/|i_{Lh}|_{h=19}$ มีค่าเท่ากับ 0.225

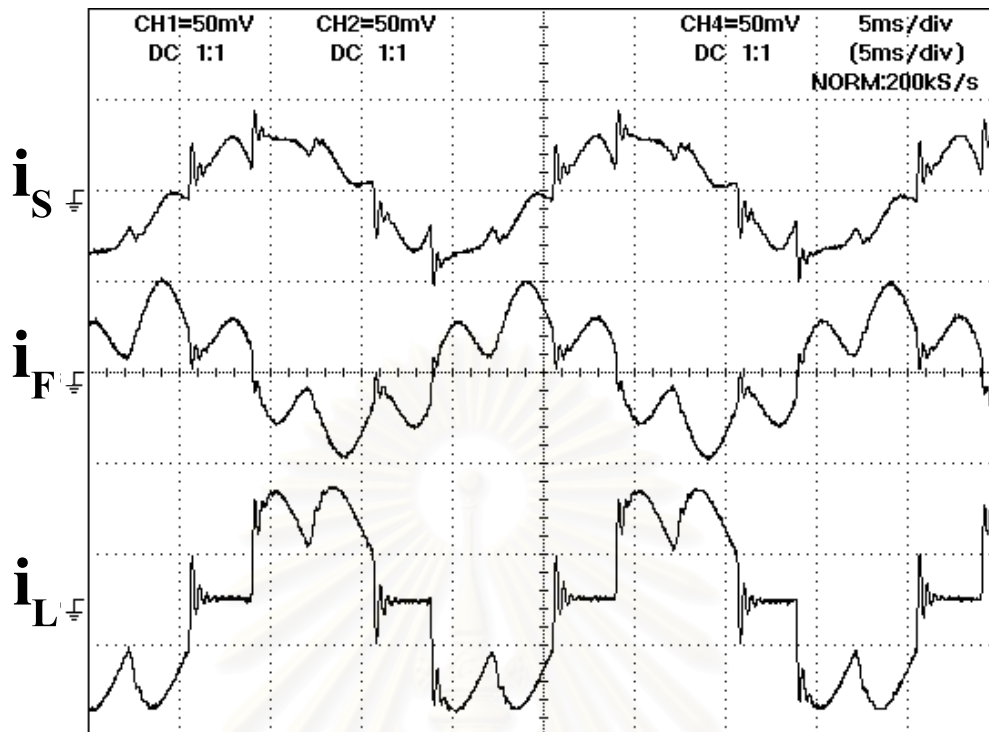
ผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าวงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดนี้ สามารถกำจัดกระแสฮาร์โมนิกของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายพร้อมกันได้หลายอันดับตามที่เราต้องการกำจัด โดยที่เราสามารถกำจัดฮาร์โมนิกอันดับใดก็ได้โดยไม่ต้องมีอันดับที่เรียงกัน

หรือติดกัน และสามารถลดกระแสฮาร์โมนิกในอันดับที่ทำการกำจัดให้อยู่ภายในมาตรฐานของ IEC 1000-3-2 Class A ที่กำหนดได้ดังแสดงตามตารางที่ 5.1 ซึ่งในตารางจะแสดงค่าของกระแสฮาร์โมนิกที่อันดับต่างๆ ที่มาตรฐาน IEC 1000-3-2 Class A ต้องการซึ่งมีขนาดอยู่ที่ 16 A แต่เนื่องจากโหลดที่เราใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดเล็กกว่าอยู่ที่ค่า 3.8 A ดังนั้นเราจะเทียบขนาดกระแสฮาร์โมนิกทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสฮาร์โมนิกทางด้านโหลดให้มีอัตราส่วนเดียวกันกับมาตรฐานของ IEC 1000-3-2 Class A โดยคูณอัตราส่วนขนาดของกระแสฮาร์โมนิกทางด้านแหล่งจ่ายและทางด้านโหลดเพิ่มอีก 4.2 จากค่าที่วัดได้

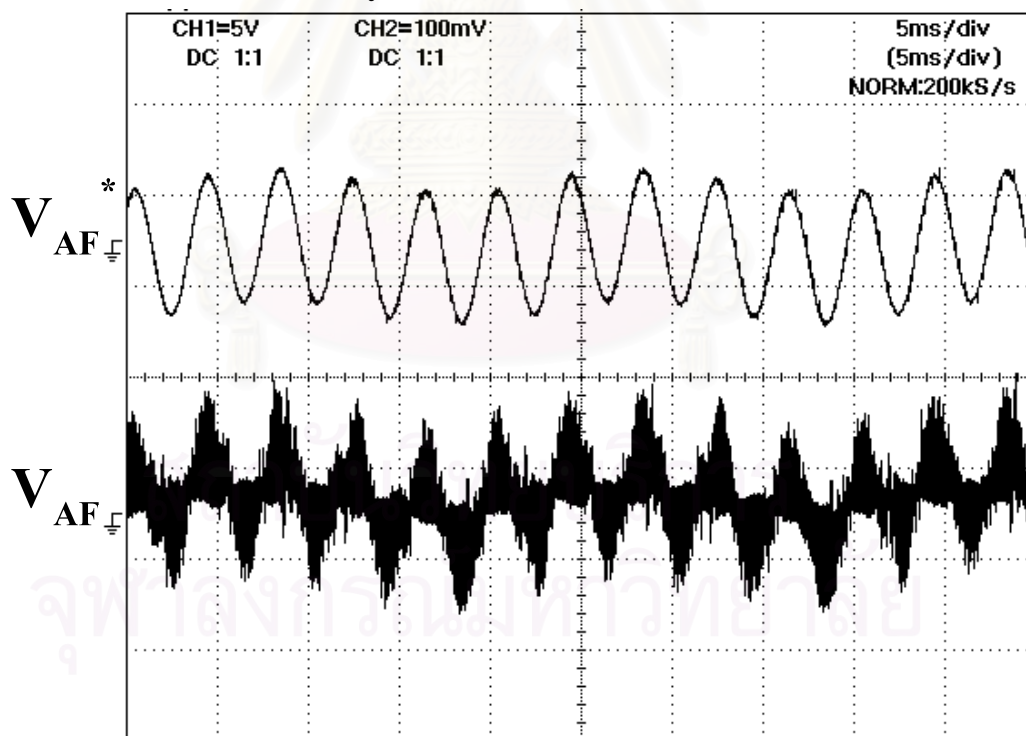
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบกระแสฮาร์โมนิกทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อกำจัดฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ กับมาตรฐานของ IEC 1000-3-2 Class A

อันดับที่ของฮาร์โมนิก	5	7	11	13	17	19
ค่ากระแสฮาร์โมนิกมาตรฐาน IEC 1000-3-2 Class A (Amp.)	1.14	0.77	0.33	0.21	0.13	0.12
ค่ากระแสฮาร์โมนิกทางด้านโหลดเมื่อเทียบอัตราส่วน (Amp.)	5.19	0.94	1.48	0.54	0.87	0.45
อันดับฮาร์โมนิกที่ทำการกำจัด						
5	0.08	0.74	0.95	0.35	0.56	0.28
5,7	0.12	0.16	0.95	0.34	0.55	0.27
5,7,11	0.16	0.16	0.15	0.29	0.55	0.26
5,7,11,13	0.10	0.23	0.05	0.12	0.51	0.27
5,7,11,13,17	0.08	0.23	0.09	0.12	0.15	0.23
5,7,11,13,17,19	0.07	0.23	0.08	0.14	0.13	0.08

หมายเหตุ: อุปกรณ์เครื่องวัดกระแสฮาร์โมนิกที่ใช้มีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ ± 0.084 A

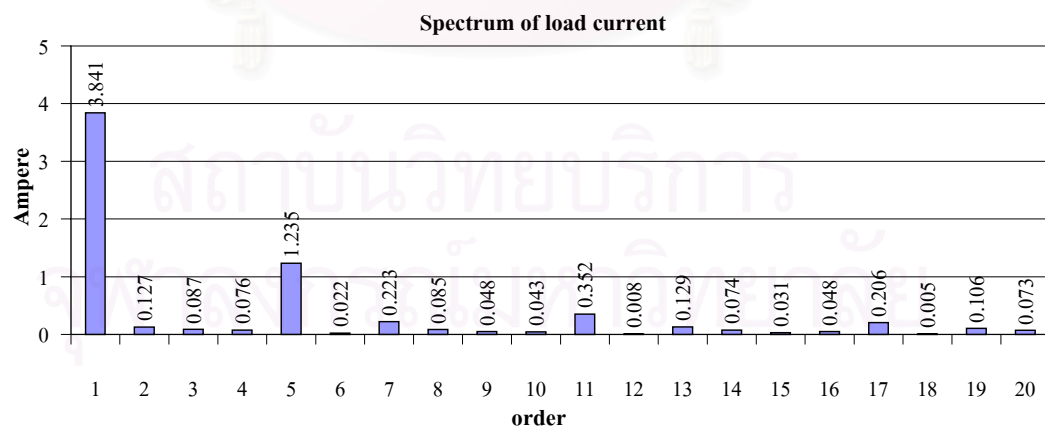
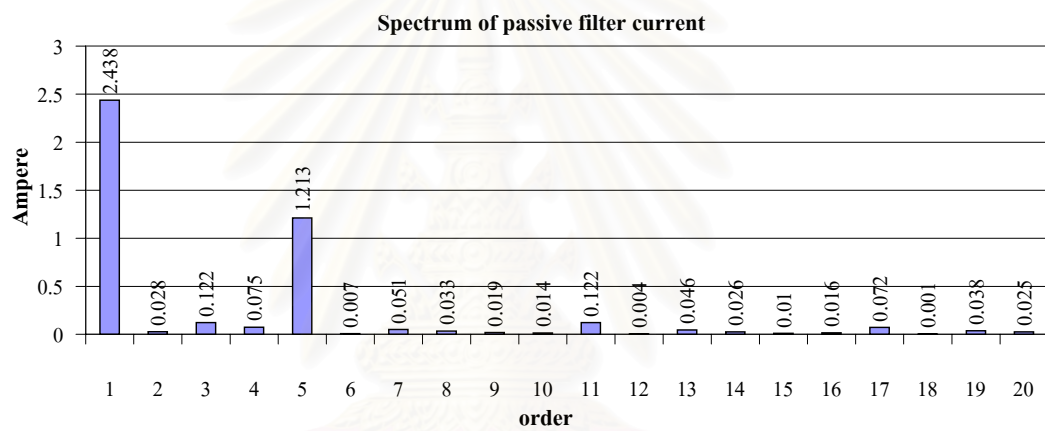
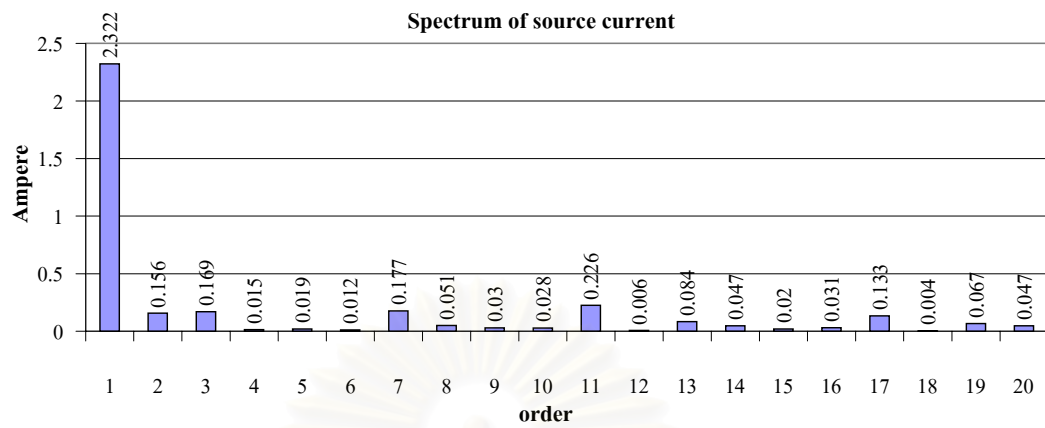


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)

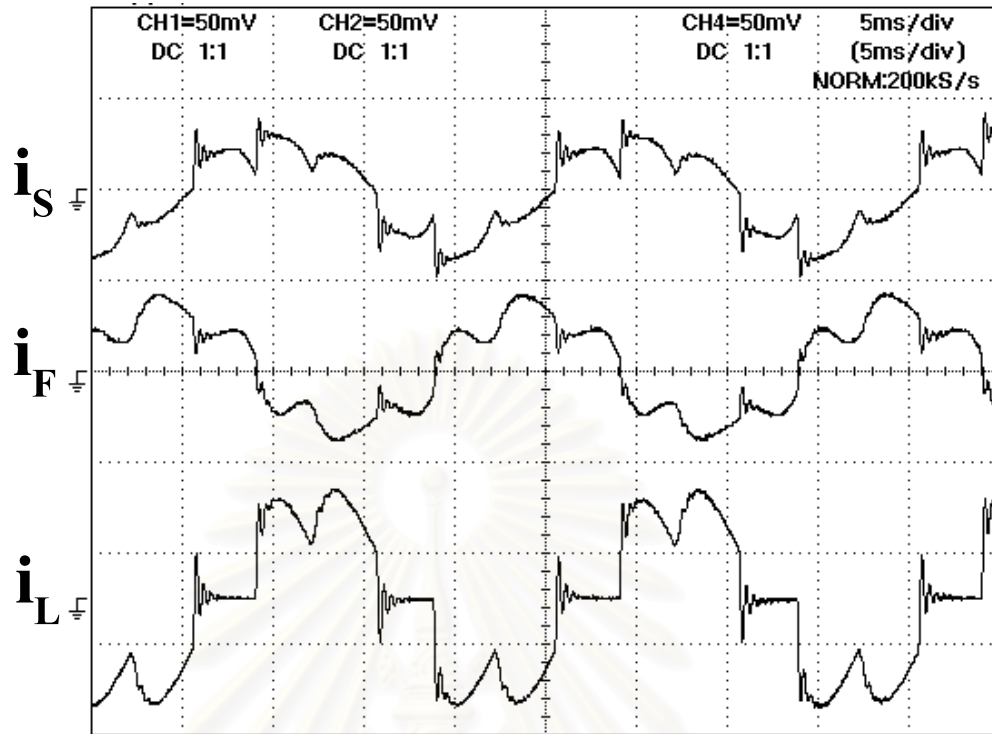


(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (50V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (50V/div)

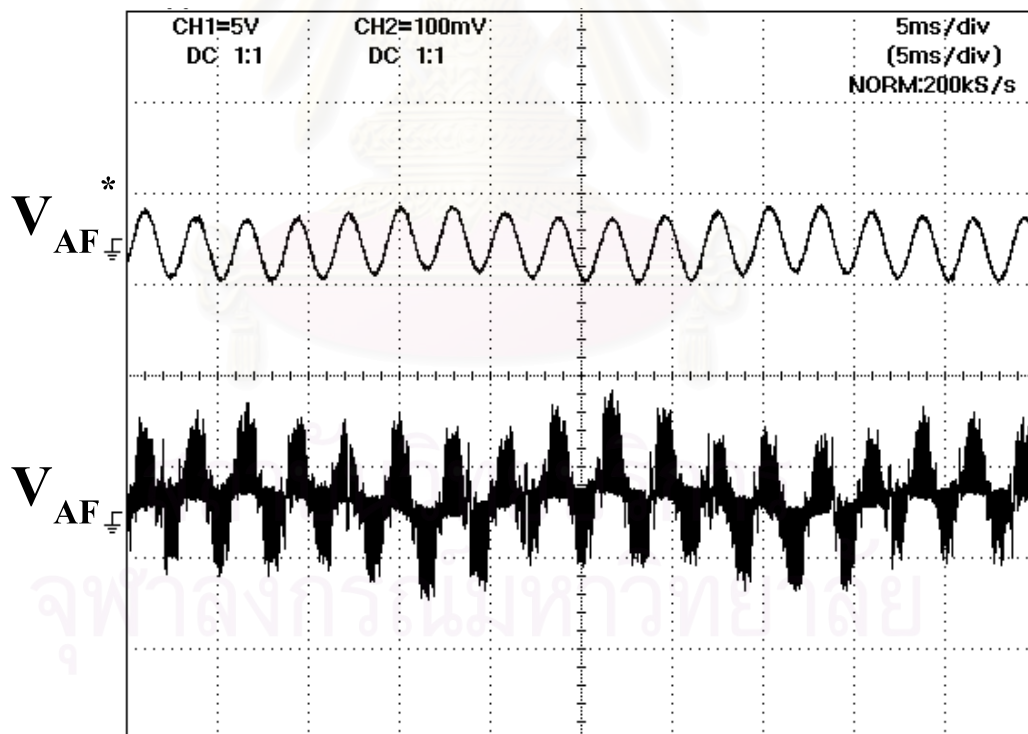
รูปที่ 5.13 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5



รูปที่ 5.14 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช่วงจรกรองแอกที่ฟิซิกานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับที่ 5

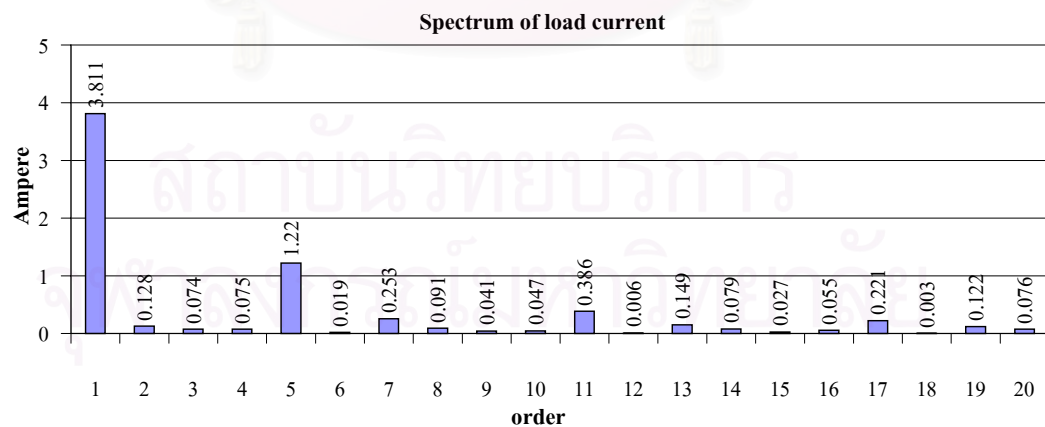
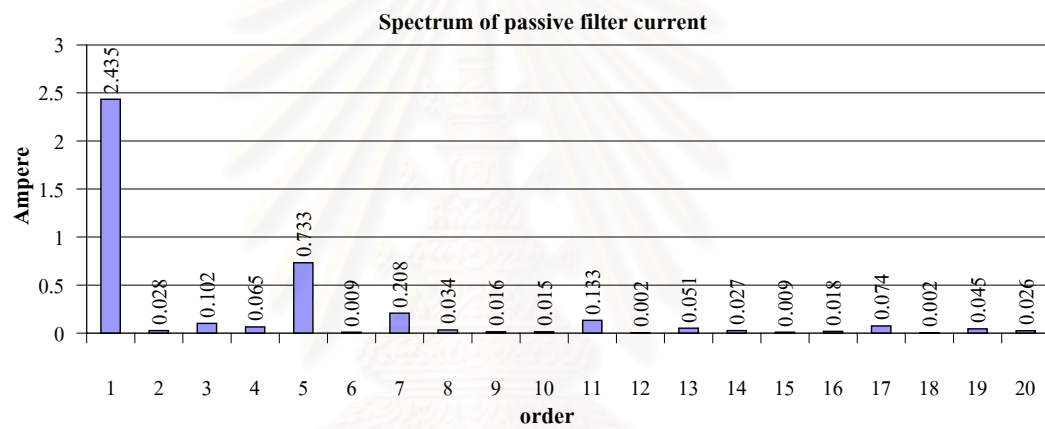
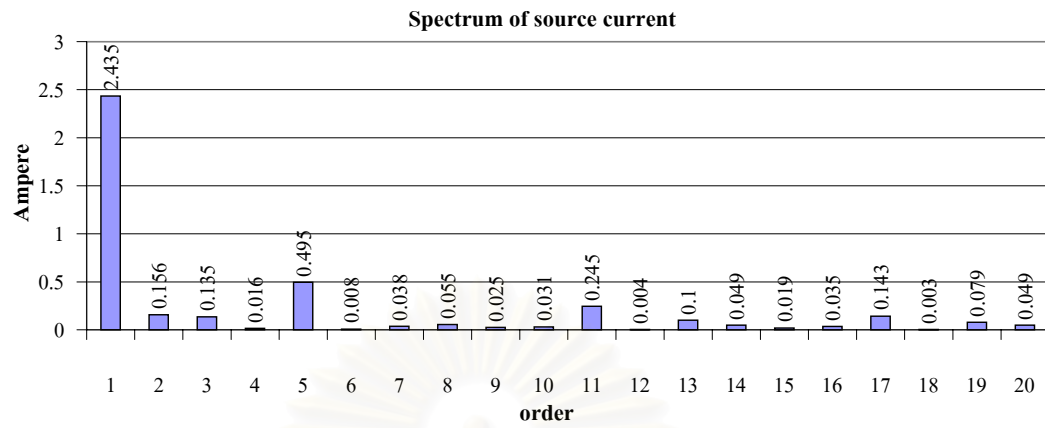


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)

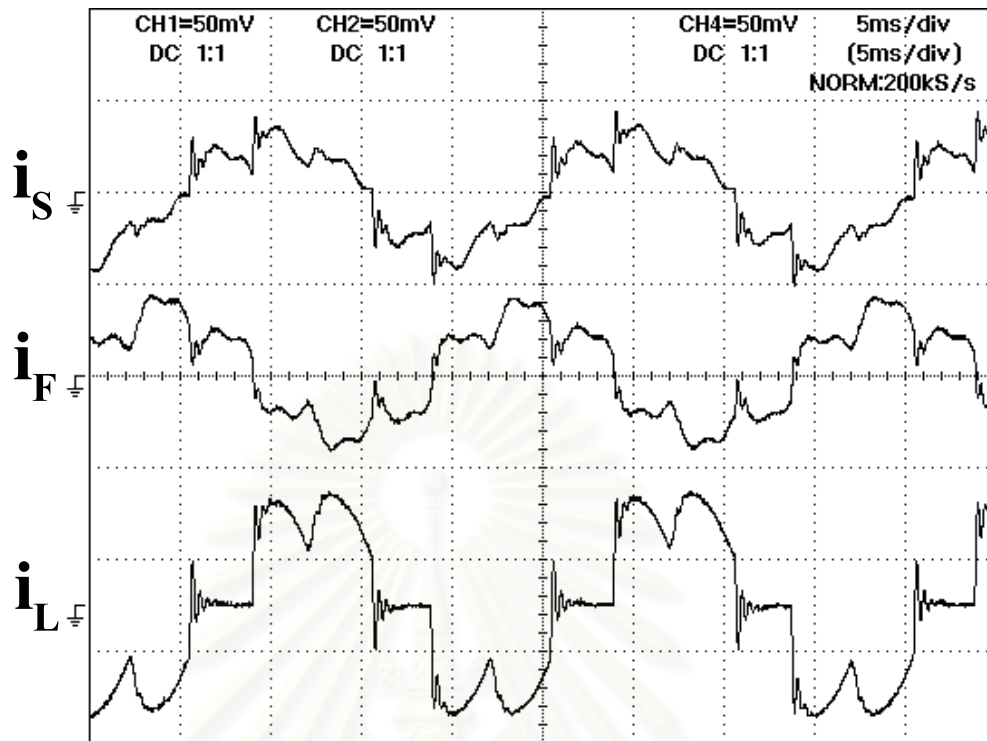


(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (50V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (50V/div)

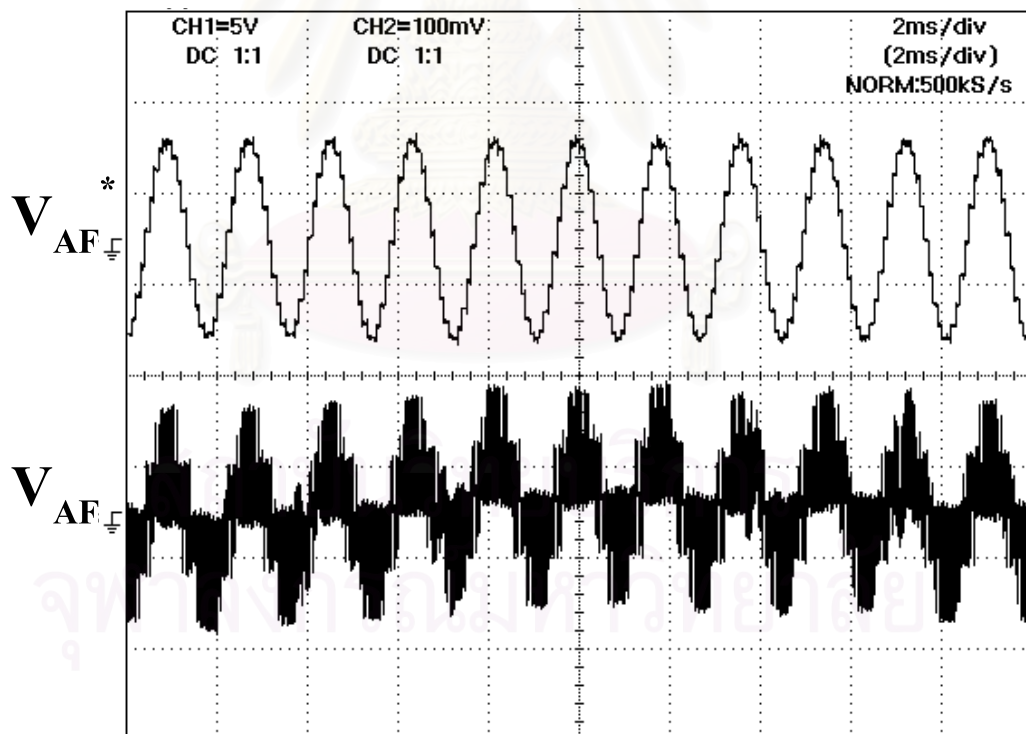
รูปที่ 5.15 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช่วงจรกรองแอกทีฟพิกานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับที่ 7



รูปที่ 5.16 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้งานกรองแอกทีฟขนาดแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 7

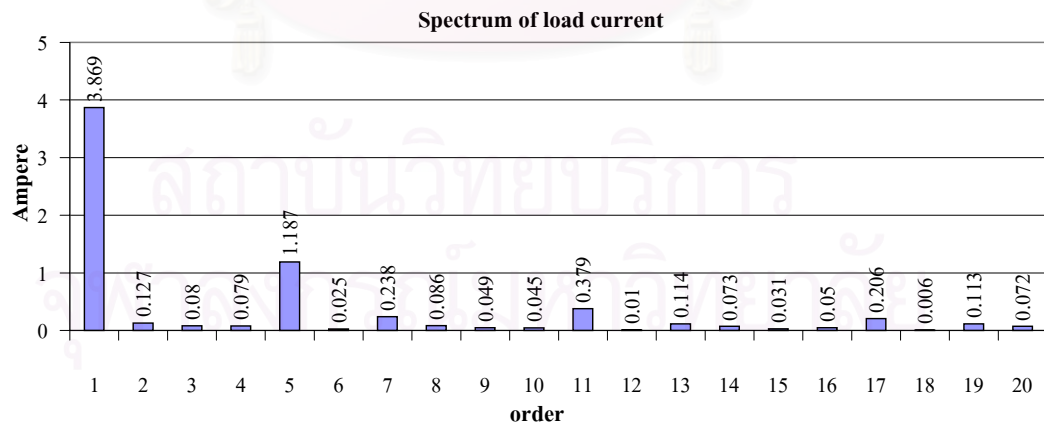
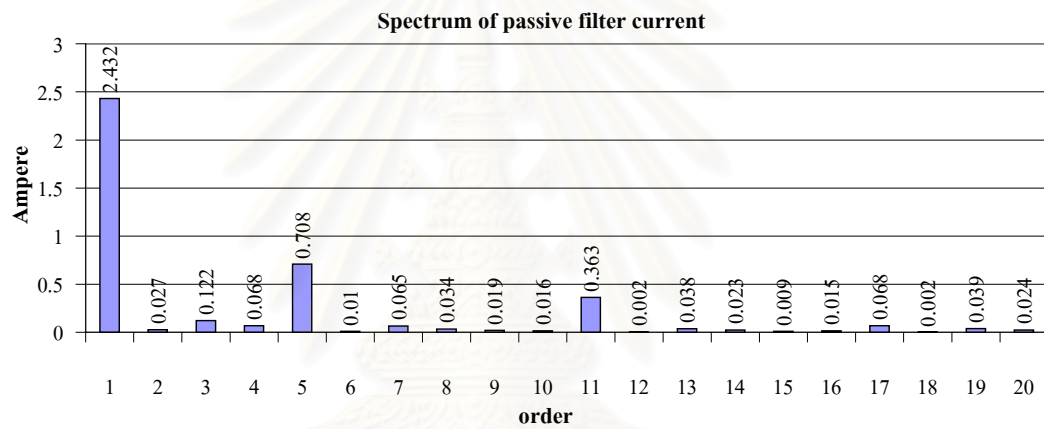
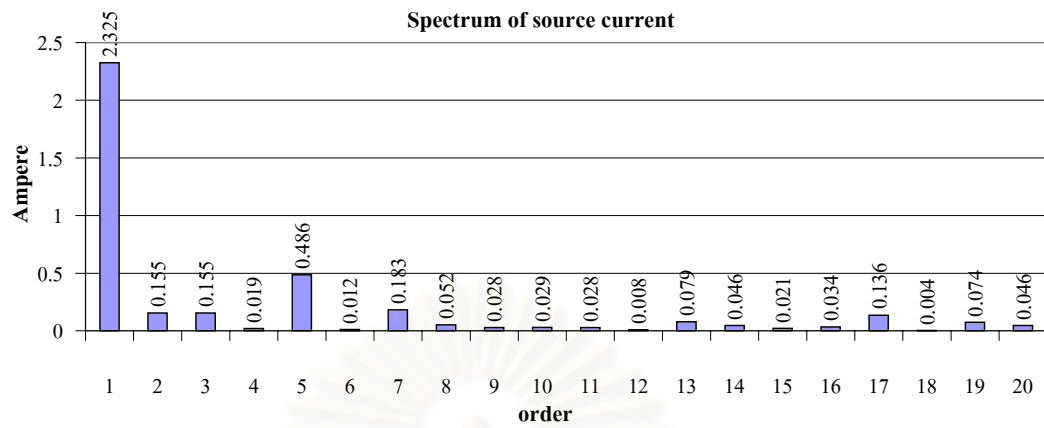


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)

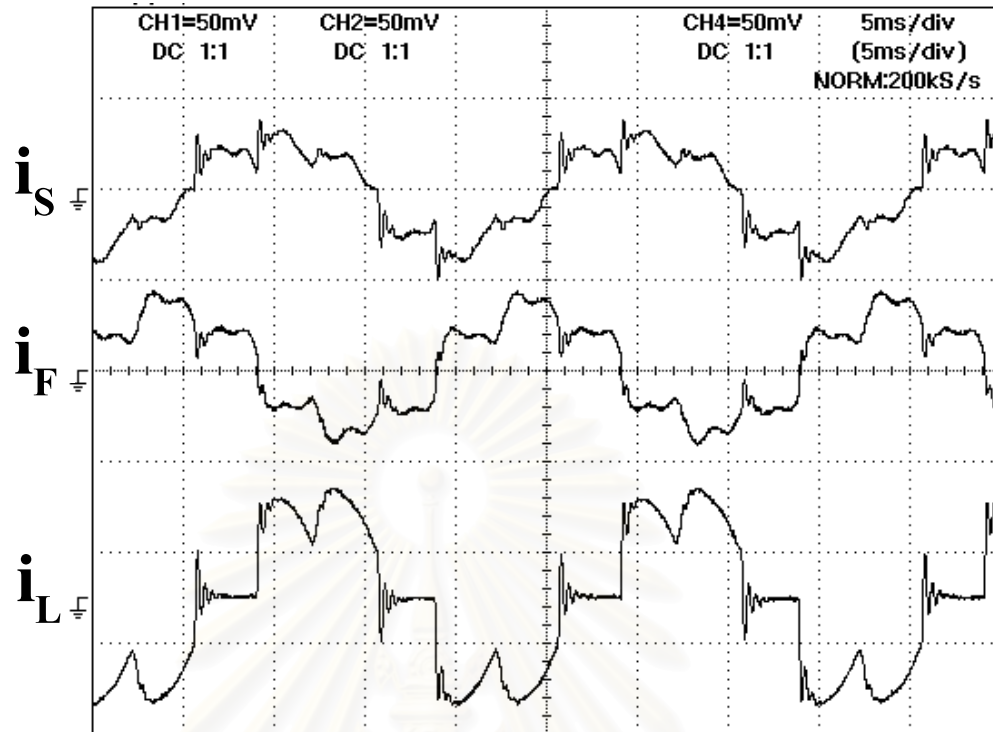


(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (50V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (50V/div)

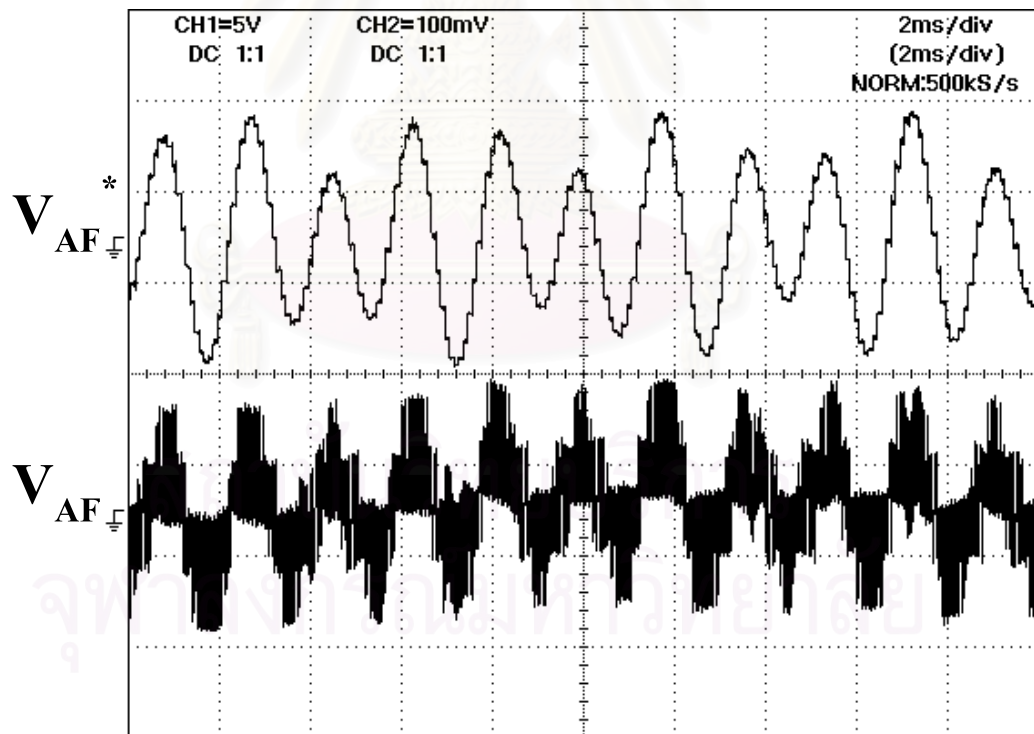
รูปที่ 5.17 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้อุปกรณ์กรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 11



รูปที่ 5.18 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้งานจกรกึ่งเอคที่ฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับที่ 11

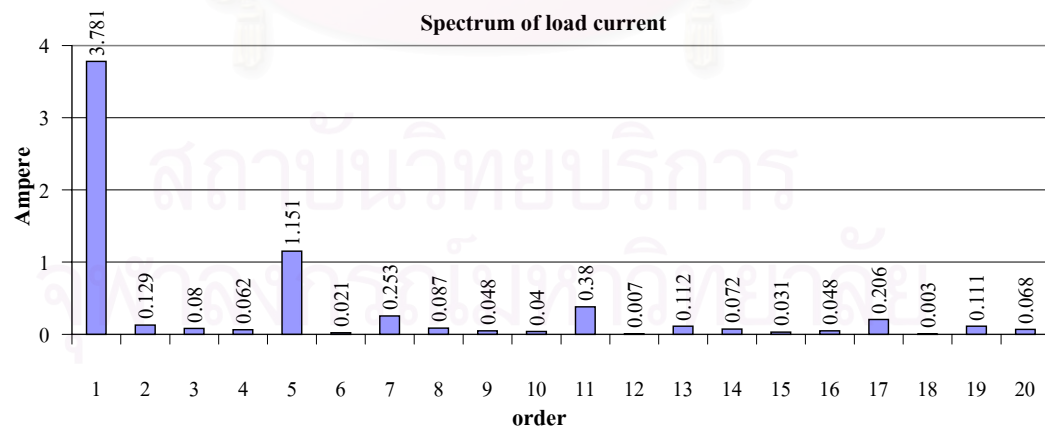
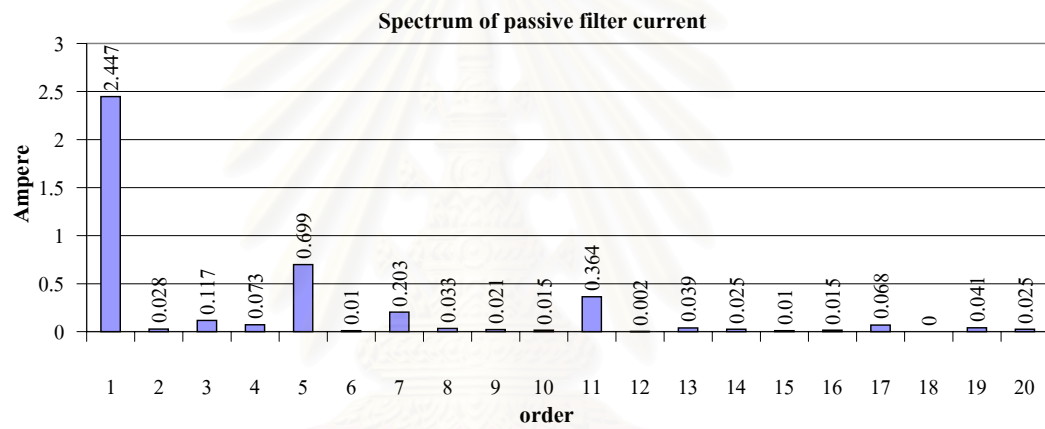
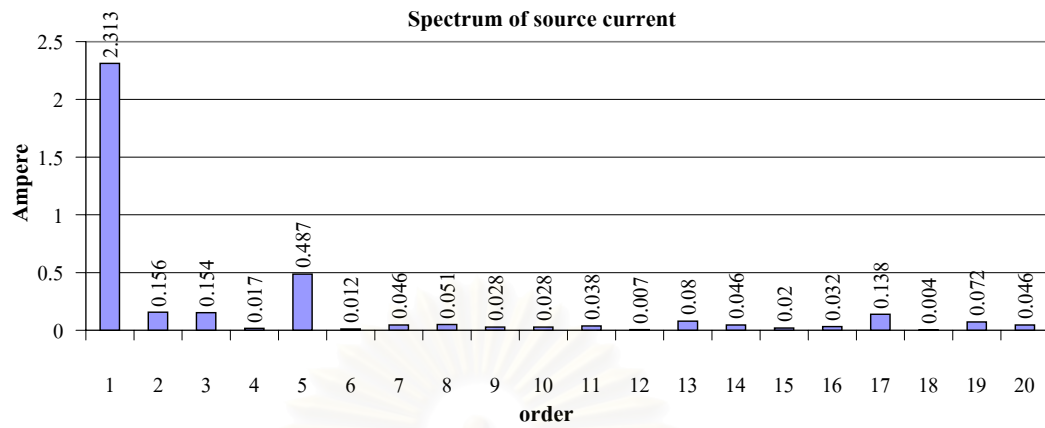


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)

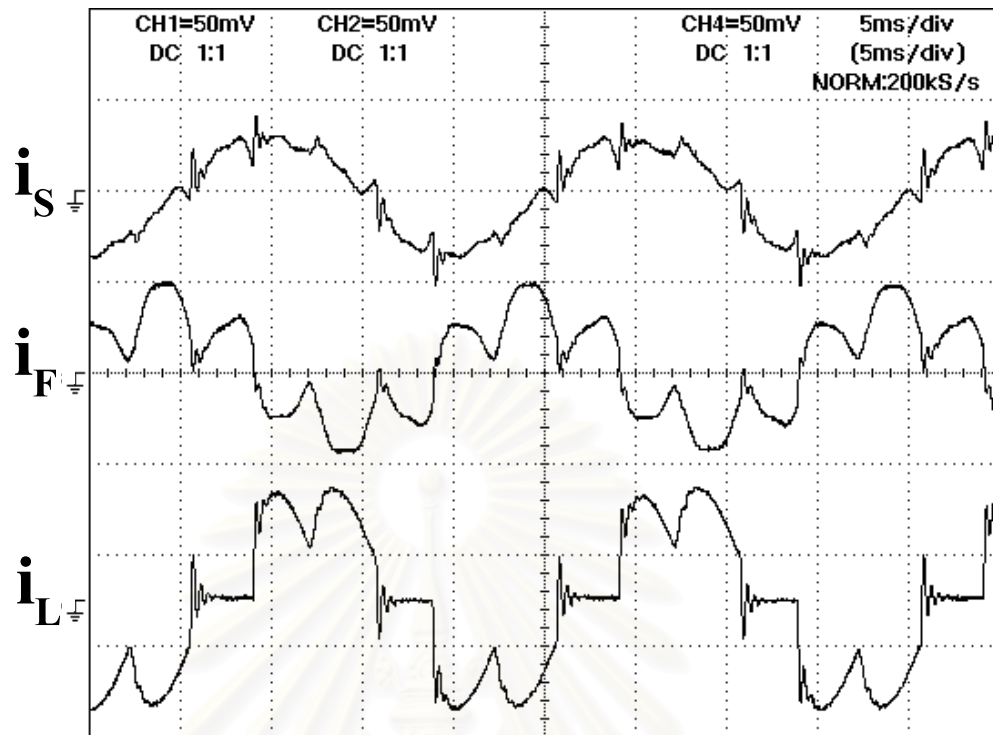


(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (50V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (50V/div)

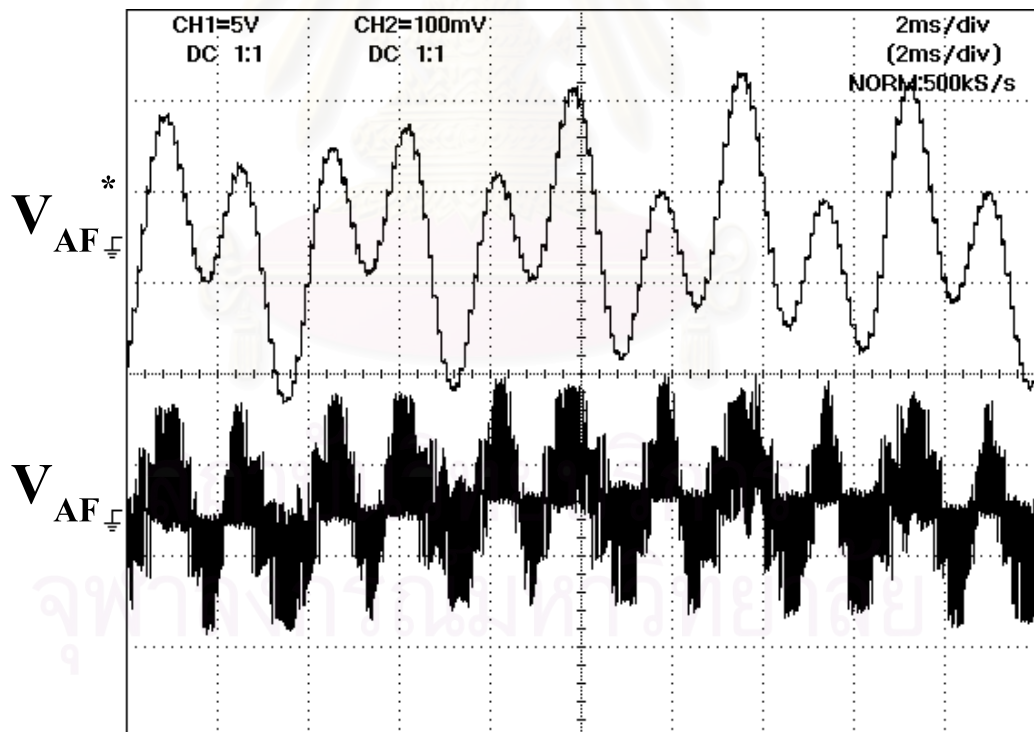
รูปที่ 5.19 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช่วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 7 และ 11



รูปที่ 5.20 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟพิกานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 7 และ 11

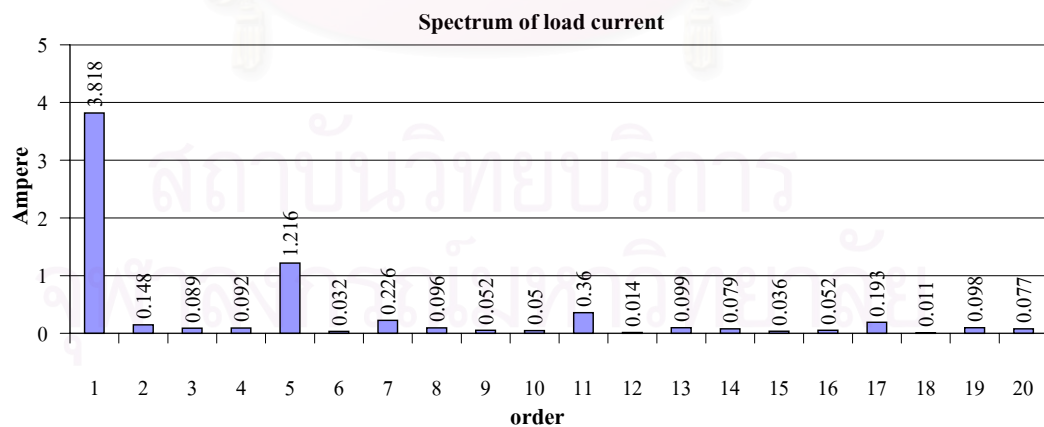
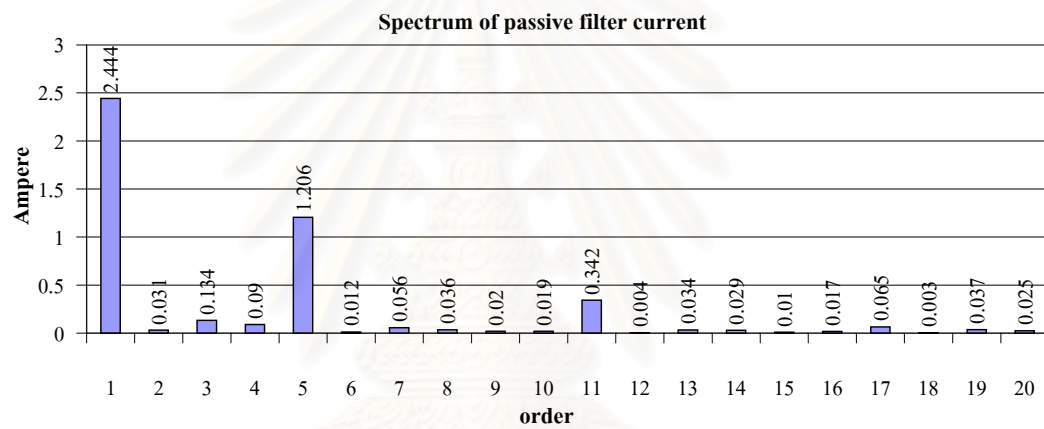
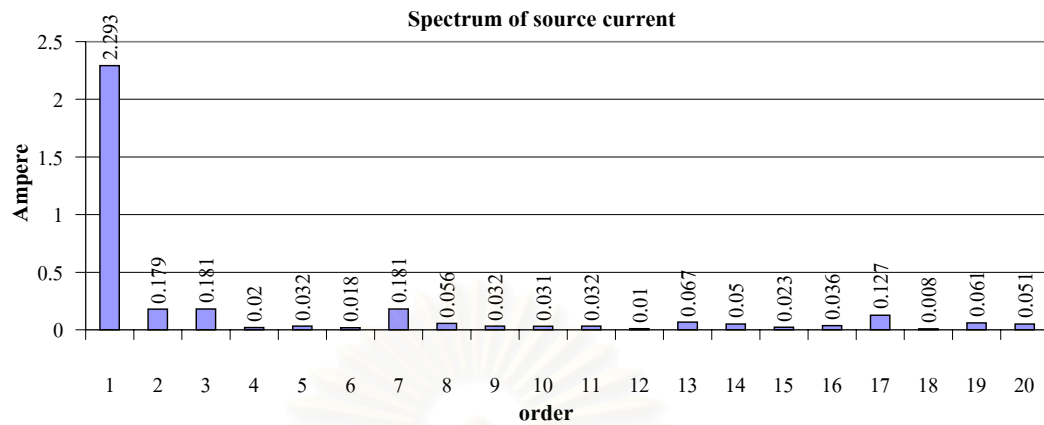


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)

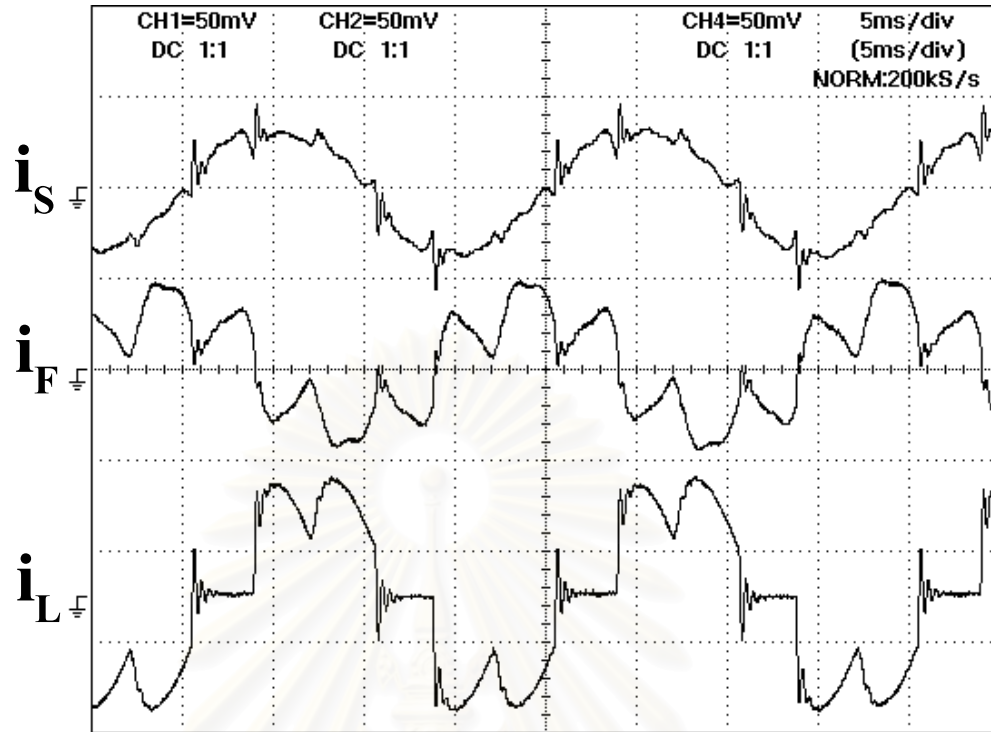


(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (50V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (50V/div)

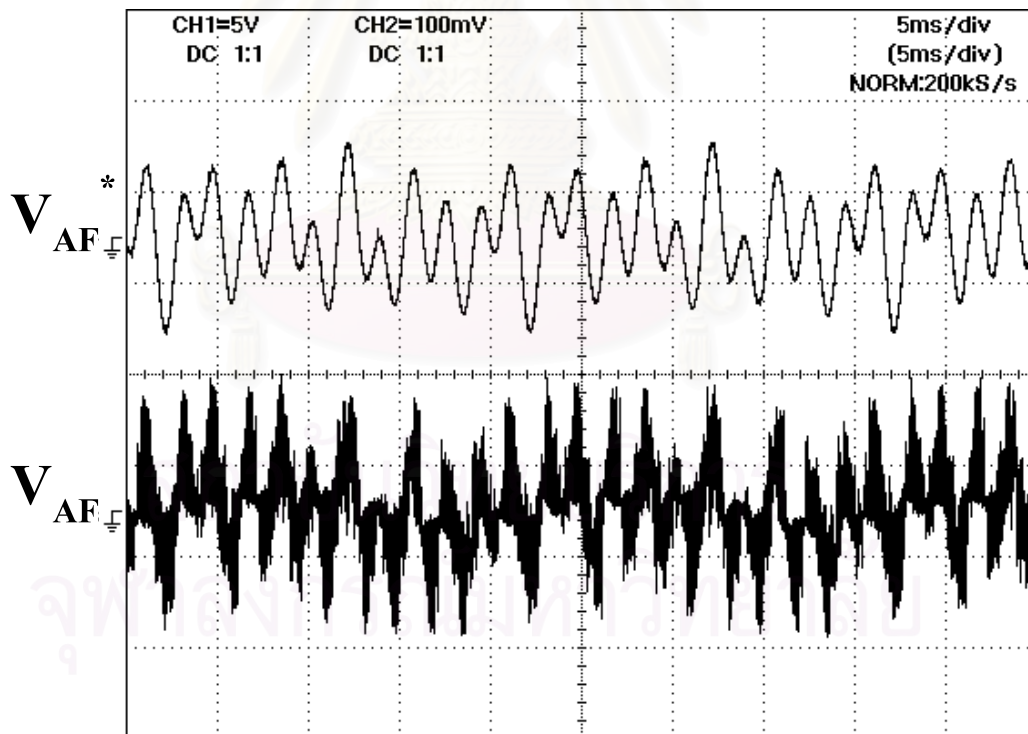
รูปที่ 5.21 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟพหุนามแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5 และ 11



รูปที่ 5.22 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช่วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5 และ 11

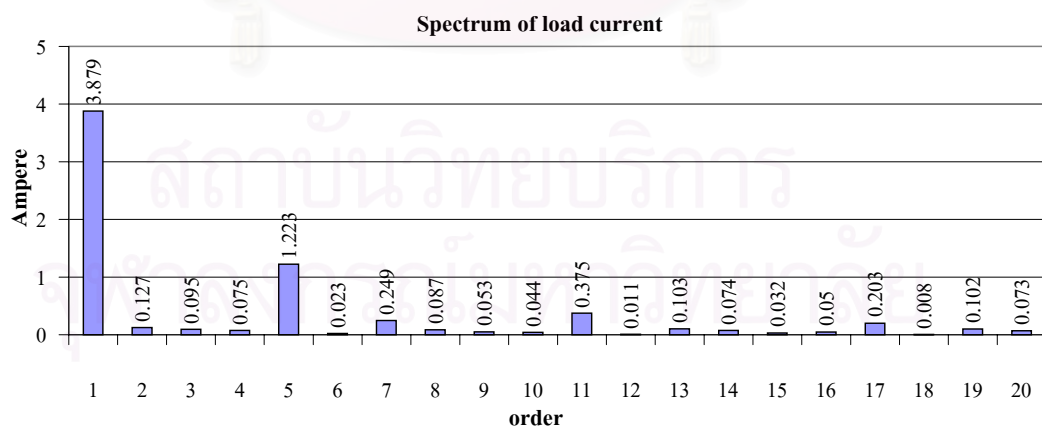
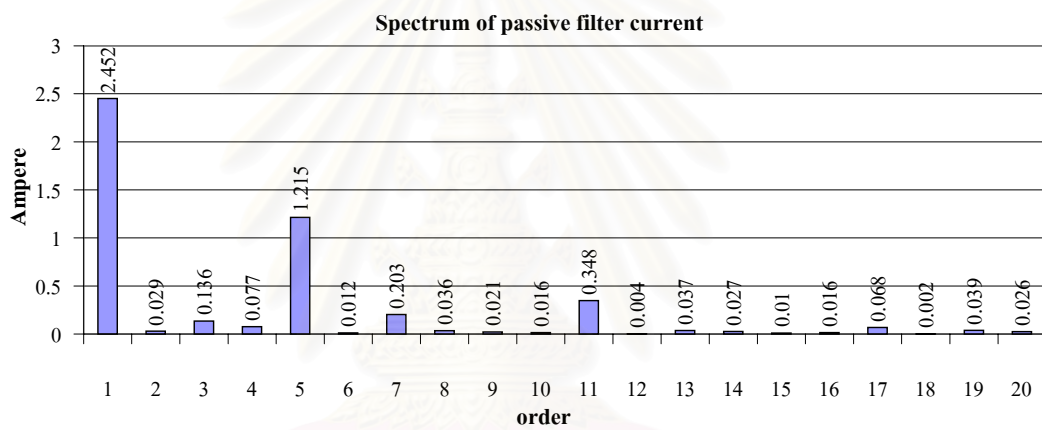
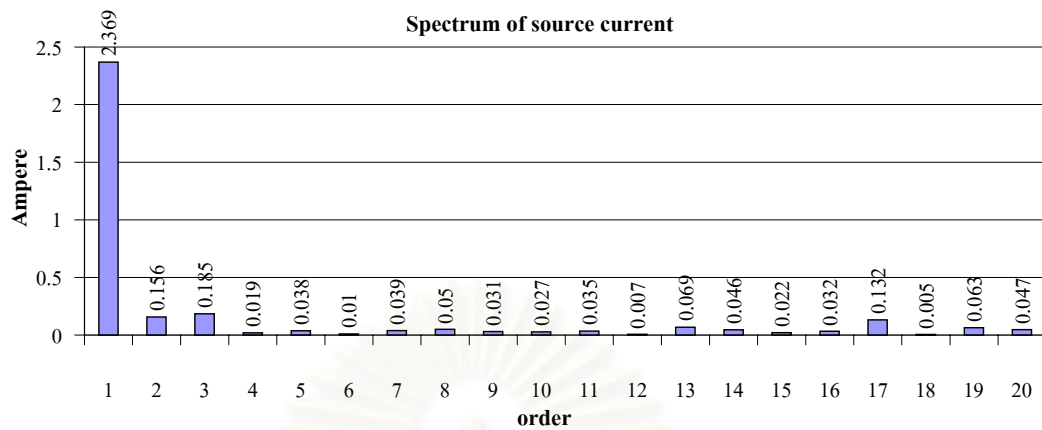


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)

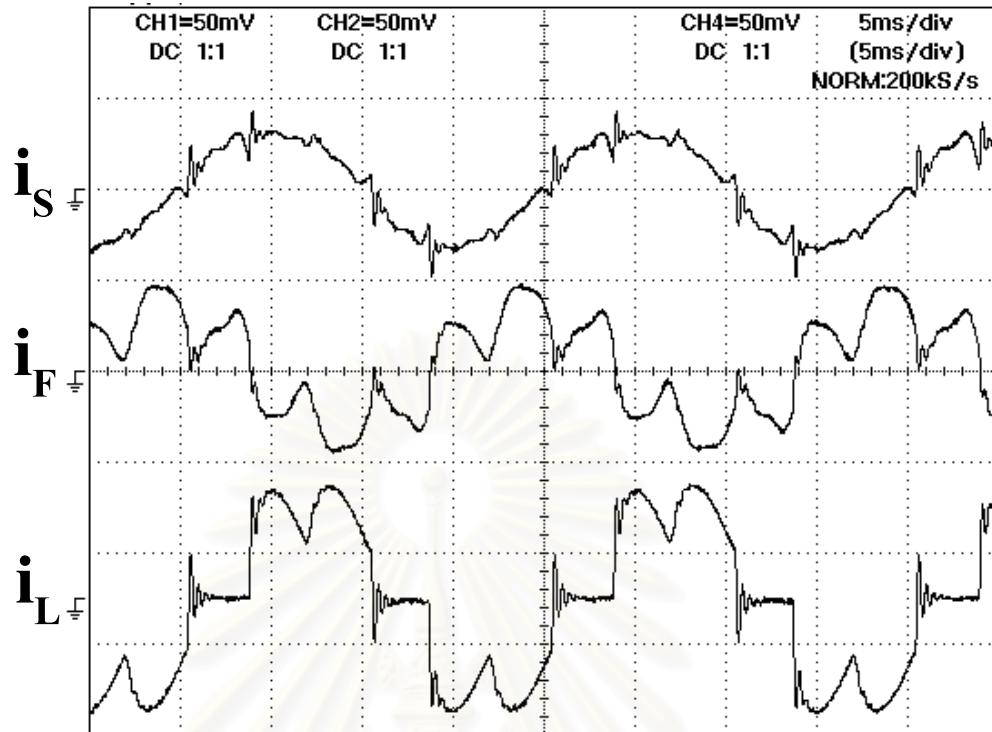


(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (100V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (50V/div)

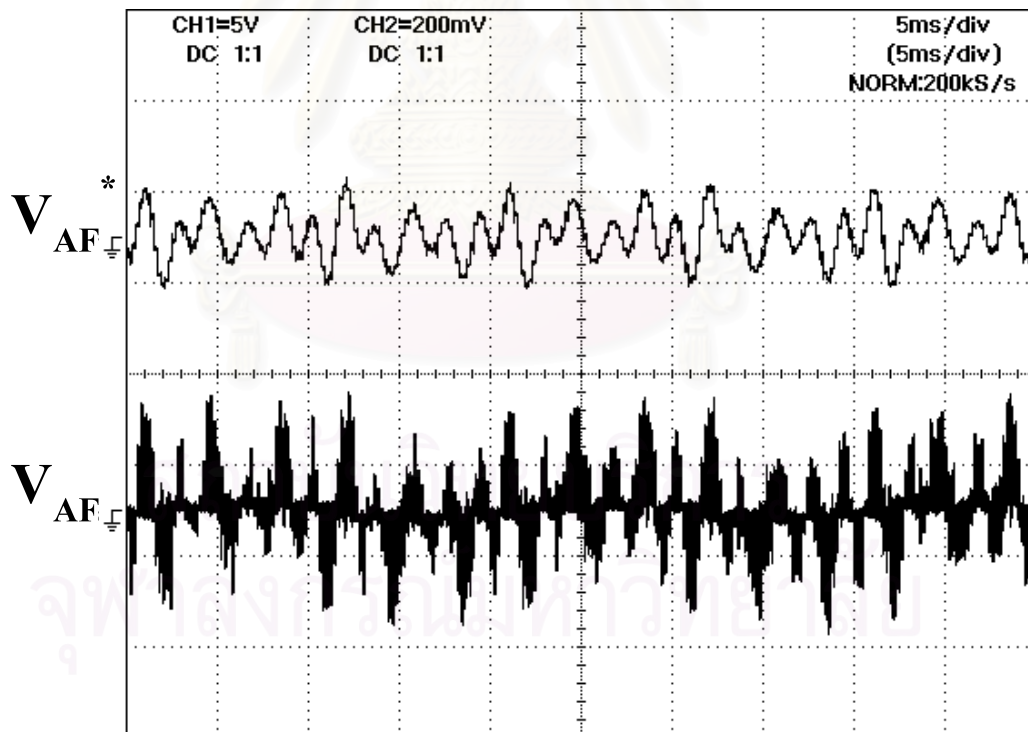
รูปที่ 5.23 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 7 และ 11



รูปที่ 5.24 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 7 และ 11

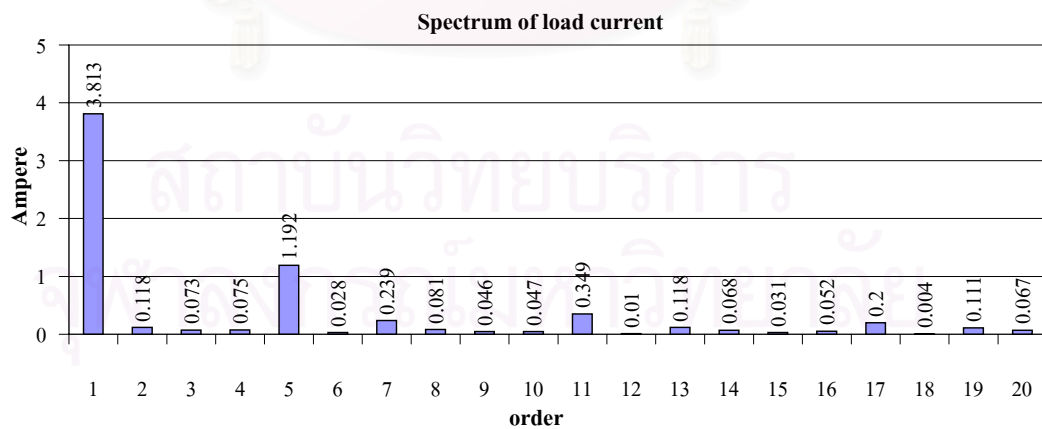
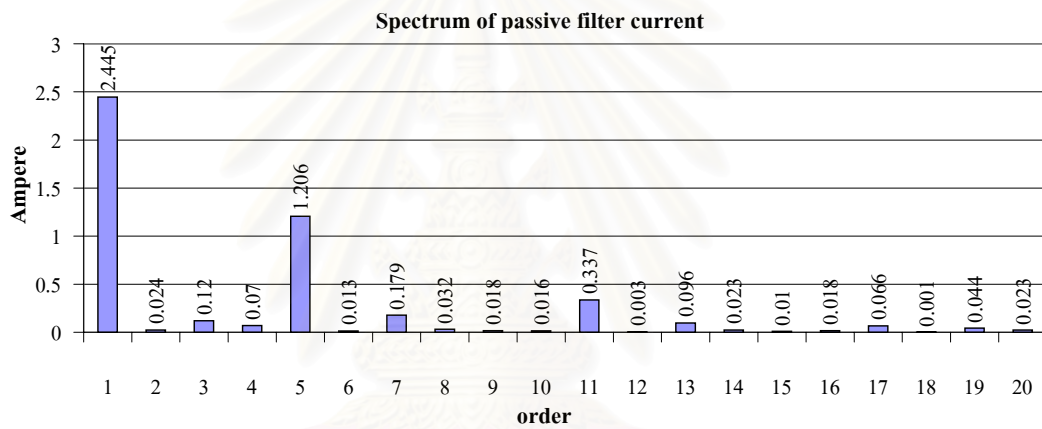
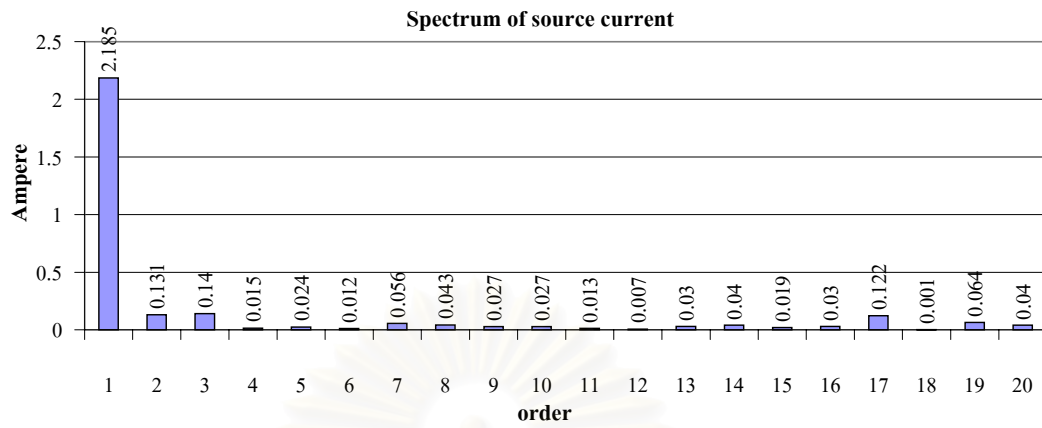


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)

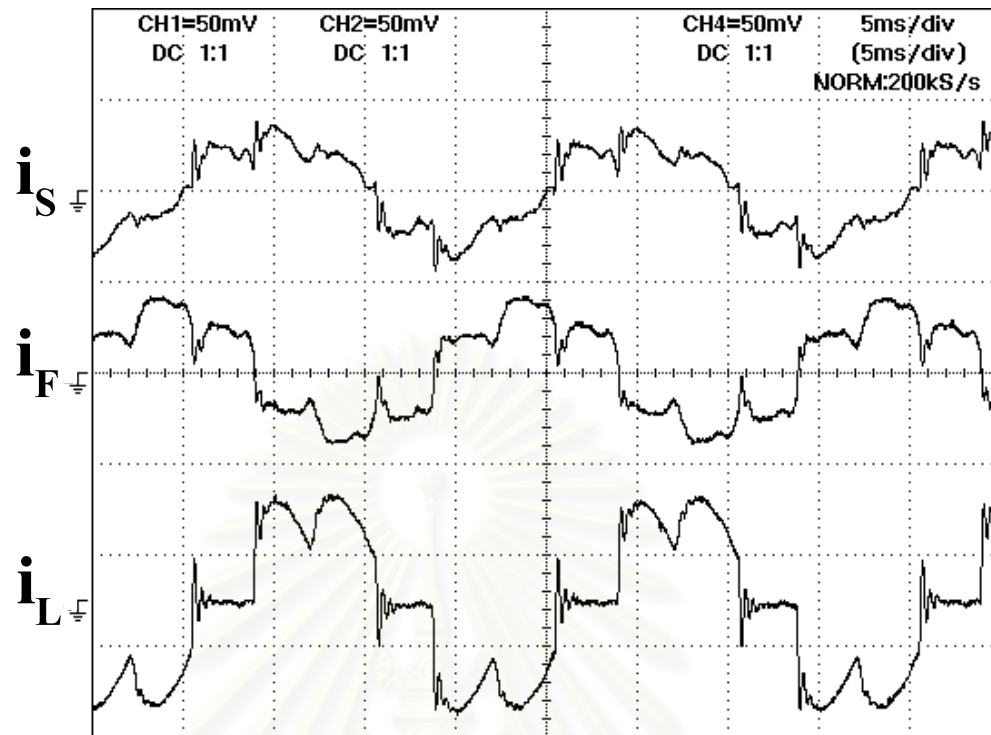


(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (200V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (100V/div)

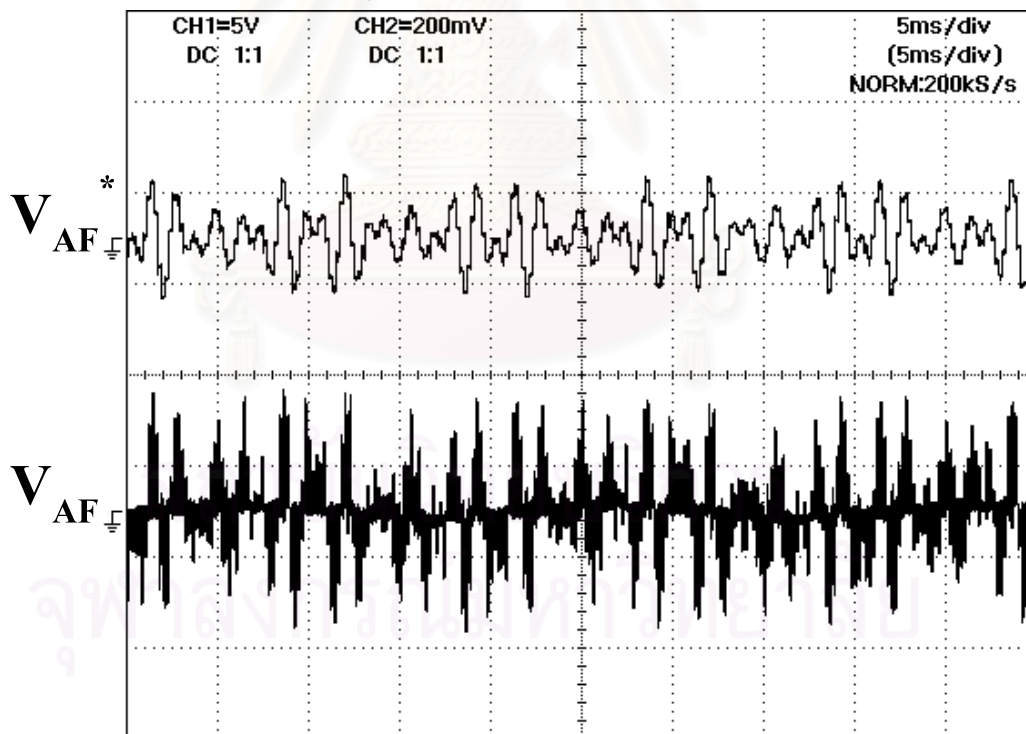
รูปที่ 5.25 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช่วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 7, 11 และ 13



รูปที่ 5.26 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนาดแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 7, 11 และ 13

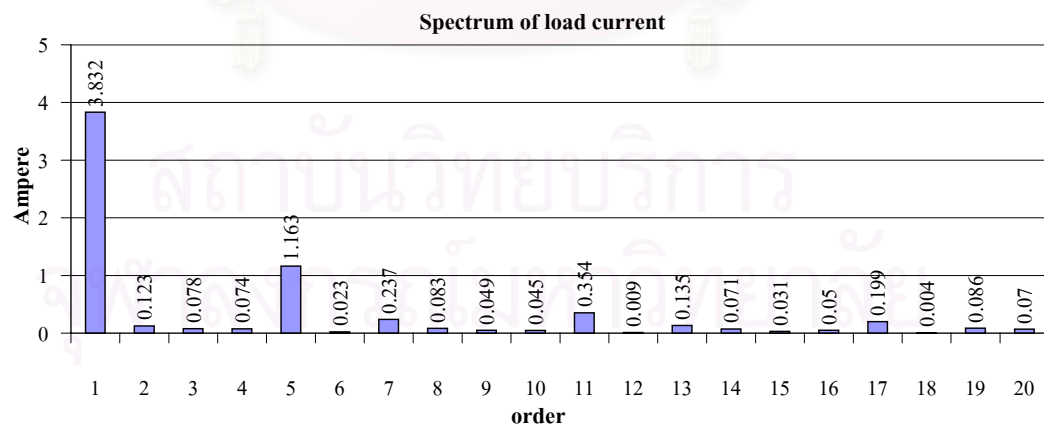
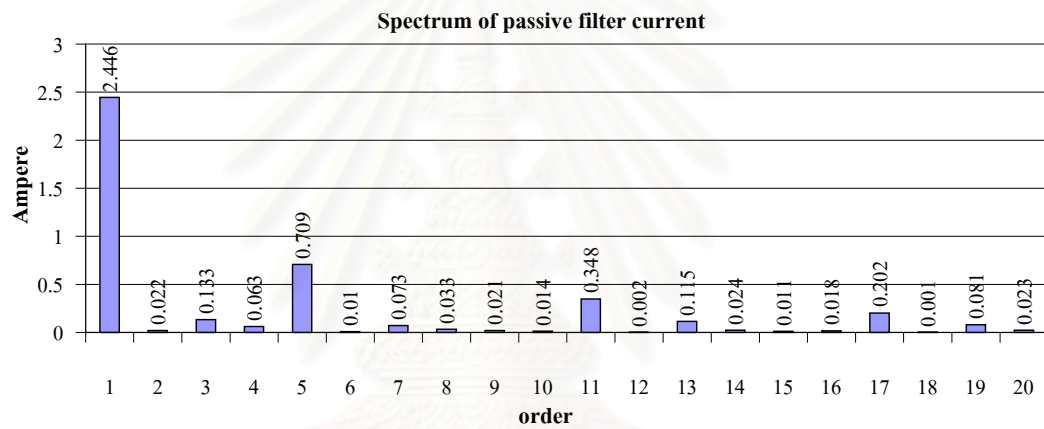
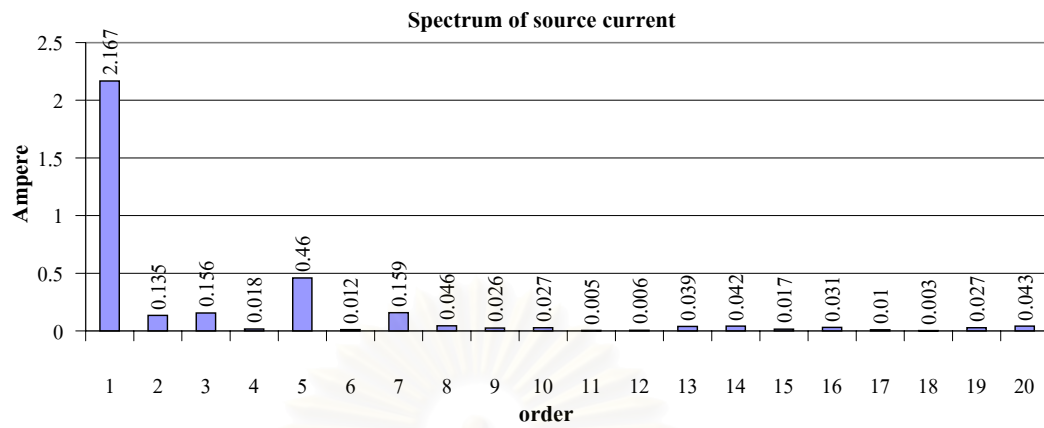


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)

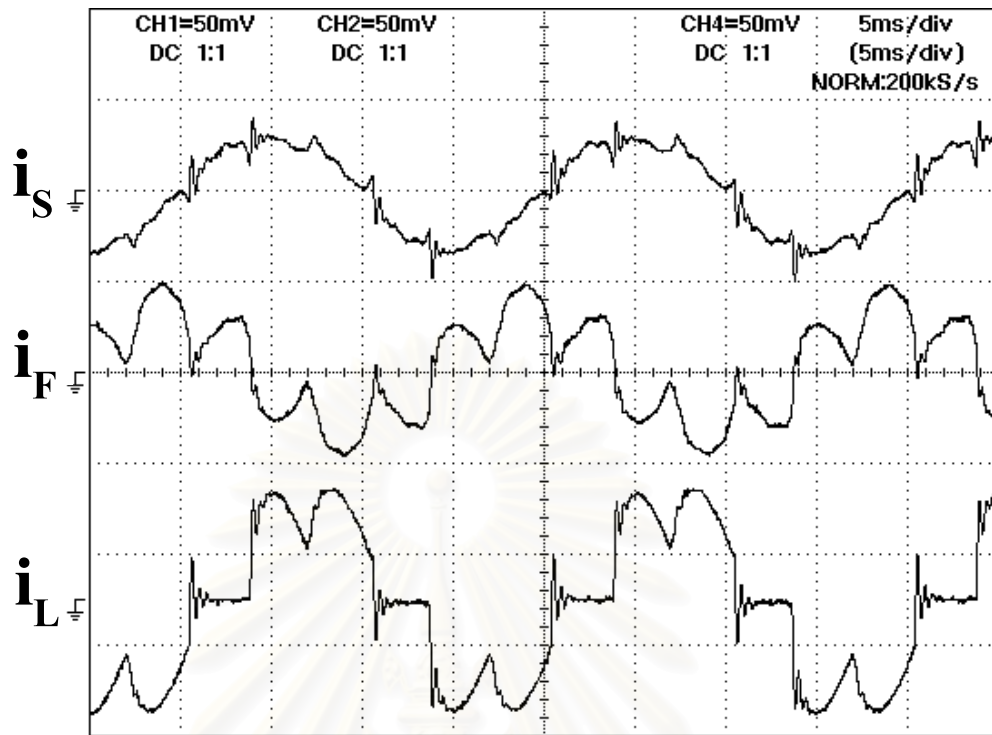


(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (200V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (100V/div)

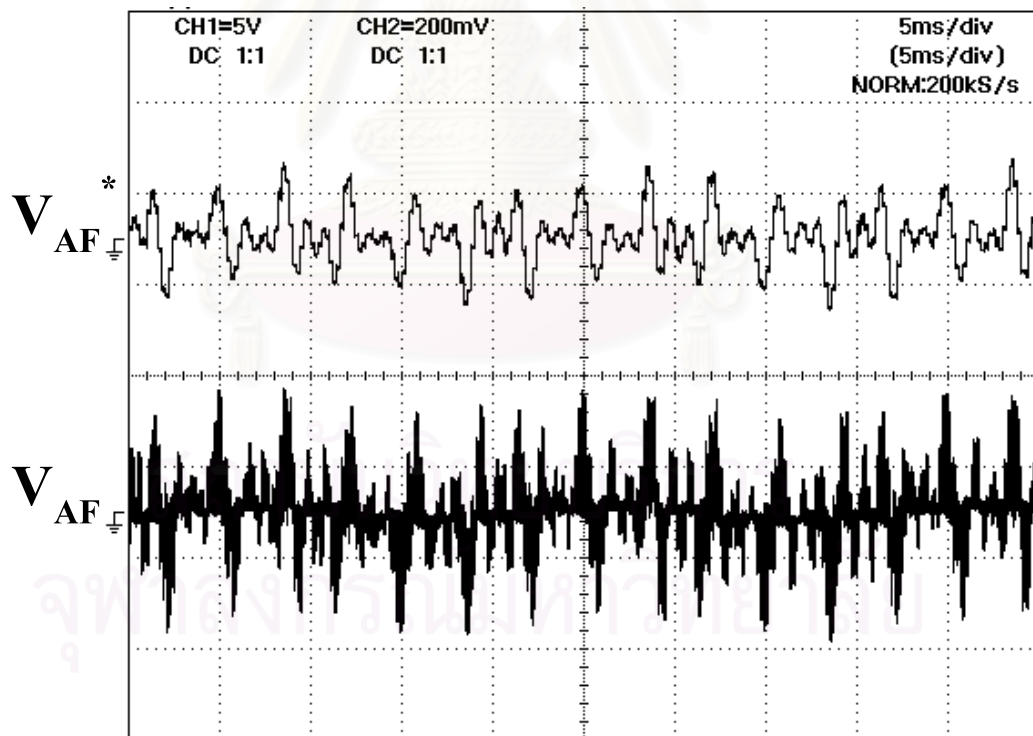
รูปที่ 5.27 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟพหุนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 11, 13, 17 และ 19



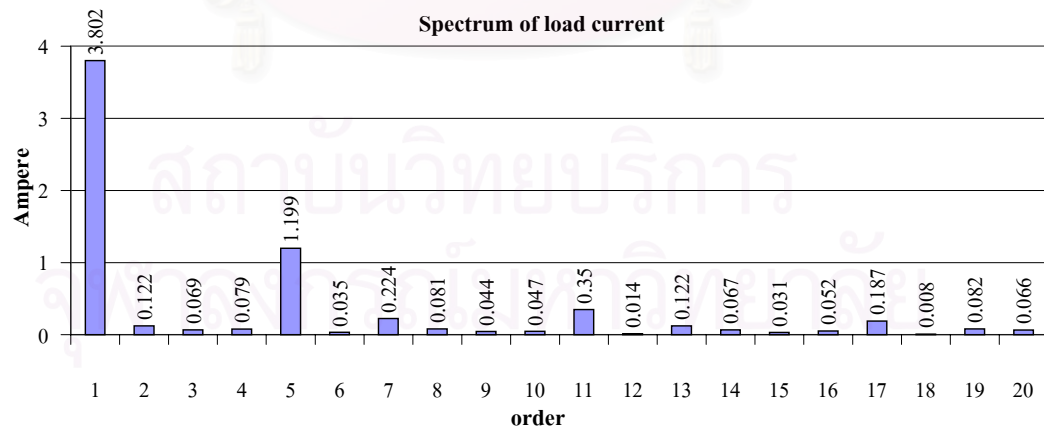
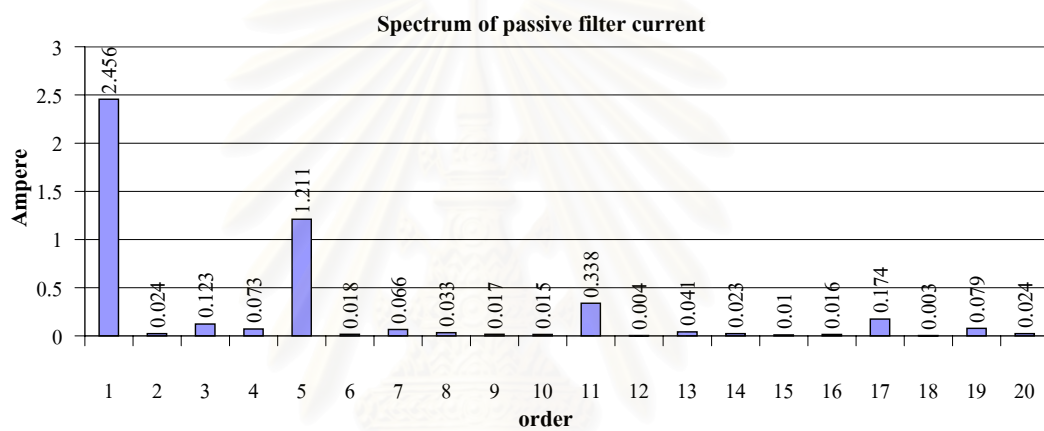
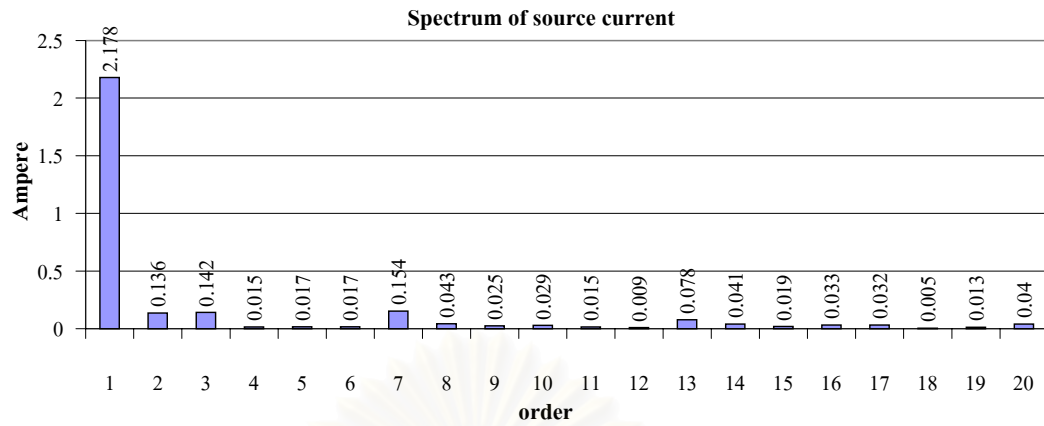
รูปที่ 5.28 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 11, 13, 17 และ 19



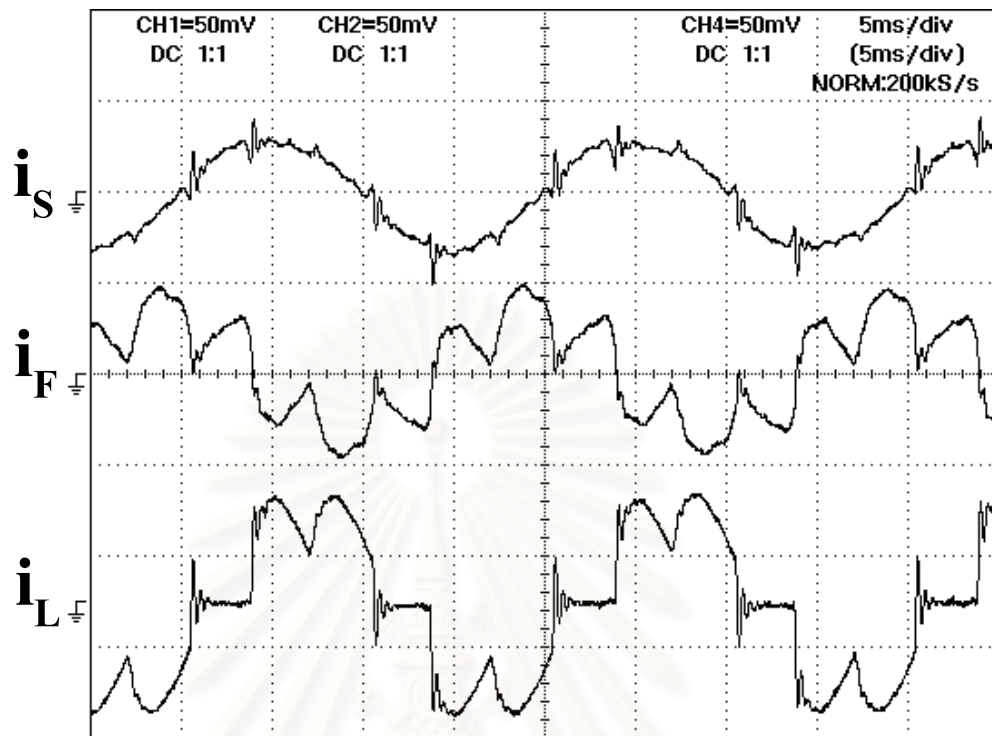
(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)



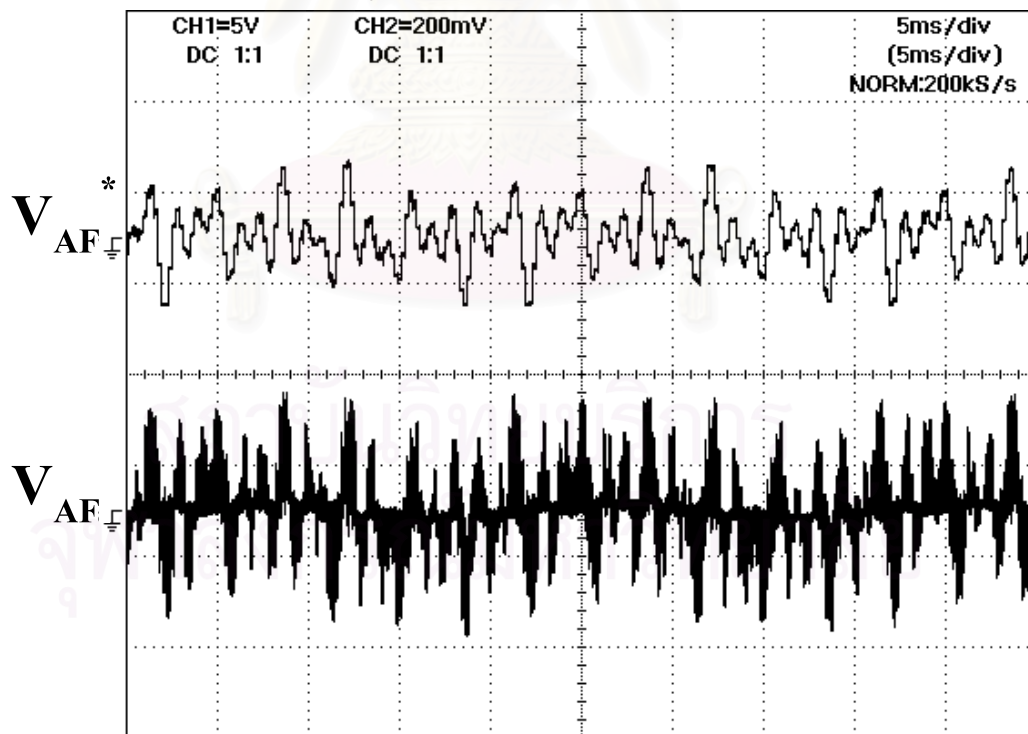
(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (200V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (100V/div)
รูปที่ 5.29 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 11, 17 และ 19



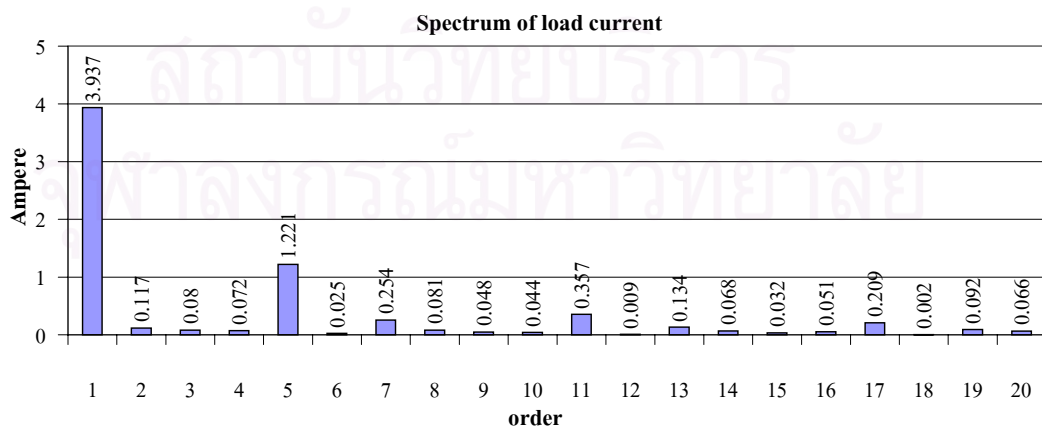
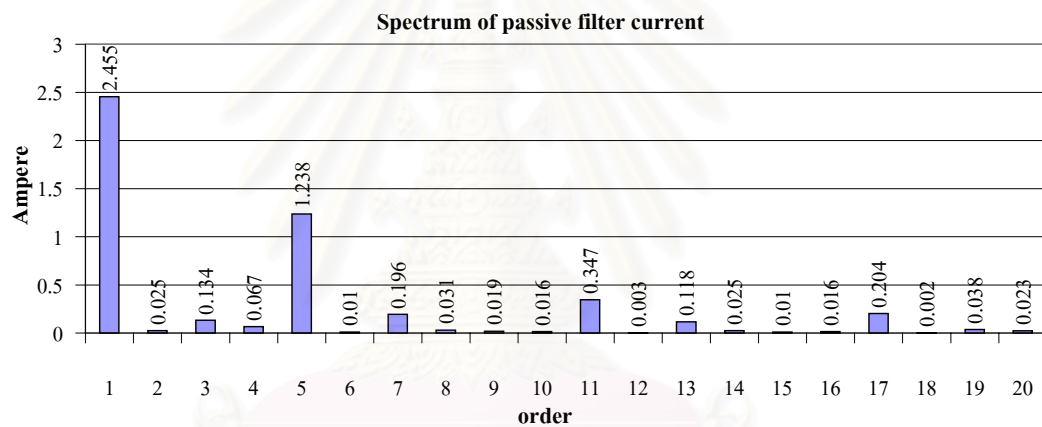
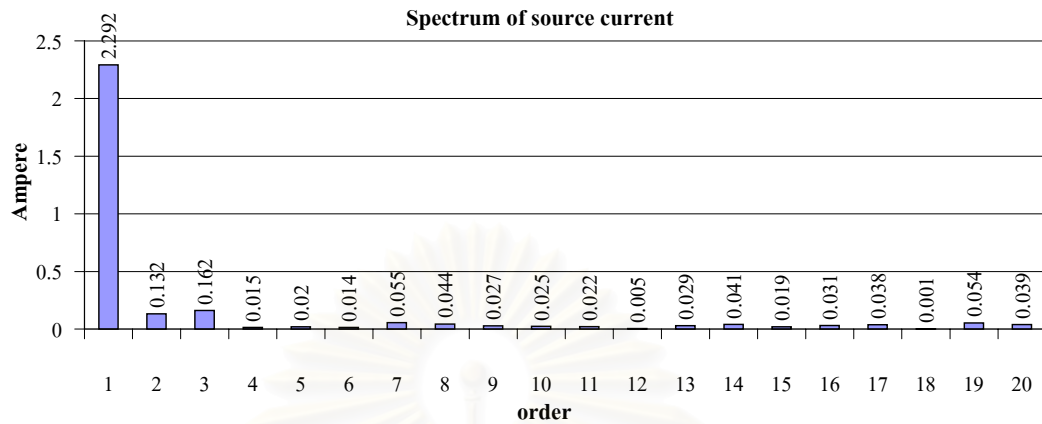
รูปที่ 5.30 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช่วงจรกรองแอกทีฟพิกานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 11, 17 และ 19



(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)

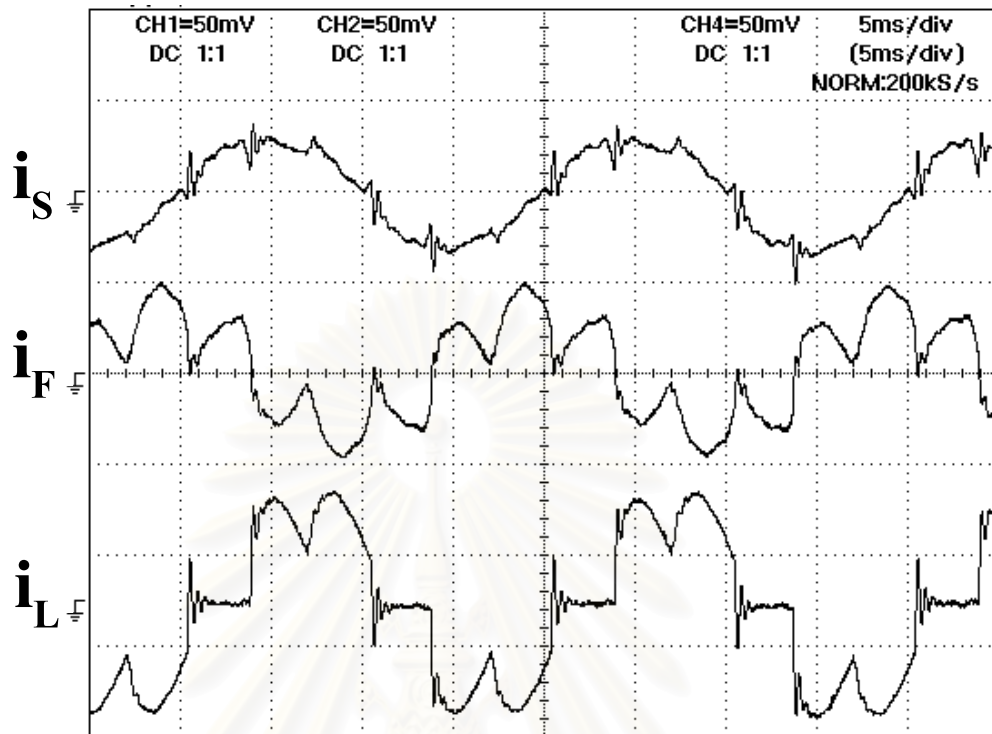


(จ) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (200V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (100V/div)
 รูปที่ 5.31 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช่วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด
 ฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 7, 11, 13 และ 17

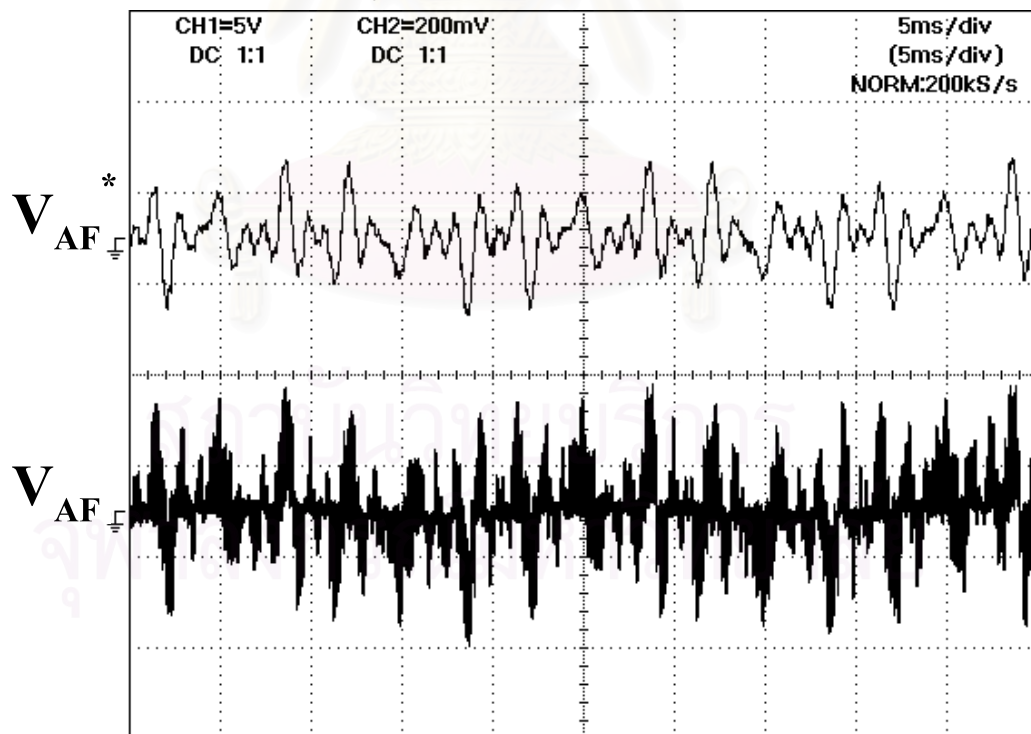


รูปที่ 5.32 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด

ฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 7, 11, 13 และ 17

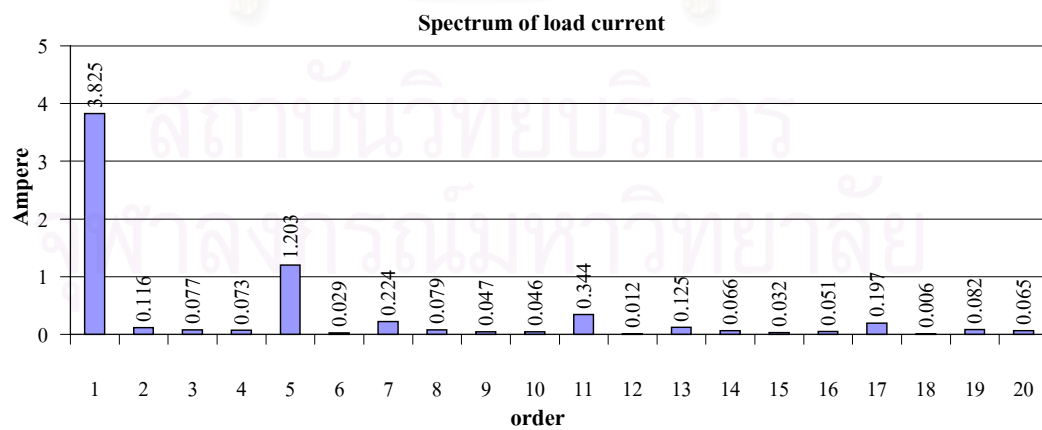
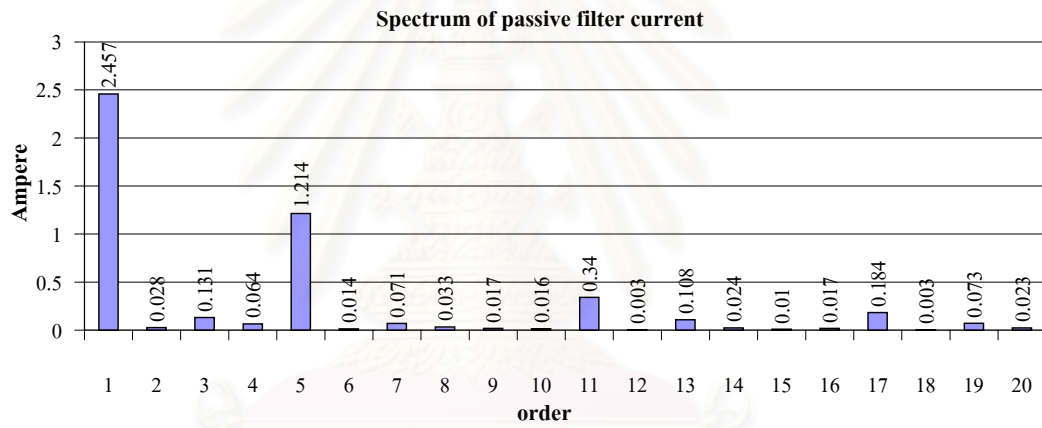
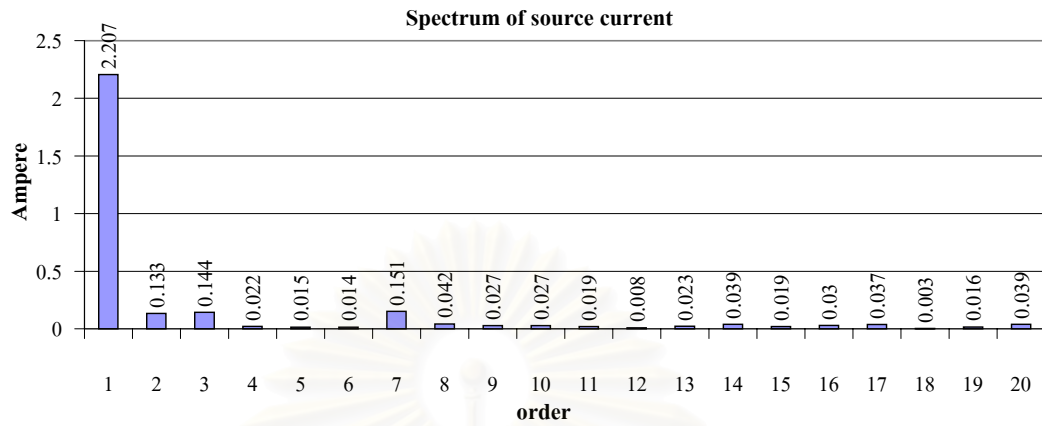


(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)

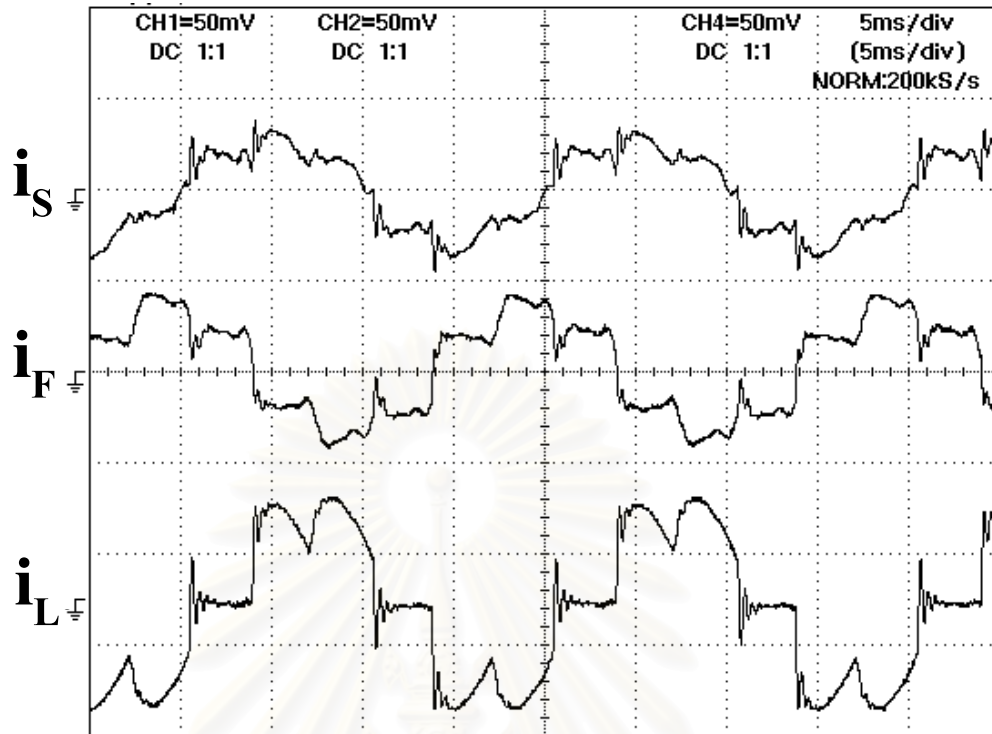


(จ) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (200V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (100V/div)

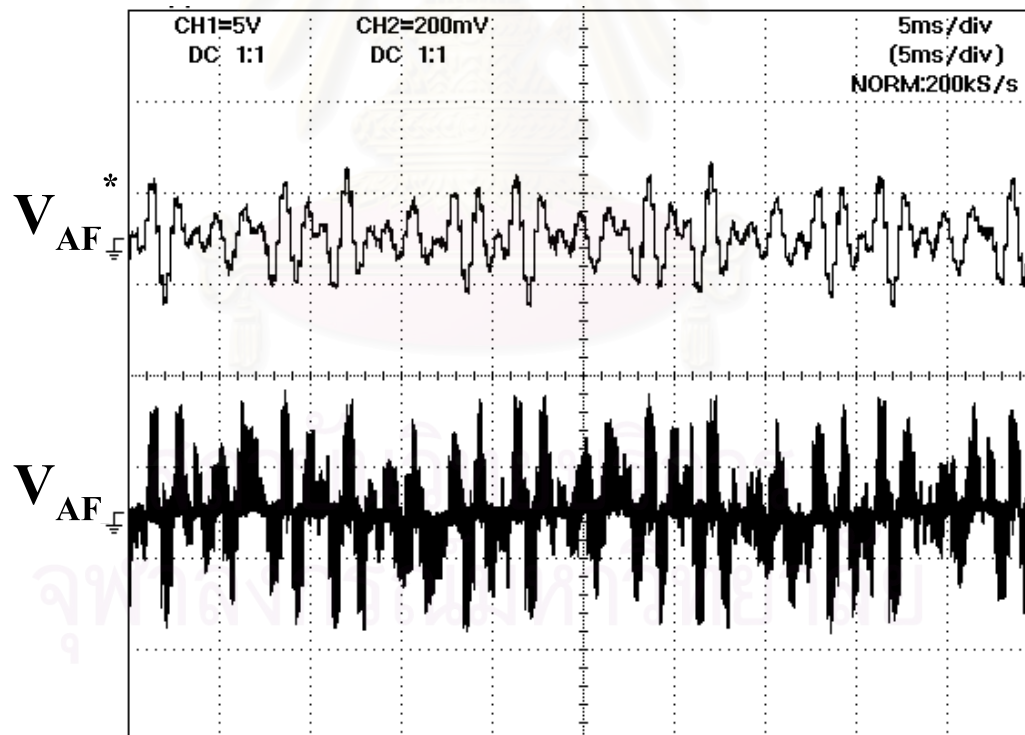
รูปที่ 5.33 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช่วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 11, 13, 17 และ 19



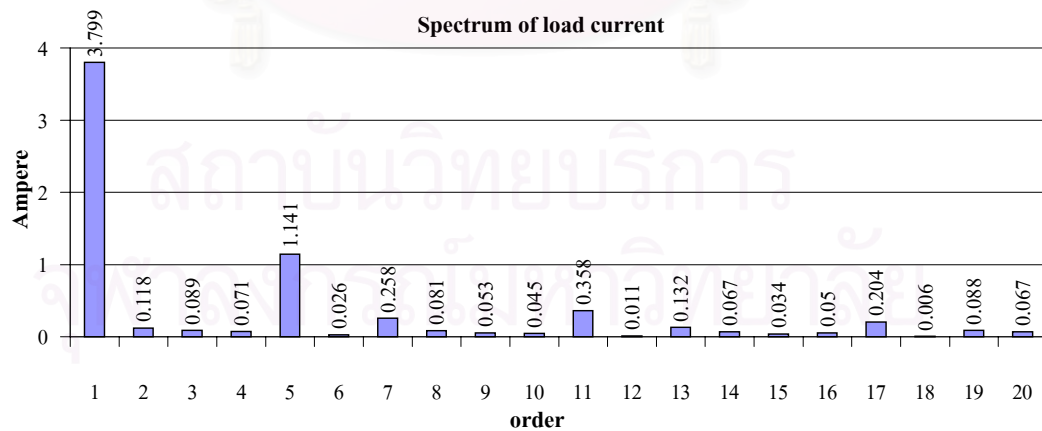
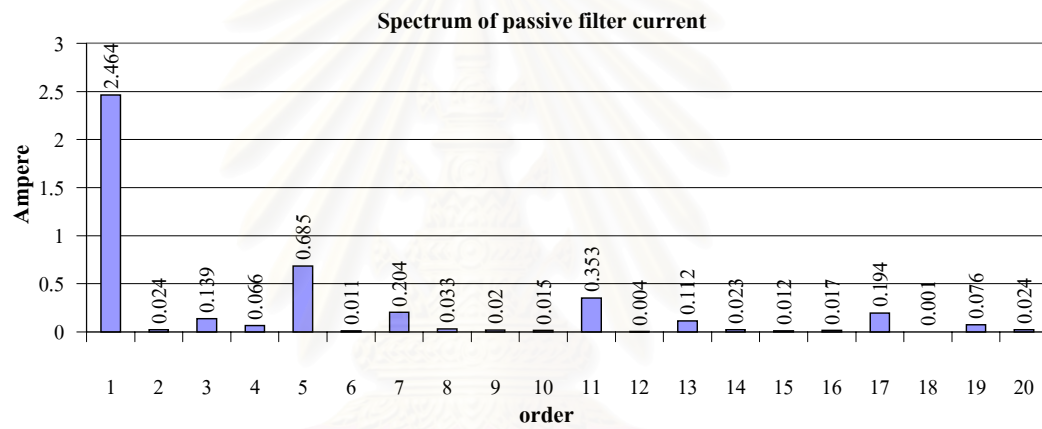
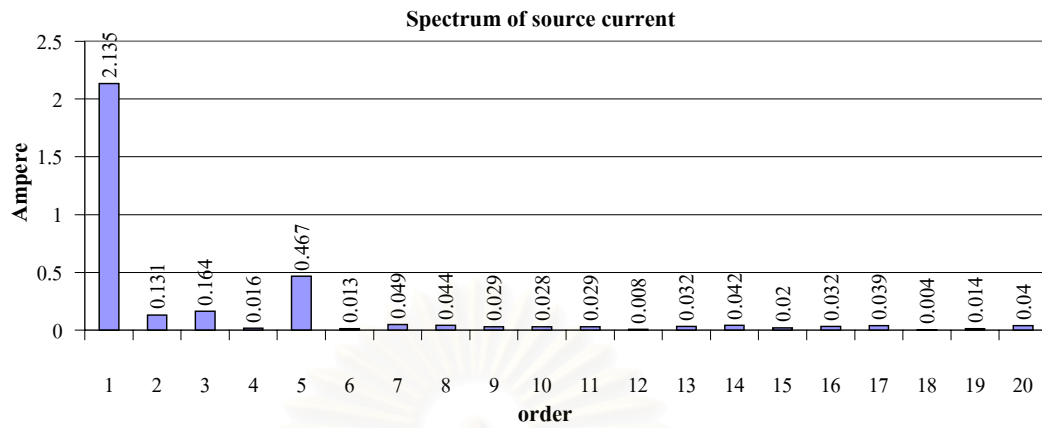
รูปที่ 5.34 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกที่ฟนนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 11, 13, 17 และ 19



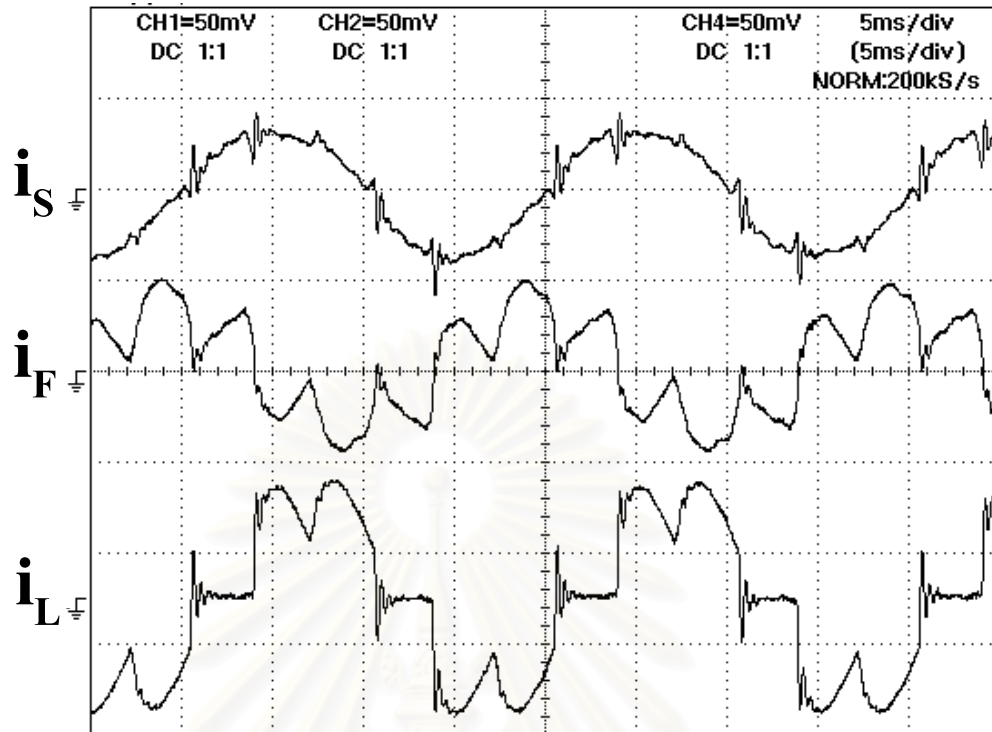
(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)



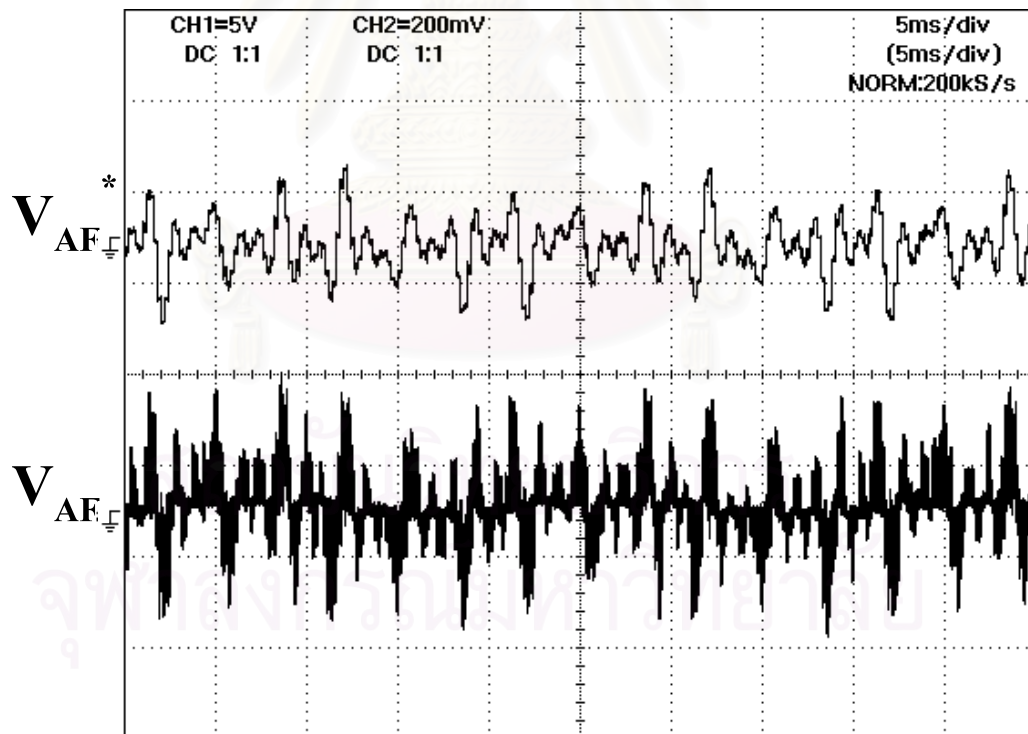
(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (200V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (100V/div)
รูปที่ 5.35 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัด
ฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับที่ 7, 11, 13, 17 และ 19



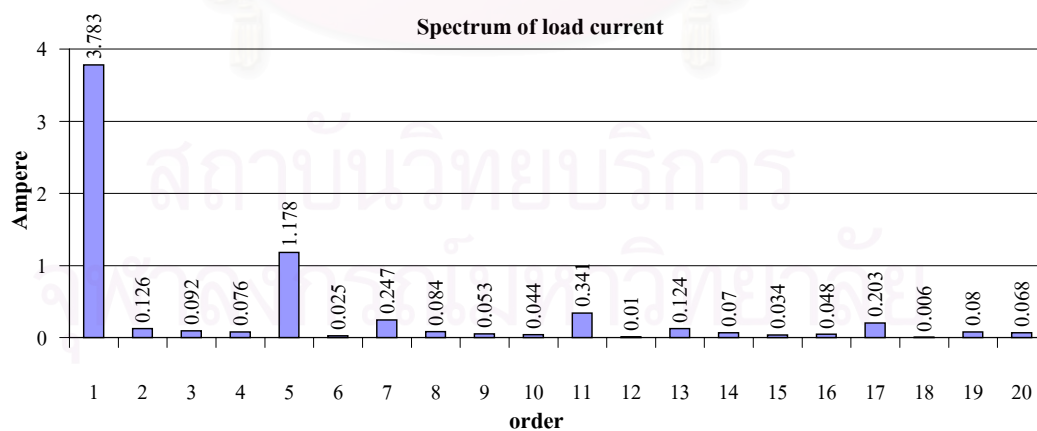
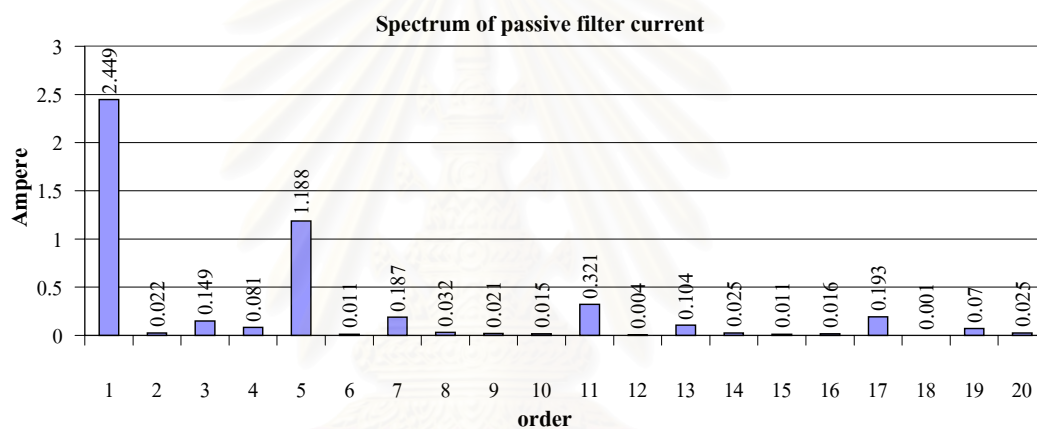
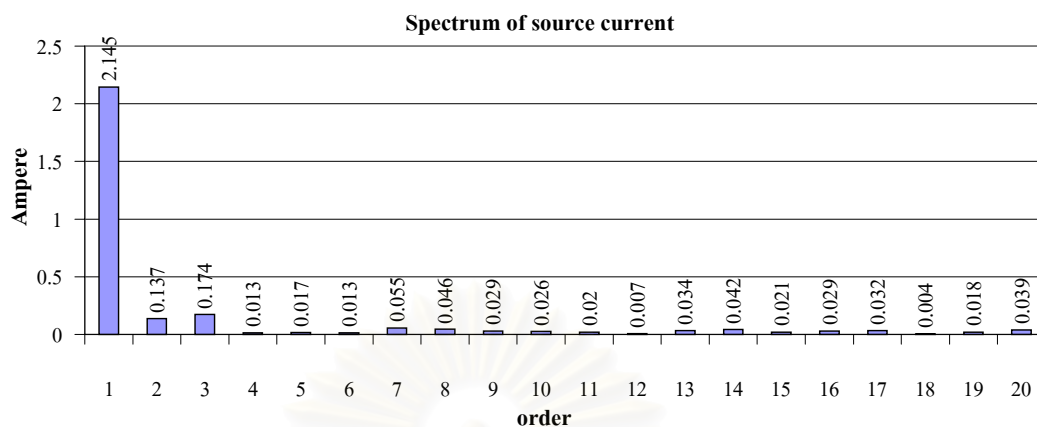
รูปที่ 5.36 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกที่พิกานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับที่ 7, 11, 13, 17 และ 19



(ก) รูปคลื่นกระแสของระบบ (5A/div)



(ข) รูปคลื่นแรงดันคำสั่ง (200V/div) และแรงดันจริงของวงจรกรองแอกทีฟ (100V/div)
รูปที่ 5.37 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกหลักอันดับที่ 5 ถึง อันดับที่ 19



รูปที่ 5.38 สเปกตรัมของกระแสของระบบในกรณีที่ใช่วงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดกำจัดฮาร์มอนิกหลักอันดับที่ 5 ถึง อันดับี่ 19

5.5 ผลการเปรียบเทียบขนาด kVA ของวงจรรองแอกทีฟ

จากที่กล่าวมาแล้วว่าวัตถุประสงค์ในการเลือกโครงสร้างที่ใช้วงจรรองแอกทีฟอนุกรมกับวงจรรองพาสซีฟเป็นแบบไฮบริดนี้ ก็เพื่อที่ลดขนาด kVA ของวงจรรองแอกทีฟลง โดยขนาดของวงจรรองแอกทีฟจะขึ้นกับขนาดของแรงดันที่วงจรรองแอกทีฟสร้าง เนื่องจากวงจรรองแอกทีฟจะสร้างแรงดันเฉพาะองค์ประกอบฮาร์มอนิกเท่านั้น ดังนั้นขนาดของแรงดันก็จะขึ้นกับจำนวนและอันดับของฮาร์มอนิกที่จะทำการกำจัดเท่านั้น ตัวเก็บประจุของวงจรรองพาสซีฟจะช่วยรับแรงดันหลักมูลแทนวงจรรองแอกทีฟและขนาด kVA ของวงจรรองแอกทีฟก็ยิ่งขึ้นกับขนาดกระแสที่วงจรรองแอกทีฟต้องรับด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณาวงจรรองแอกทีฟจะเห็นว่าแรงดันที่วงจรรองแอกทีฟรับนั้นจะมีขนาดไม่สูงแต่จะรับกระแสสูง เราจึงขยายแรงดันและลดกระแสของวงจรรองแอกทีฟโดยการเชื่อมวงจรอินเวอร์เตอร์ของวงจรรองแอกทีฟกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวด 2:1 ดังนั้นขนาดแรงดันที่วงจรรองแอกทีฟคำนวณได้จะต้องมีขนาดเพิ่มเป็นสองเท่าแต่ขณะเดียวกันขนาดกระแสที่วงจรรองแอกทีฟรับก็จะมีขนาดลดลงเป็นสองเท่าเช่นเดียวกัน

ในที่นี้จะเปรียบเทียบขนาดกำลังของวงจรรองแอกทีฟเมื่อกำจัดฮาร์มอนิกหลายอันดับพร้อมกัน โดยจะเพิ่มขึ้นทีละหนึ่งอันดับ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ค่าแรงดันและกระแสที่วงจรรองแอกทีฟต้องรับในขณะที่ทำการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก สามารถนำมาใช้คำนวณหาขนาด kVA ของวงจรรองแอกทีฟได้ โดยในที่นี้เราใช้วงจรรองแอกทีฟกับโหลดขนาด 2.5 kVA จากข้อมูลใน ตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าวงจรรองแอกทีฟแบบไฮบริดลักษณะนี้สามารถลดขนาด kVA ลงได้มากถึงแม้ว่าจะกำจัดฮาร์มอนิกทีละหลายอันดับก็ตาม

ตารางที่ 5.2 ขนาด kVA ของวงจรรองแอกทีฟเมื่อกำจัดฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ

จำนวนฮาร์มอนิกที่ทำการกำจัด	กระแสที่วงจรรองแอกทีฟต้องรับ(A)	แรงดันที่วงจรรองแอกทีฟต้องรับ(V)	ขนาด kVA ของวงจรรองแอกทีฟ(VA)
5	1.39	28.4	118.5 (4.74%)
5,7	1.39	30.5	127.2 (5.09%)
5,7,11	1.39	49.5	206.4 (8.26%)
5,7,11,13	1.39	52.6	219.3 (8.77%)
5,7,11,13,17	1.39	67.8	282.6 (11.30%)
5,7,11,13,17,19	1.39	69.0	287.7 (11.51%)

หมายเหตุ: ขนาด % ในช่องขนาด kVA ของวงจรรองแอกทีฟจะเทียบกับขนาด kVA ของโหลด

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้นำเสนอวงจรกรองพาสซีฟที่ต่ออนุกรมกับวงจรกรองแอกทีฟในการกำจัดฮาร์มอนิก มาใช้สำหรับระบบแรงดัน 3 เฟส 3 สาย 380 V และทำการทดลองกับโหลดที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกขนาด 2.5 kVA การต่อเป็นแบบไฮบริดนี้จะสามารถลดขนาด kVA ของวงจรกรองแอกทีฟลงได้ ผู้วิจัยยังได้ศึกษาค้นคว้าถึงตำแหน่งที่เหมาะสมในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอีกด้วย โดยได้เสนอวิธีการตรวจจับกระแสสองจุดคือกระแสทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสที่ไหลผ่านวงจรกรองพาสซีฟ นอกจากนั้นผู้วิจัยยังได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบและนำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหเสถียรภาพ เมื่อใช้วิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก เราสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้คือ

1. เราสามารถควบคุมวงจรกรองแอกทีฟให้มีพฤติกรรมเหมือนตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเมื่อนำไปอนุกรมกับวงจรกรองพาสซีฟแบบคิจุนแล้วสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ตามทฤษฎี
2. ค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายและความคลาดเคลื่อนของค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในการคำนวณแรงดันของวงจรกรองแอกทีฟจะไม่มีผลต่อการกำจัดฮาร์มอนิก
3. สามารถแก้ไขปัญหาเสถียรภาพด้วยทฤษฎีอัตราขยายค่าเล็กได้จริง
4. วงจรกรองแอกทีฟที่ใช้ในลักษณะไฮบริดนี้จะมีขนาด kVA ที่เล็กกว่าในกรณีที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟเพียงอย่างเดียว และมีขนาดเล็กกว่า kVA ของโหลดมาก
5. ผลการทดสอบการทำงานของระบบแสดงให้เห็นว่าวงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเพื่อทำให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ (IEC 1000-3-2 Class A)

จากข้อสรุปทั้งหมดข้างต้น จะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟขนานแบบไฮบริดที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ สามารถทำงานได้ถูกต้องตามทฤษฎีที่ได้พัฒนาขึ้น และยังสามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

1. ในการเอาวงจรกรองแอกทีฟแบบไฮบริดไปใช้งานจริง จำเป็นต้องพิจารณาถึงการตัดต่อวงจรกรองแอกทีฟเข้าออกจากระบบกำลัง ดังนั้นจึงควรพัฒนาระบบให้มีส่วนที่ทำหน้าที่ในการตัดต่อระบบวงจรกรองแอกทีฟเข้าออกจากระบบกำลังรวมอยู่ด้วย

2. เนื่องจากความถี่หลักมูลของระบบไฟฟ้ากำลังมักจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ดังนั้นจึงควรมีการทำเฟสล็อกลูป (phase lock loop) เพื่อให้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกซึ่งอาศัยการหมุนแกนอ้างอิงไปด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ของฮาร์มอนิกที่ทำการกำจัดมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

3. เราสามารถลดขนาดของวงจรถองแอกทีฟลงได้อีก จากที่กล่าวมาแล้วว่าขนาด kVA ของวงจรถองแอกทีฟจะขึ้นกับค่าแรงดันที่ต้องสร้างไปหักล้างกับตัวเหนี่ยวนำจริงๆ ซึ่งในบทที่ 3 เราได้ออกแบบวงจรถองพาสซีฟแบบดิจิตอลให้มีขนาดค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดแล้ว แต่เรายังไม่ได้ออกผลของค่าความเหนี่ยวนำรั่วของหม้อแปลง (leakage inductance) ซึ่งก็จะมีผลทำให้มีค่าความเหนี่ยวนำต่อเพิ่มขึ้นมาในระบบ ทำให้ต้องวงจรถองแอกทีฟต้องสร้างแรงดันที่จะหักล้างค่าความเหนี่ยวนำจริงๆ เพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นถ้าเราสามารถลดขนาดของค่าความเหนี่ยวนำของวงจรถองพาสซีฟแบบดิจิตอลแล้วคิดรวมค่าความเหนี่ยวนำรั่วของหม้อแปลงเข้าไปด้วยให้รวมกันเป็นวงจรถองพาสซีฟแบบดิจิตอลใหม่ ก็จะทำให้วงจรถองแอกทีฟไม่ต้องสร้างแรงดันที่มีขนาดสูงขึ้นเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำรั่วของหม้อแปลงอีก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กิติพจน์ สิทธิเลิศพิศาล, “วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับลดฮาร์มอนิกและรักษาระดับแรงดัน”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

สรรคัษิพงษ์ โฆษิตเกษม, “วงจรรองกำลังแอกทีฟขนานแบบไฮบริดสำหรับกำจัดฮาร์มอนิก”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

สันต์ ศรีธรรมธีรารัง, “วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยรีเคอร์ซีฟดีเอพี”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

ภาษาอังกฤษ

A. Salem nia and S. Saadate, “Digital Control Active Filter Suppressing Particular Harmonic : Numerical Simulation and Experimentation”, *Proc.of ICHQP-Las Vegas*, 1996: pp.632-636.

H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, “Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuit”, *Proc.of IPEC-Tokyo*, 1983: pp.1375-1386.

N. Nanaumi, S. Kuramoti, and M.Yano, “Comparison of Versatile Hramonics Current Compensation and Specific Harmonic Number Current Compensation”, *Conf. Rec. of Japan IAS*, 1996: pp.407-410.

Subhashish Bhattacharya, Po-Tai Cheng, and Deepek M. Divan, “Control of Square-Wave Inverters in High-Power Hybrid Active Filter Systers”, *IEEE Trans. Industry Application*, vol.34, no.3, May/June 1998: pp.458-472.

Subhashish Bhattacharya, Po-Tai Cheng, and Deepek M. Divan, “Hybrid Solutions for Improving Passive Filter Performance in High Power Applications”, *IEEE Trans. Industry Application*, vol.33, no.3, May/June 1997: pp.732-747.



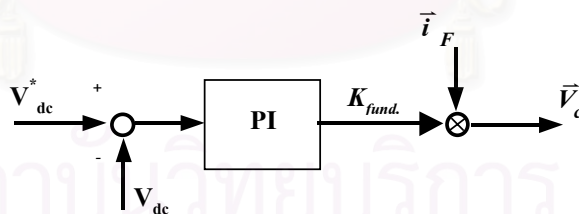
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การออกแบบตัวควบคุม PI สำหรับควบคุมระดับแรงดันไฟตรง
(กิตติพนธ์ สัทธิลิศจิตพิศาล, 2539)

จากทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ (ดูบทที่ 2) จะพบว่ากำลังงานส่วนที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกนั้นจะเป็นองค์ประกอบไฟสลับ (\tilde{p} และ \tilde{q}) ดังนั้นค่ากำลังงานที่ไหลเข้าออกจากอินเวอร์เตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใน 1 คาบเวลาจึงมีค่าเป็นศูนย์ ด้วยเหตุนี้เอง ส่วนของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวงจรกรองกำลังแอกทีฟจึงไม่จำเป็นต้องมีวงจรเรียงกระแสเพื่อจ่ายกำลังงานให้กับตัวเก็บประจุไฟตรงเหมือนอินเวอร์เตอร์ทั่วไป แต่จะอาศัยการควบคุมกำลังงานที่ไหลเข้าออกจากระบบในการควบคุมแรงดันไฟตรงที่จำเป็นต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์แทน โดยที่อินเวอร์เตอร์-เตอร์จะทำการสร้างแรงดันในวงจรกรองแอกทีฟกระทำต่อความถี่หลักมูลเสมือนค่าความต้านทาน $K_{fund.}$ เพื่อที่จะดึงพลังงานเข้าสู่ระบบ พลังงานที่ถูกดึงเข้าสู่ระบบจะถูกนำไปสะสมในตัวเก็บประจุทำให้ค่าระดับแรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันถ้าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด วงจรกรองแอกทีฟจะกระทำต่อความถี่หลักมูลเสมือนค่าความต้านทานที่เป็นลบ เพื่อที่จะจ่ายพลังงานออกไปจากอินเวอร์เตอร์ทำให้แรงดันบัสไฟตรงมีค่าลดลง ดังนั้นเราสามารถเขียนส่วนการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ตามบล็อกไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ ก.1 โดยจะป้อนกลับค่าแรงดันบัสไฟตรง V_{dc} เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง V_{dc}^* และควบคุมผ่านตัวควบคุม PI โดยค่าแรงดันที่ได้ก็จะไปรวมกับส่วนคำนวณแรงดันเสมือนตัวเหนี่ยวนำในการกำจัดฮาร์มอนิก



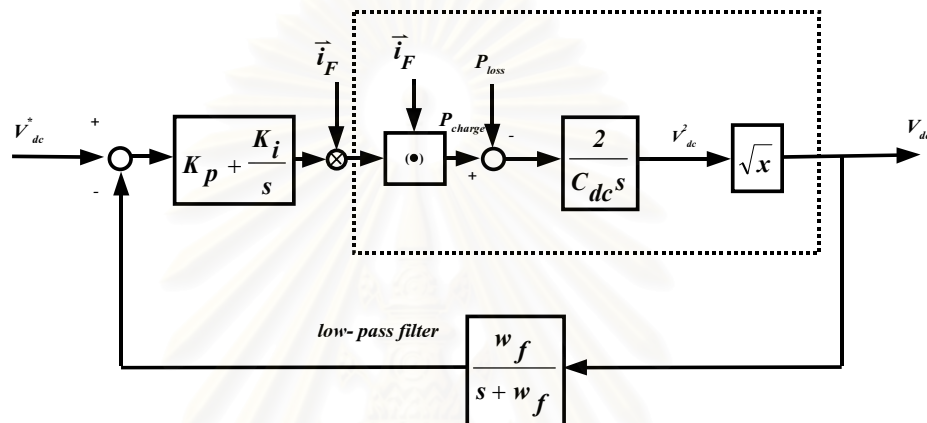
รูปที่ ก.1 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง

การออกแบบส่วนควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง

ในการออกแบบตัวควบคุม PI จะเริ่มจากการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเป็นบล็อกไดอะแกรมซึ่งเมื่อรวมกับบล็อกไดอะแกรมในส่วนของตัวควบคุม PI และวงจรกรองสัญญาณรบกวนแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก.2 โดยที่ในการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะอาศัยสมการพลังงานดังในสมการที่ (ก.1)

$$P_{charge} - P_{loss} = v_{dc}(t) i_{dc}(t) = v_{dc}(t) C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} C_{dc} \frac{d(v_{dc}^2)}{dt} \tag{ก.1}$$

- โดยที่ P_{charge} คือ ค่ากำลังงานที่ไหลเข้าอินเวอร์เตอร์
 P_{loss} คือ ค่ากำลังงานสูญเสียต่าง ๆ ของอินเวอร์เตอร์
 i_{dc} คือ ค่ากระแสที่ไหลเข้าออกจากอินเวอร์เตอร์
 C_{dc} คือ ตัวเก็บประจุไฟตรง



รูปที่ ก.2 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ในการออกแบบ

จากบล็อกไดอะแกรมจะพบว่ามีส่วนของการถอดรึกที่สองซึ่งเป็นส่วนที่ไม่เชิงเส้น(nonlinear) ทำให้เกิดความยุ่งยากในการออกแบบ ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้น (linearlization) ในช่วงการทำงานแคบ ๆ โดยจะใช้อนุกรมเทย์เลอร์ถึงอันดับที่ 1 ในการประมาณการถอดรึกที่สองให้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ณ จุดทำงานที่ $v_{dc} = 200 \text{ V}$. หรือ $x_0 = 200^2 \text{ V}^2$ ซึ่งสามารถแสดงดังนี้คือ

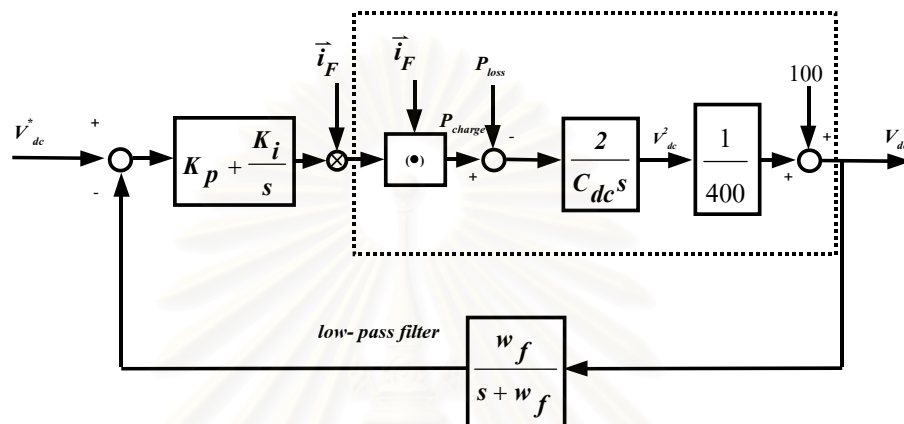
$$\begin{aligned} y(x) = \sqrt{x} &= \sqrt{x_0 + \Delta x} \approx \sqrt{x_0} + \left. \frac{d\sqrt{x}}{dx} \right|_{x=x_0} \cdot \Delta x \\ &\approx \sqrt{x_0} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} \cdot \Delta x \\ &\approx \sqrt{x_0} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} \cdot (x - x_0) \end{aligned} \tag{ก.2}$$

เมื่อแทนค่า $x_0 = 200^2 \text{ V}^2$ ลงในสมการ (ก.2) จะได้

$$y(x) \approx 200 + \frac{1}{400} (x - 200^2)$$

$$\approx 100 + \frac{1}{400} x \quad (ก.3)$$

เมื่อประมาณเป็นเชิงเส้นแล้วสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ ก.3 จากบล็อกไดอะแกรมสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดได้ดังสมการ (ก.3)



รูปที่ ก.3 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าตรงหลังจากประมาณเป็นระบบเชิงเส้น

ในการหาค่า K_p และ K_i เราจะพิจารณาจากบล็อกไดอะแกรมของระบบตามรูปที่ ก.3 ซึ่งจากรูปเราจะได้ฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดซึ่งมีสมการเป็น

$$G_0(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \times \left|\frac{\bar{i}_s}{i_s}\right|^2 \times \left(\frac{\omega_f}{s + \omega_f}\right) \times \left(\frac{1}{200C_{dc}s}\right) \quad (ก.4)$$

โดยที่ค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบมีค่าดังนี้คือ

$$C_{dc} = 2875 \mu\text{F}, \quad \omega_f = 100\pi \text{ rad./s.}$$

$$\left|\frac{\bar{i}_s}{i_s}\right| = 5 \text{ A.}$$

เมื่อพิจารณาในเรื่องของความเร็วในการตอบสนองแล้วเราไม่ควรออกแบบวงรอบควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงให้มีความเร็วในการตอบสนองถึงย่านความถี่ของฮาร์มอนิกเพราะจะทำให้กำลังงานรีแอกทีฟเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกไม่สามารถไหลเข้าสู่วงจรกรองแอกทีฟได้ซึ่งจะทำให้วงจรกรองแอกทีฟไม่ชดเชยฮาร์มอนิกในส่วนนี้ด้วย จากเหตุผลดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงออกแบบให้วงรอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงมีค่าความเร็วในการตอบสนองประมาณ 2 วินาที ซึ่งทำได้โดยเลือกความถี่ตัดข้าม (cross over frequency) $\omega_0 = 3 \text{ rad/s.}$ และเลือกค่าความถี่

ห้กมม (cut-off frequency) ของ PI (K_i/K_p) $\omega_c = 4$ rad/s. ซึ่งเป็นค่าที่ให้ช่วง
 ปลอดภัยเชิงเฟส (phase margin) ที่เพียงพอสำหรับเสถียรภาพในการควบคุม

$$\frac{K_i}{K_p} = 4 \quad \text{และ} \quad K_p = \frac{K_i}{4} \quad (\text{ก.5})$$

และ ณ จุดความถี่ตัดข้าม ω_0 จะได้ความสัมพันธ์ที่ว่า

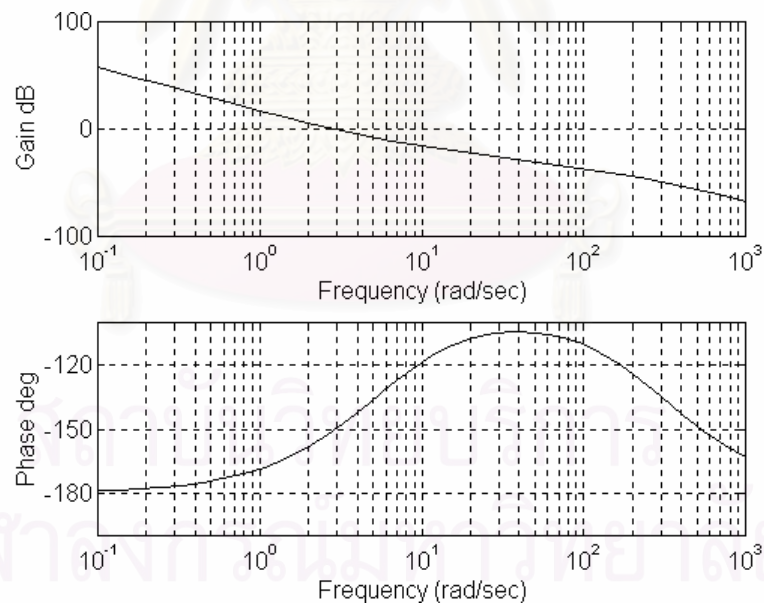
$$|G_o(j\omega_0)| = 1 \quad (\text{ก.6})$$

จากสมการที่(ก.4)และ(ก.5) ทำให้สามารถหาค่า K_p และ K_i ได้

$$K_p = 0.0331$$

$$K_i = 0.1656$$

จากค่า K_p และ K_i ที่ได้เมื่อทำการเขียนแผนภูมิโบเดของฟังก์ชันโอนย้าย
 วงรอบเปิดดังรูปที่ ก.4 จะสามารถหาค่าช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยาย (gain margin) และ
 ช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบได้เป็นอนันต์ และ 30 องศา ตามลำดับ



รูปที่ ก.4 ช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยายและช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

ประวัติผู้เขียน

นายคูสิต เลิศสวัสดิ์วิชา เกิดเมื่อวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2520 ที่อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) จากมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ปีการศึกษา 2540 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย