

การควบคุมวิธีใหม่สำหรับวงจรกรองแอกทิฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย



นาย อนุชา หริรัถย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

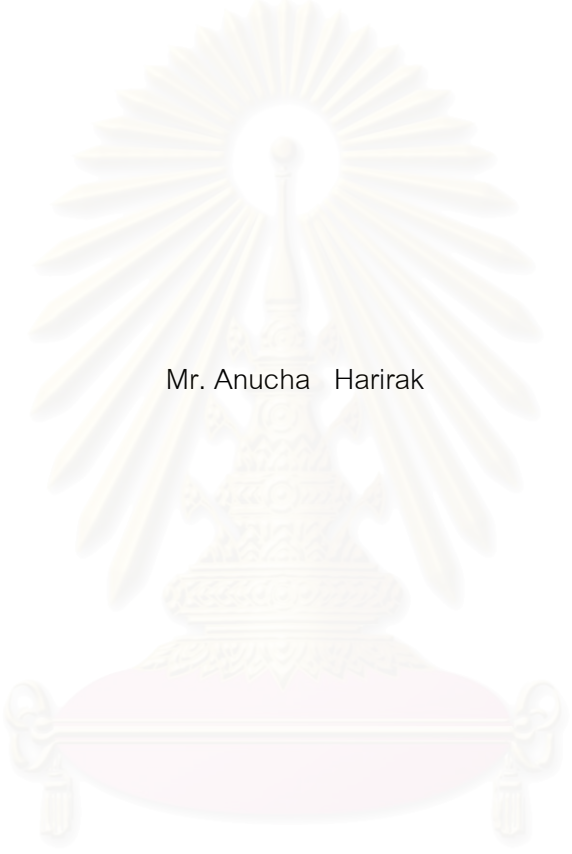
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6198-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A NOVEL CONTROL METHOD OF SHUNT ACTIVE FILTER WITH SOURCE CURRENT DETECTION



Mr. Anucha Harirak

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6198-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมวิธีใหม่สำหรับวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับ
กระแสด้านแหล่งจ่าย

โดย

นายอนุชา หิริรักษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.สมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิฑิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.สมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ สุวิทย์ นาคพีระยุทธ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อนุชา หริรักษ์ : การควบคุมวิธีใหม่สำหรับวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย. (A NOVEL CONTROL METHOD OF SHUNT ACTIVE FILTER WITH SOURCE CURRENT DETECTION) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 86 หน้า. ISBN 974-17-6198-8.

ในปัจจุบันวงจรกรองแอกทีฟที่นิยมใช้มีอยู่ 2 แบบ คือแบบตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านโหลด และแบบตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่าย วงจรกรองทั้งสองแบบเมื่อพิจารณาโดยผิวเผินจะดูแตกต่างกัน ทำให้การวิจัยและพัฒนาแยกออกเป็น 2 แนวทางและได้ข้อสรุปของคุณสมบัติแตกต่างกัน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอมุมมองใหม่ในการพิจารณาวงจรกรองแอกทีฟแบบตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านโหลดร่วมกับตัวควบคุมกระแสในวงจร โดยแสดงให้เห็นว่าวงจรกรองดังกล่าวสามารถเขียนอยู่ในรูปของวงจรกรองที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายได้ ซึ่งแสดงถึงความสมมูลกันทางทฤษฎีของวงจรกรองทั้งสองแบบ และวงจรกรองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีตรวจจับและป้อนกลับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่มีข้อได้เปรียบกว่าการตรวจจับกระแสด้านโหลดในกรณีของความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับกระแส วงจรที่นำเสนอนี้มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการนำไปใช้จริงโดยการเลือกใช้ตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอซีฟดีเอพีทีและตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำที่ได้เป็นฟังก์ชันอินย่ายที่ง่ายในการคำนวณ และยังได้วิเคราะห์และออกแบบส่วนควบคุมในวงจรกรอง ทำให้วงจรกรองโดยรวมมีเสถียรภาพ วงจรกรองที่นำเสนอได้ถูกนำไปสร้างจริงซึ่งผลการทดลองยืนยันถึงสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีของวงจร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2547.....

4470634921 : MAJOR POWER ELECTRONIC

KEY WORD: ACTIVE FILTER / SOURCE CURRENT DETECTION / RECURSIVE DFT / REPETITIVE CONTROL

ANUCHA HARIRAK : A NOVEL CONTROL METHOD OF SHUNT ACTIVE FILTER WITH SOURCE CURRENT DETECTION. THESIS ADIVSOR : DR. SOMBOON SANGWONGWANICH, D.Eng. 86 pp. ISBN 974-17-6198-8.

At present, power active filters are usually classified into two types: the first one is based on the load-current harmonic detection and the second one is based on the source-current harmonic detection. This viewpoint leads to separate research results and the corresponding active filter characteristics are accepted to be different.

This thesis proposes a new viewpoint to consider the load-current detection active filter together with its current controller, and points out its equivalence with the source-current detection structure. As the source-current detection active filter has several advantages over the load-current detection type, especially when the current sensor characteristic is non-linear, the active filter based on source-current harmonic detection and feedback is adopted in this thesis. The control structure of the active filter is further made simple by using the recursive discrete Fourier transform in the harmonic detection and the repetitive control algorithm in the current control. The resultant active filter is then analyzed and designed to obtain a stable harmonic cancellation. Finally, the proposed active filter is implemented, and the test results indicate satisfactory harmonic cancellation characteristics.

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature.....

Field of study.....Electrical Engineering..... Advisor' signature.....

Academic year...2004.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.สมบุญ งามวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ต่อการทำวิจัยและการดำเนินชีวิต ขอขอบคุณ อาจารย์ทั้งหลายที่ให้วิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ขอขอบคุณ พี่ประจวบ เอี่ยมสำอาง ที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และให้คำปรึกษาด้านต่างๆ ในการทำวิจัย รวมถึง บริษัท เอ.พี.วาย. เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย ขอขอบคุณทุนทบวงมหาวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย ขอขอบคุณการไฟฟ้านครหลวง ที่ทำให้มีทุนสนับสนุนสำหรับดำเนินชีวิตในช่วงการทำวิจัย ขอขอบคุณรุ่นน้องรุ่นพี่และรวมถึงเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ให้ทั้งความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ จากกองวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้านครหลวงที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งเป็นแรงบันดาลใจในการทำวิจัย ให้โอกาสทางการศึกษาและให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเบื้องต้น.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับวงจรรองแอกทีฟ	4
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของวงจรรองแอกทีฟแบบขนาน	4
2.2 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟที(Recursive DFT).....	5
2.3 การควบคุมกระแสฮาร์มอนิกด้วยตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ	8
3. วงจรรองแอกทีฟที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่สมดุล	
กับการตรวจจับด้านโหลด.....	.13
3.1 ตำแหน่งการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก	13
3.1.1 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด	13
3.1.2 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่าย.....	14
3.2 วงจรรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่สมดุลกับ	
การตรวจจับกระแสด้านโหลด.....	14

บทที่	หน้า
3.3 การนำตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีมาใช้ร่วมกับ ตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ	16
3.4 การสร้างวงจรรองแอกทีฟที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่าย	18
4. การออกแบบวงจรรองแอกทีฟ.....	27
4.1 การวิเคราะห์วงรอบกระแสหลักมูล	24
4.2 การวิเคราะห์วงรอบปิดของวงจรรองแอกทีฟโดยรวม	26
5. การจำลองการทำงานและการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก	28
5.1 การจำลองการทำงาน.....	28
5.2 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก	38
5.2.1 การกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 1 อันดับ	38
5.2.2 การกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 2 อันดับ	45
5.2.2 การกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 3 อันดับ.....	55
5.3 ผลตอบสภาวะชั่วคราวของวงจรรองแอกทีฟ.....	65
5.4 สรุปผลการทดลอง	69
6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	70
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก.....	75
ภาคผนวก ข.....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	86

ตารางที่

หน้า

5.1 สรรูปผลลการกำจัลดฮาร้มนิกทีละ 1 ันด้บ.....	38
5.2 สรรูปผลลการกำจัลดฮาร้มนิกพร้อมกันทีละ 2 ันด้บ.....	45
5.3 สรรูปผลลการกำจัลดฮาร้มนิกพร้อมกันทีละ 3 ันด้บ.....	55
6.1 เปร้บเทียบปริมาณฮาร้มนิกกรณีกำจัลดฮาร้มนิกเฉพาะันด้บ.....	70



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1	การใช้วงจรรองแอกทีฟกำจัดกระแสฮาร์มอนิก	4
2.2	วงจรมมูลต่อเฟสของวงจรในรูปที่ 2.1.....	4
2.3	การทำ Running DFT	6
2.4	ตำแหน่งขั้วและศูนย์ของ $D_h(z)$ เมื่อ $N = 20$ และ $h = 7$	8
2.5	การเชื่อมต่อของวงจรรองแอกทีฟที่ใช้อินเวอร์เตอร์แรงดัน.....	9
2.6	แผนภาพแสดงวงรอบควบคุมกระแส	9
2.7	แผนภาพของตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำในเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง	10
2.8	ตำแหน่งขั้วและศูนย์ของตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำเมื่อ $N = 20$	10
2.9	แผนภาพตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ	11
2.10	แผนภาพระบบควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำที่มีการใส่วงจรรองผ่านตัวที่ส่วนป้อนกลับ....	12
3.1	วงจรรองแอกทีฟที่ใช้การตรวจจักระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด	13
3.2	วงจรรองแอกทีฟที่ใช้การตรวจจักระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่าย	14
3.3	แผนภาพการควบคุมของวงจรรองแอกทีฟที่ตรวจจักระแสฮาร์มอนิกด้านโหลดเมื่อพิจารณาส่วนควบคุมกระแสร่วมด้วย.....	14
3.4	แผนภาพการตรวจจักระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่คิดมาจากการลดรูปการตรวจจักระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด.....	15
3.5	วงจรมมูลต่อเฟสการตรวจจักระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่คิดมาจากการลดรูปการตรวจจักระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด	15
3.6	แผนภาพการตรวจจักระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่มีส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรง	16
3.7	แผนภาพการตรวจจักระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่มีการแทนค่าฟังก์ชันโอนย้ายของตัวตรวจจักระแสฮาร์มอนิกและตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำและอิมพีแดนซ์เชื่อมโยง	17
3.8	แผนภาพของวงจรรองแอกทีฟหลังจากการลดรูปของตัวตรวจจักระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีและตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ.....	19
3.9	แผนภาพฟังก์ชันโอนย้ายการคำนวณหาแรงดันฮาร์มอนิกและการคำนวณหา องค์ประกอบแรงดันมูลฐาน.....	18
3.10	แผนภาพการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกบนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความถี่ฮาร์มอนิก $h\omega$...	20
3.11	แผนภาพรวมการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน	21
3.12	แผนภาพการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละหลายอันดับที่มีการคำนวณบนแกนหมุน.....	21

3.13	แผนภาพการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่หลายอันดับที่มีการคำนวณบนแกนหมุน พิจารณาแบบเวลาต่อเนื่อง.....	22
3.14	แผนภาพการลดรูปการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่หลายอันดับแบบเวลาต่อเนื่องที่มี การคำนวณบนแกนหมุน	23
4.1	แผนภาพวงรอบควบคุมกระแสหลักมูล	24
4.2	แผนภาพวงรอบควบคุมกระแสมูลฐานที่มีการชดเชยเสถียรภาพ	24
4.3	แผนภาพการลดรูปรวมกันของฟังก์ชันอินทรีย์ $\frac{1}{Ls + R}$ กับตัวชดเชย K_c	25
4.4	แผนภาพวงจรรวมกรณีกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่หลายอันดับและมีการ เพิ่มตัวชดเชยวงรอบควบคุมกระแสหลักมูล	26
4.5	ทางเดินขั้วของวงจรเมื่อ K' เปลี่ยนค่าจาก 1 ถึง 2,000,000	28
5.1	แผนภาพการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	29
5.2	ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 6 อันดับ (อันดับที่ 5^{th} & 7^{th} & 11^{th} & 13^{th} & 17^{th} และ 19^{th}) เมื่อกระแสไหลดเปลี่ยนแปลงแบบขั้น	30
5.3	ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 6 อันดับ (อันดับที่ 5^{th} & 7^{th} & 11^{th} & 13^{th} & 17^{th} และ 19^{th}) เมื่อวงจรรองแยกที่ฟเริ่มจ่ายกระแส.....	31
5.4	ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 1 อันดับ (อันดับที่ 5^{th}) เมื่อ กระแสไหลดเปลี่ยนแปลงแบบขั้น.....	32
5.5	ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 1 อันดับ (อันดับที่ 5^{th}) เมื่อ วงจรรองแยกที่ฟเริ่มจ่ายกระแส	33
5.6	ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 2 อันดับ (อันดับที่ 5^{th} และ 7^{th}) เมื่อ กระแสไหลดเปลี่ยนแปลงแบบขั้น.....	34
5.7	ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 2 อันดับ (อันดับที่ 5^{th} และ 7^{th}) เมื่อ วงจรรองแยกที่ฟเริ่มจ่ายกระแส	35
5.8	ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 3 อันดับ (อันดับที่ 5^{th} & 7^{th} และ 11^{th}) เมื่อกระแสไหลดเปลี่ยนแปลงแบบขั้น	36
5.9	ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 3 อันดับ (อันดับที่ 5^{th} & 7^{th} และ 11^{th}) เมื่อวงจรรองแยกที่ฟเริ่มจ่ายกระแส.....	37
5.10	ผลการกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5^{th}	39

5.11 ผลการกำจัดเฉพาะสารรมอนิกอันดับที่ 7 th	40
5.12 ผลการกำจัดเฉพาะสารรมอนิกอันดับที่ 11 th	41
5.13 ผลการกำจัดเฉพาะสารรมอนิกอันดับที่ 13 th	42
5.14 ผลการกำจัดเฉพาะสารรมอนิกอันดับที่ 17 th	43
5.15 ผลการกำจัดเฉพาะสารรมอนิกอันดับที่ 19 th	44
5.16 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 5 th และอันดับที่ 7 th	46
5.17 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 5 th และอันดับที่ 11 th	47
5.18 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 5 th และอันดับที่ 13 th	48
5.19 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 5 th และอันดับที่ 17 th	49
5.20 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 5 th และอันดับที่ 19 th	50
5.21 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 11 th และอันดับที่ 13 th	51
5.22 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 11 th และอันดับที่ 19 th	52
5.23 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 13 th และอันดับที่ 17 th	53
5.24 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 17 th และอันดับที่ 19 th	54
5.25 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 5 th , 7 th และอันดับที่ 11 th	56
5.26 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 5 th , 7 th และอันดับที่ 13 th	57
5.27 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 5 th , 7 th และอันดับที่ 17 th	58
5.28 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 5 th , 7 th และอันดับที่ 19 th	59
5.29 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 7 th , 11 th และอันดับที่ 13 th	60
5.30 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 7 th , 11 th และอันดับที่ 19 th	61
5.31 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 11 th , 13 th และอันดับที่ 17 th	62
5.32 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 11 th , 13 th และอันดับที่ 19 th	63
5.33 ผลการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 13 th , 17 th และอันดับที่ 19 th	64
5.34 ผลตอบสภาวะชั่วคราวสำหรับการกำจัดสารรมอนิกอันดับที่ 5 th เมื่อกระแสไหลลด มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น	66

บทที่	หน้า
3.35 ผลตอบสภาวะชั่วคราวสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 th เมื่อวงจรรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแส.....	66
5.36 ผลตอบสภาวะชั่วคราวสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 2 อันดับ (อันดับที่ 5 th &7 th) เมื่อกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น.....	67
5.37 ผลตอบสภาวะชั่วคราวสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 2 อันดับ (อันดับที่ 5 th &7 th)เมื่อวงจรรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแส.....	67
5.38 ผลตอบสภาวะชั่วคราวสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 3 อันดับ (อันดับที่ 5 th &7 th &11 th) เมื่อกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น.....	68
5.39 ผลตอบสภาวะชั่วคราวสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 2 อันดับ (อันดับที่ 5 th &7 th &11 th) เมื่อวงจรรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแส.....	68
ก.1 โครงสร้างของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน 3 เฟส 3 สาย.....	75
ก.2 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์และส่วนวงจรควบคุมของวงจรรองแอกทีฟ.....	76
ก.3 ส่วนตรวจจับสัญญาณกระแส.....	77
ก.4 วงจรตรวจจับแรงดันบัลไฟตรง.....	77
ก.5 วงจรตรวจจับแรงดันไฟสลับ.....	78
ก.6 แผนภาพแสดงซอฟต์แวร์ของระบบ.....	81
ข.1 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมแรงดันไฟตรง.....	82
ข.2 แผนภาพของส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรงหลังจากทำการประมาณ รากที่สองให้เป็นเชิงเส้น.....	83
ข.3 โบดีพล็อตของระบบเมื่อยังไม่ได้ตัวชดเชยแบบ PI.....	84
ข.4 โบดีพล็อตของระบบหลังจากใส่ตัวชดเชยแบบ PI เมื่อ $k_i = 85.5 \times 10^{-6}$, $k_p = 0.0085576$	84
ข.5 แผนภาพการจำลองการทำงานโดย MATHLAB/SIMULINK.....	85
ข.6 ผลการจำลองการทำงาน เมื่อ $k_i = 85.5 \times 10^{-6}$, $k_p = 0.0085576$	85

รายการสัญลักษณ์

v_s	คือ แรงดันแหล่งจ่าย
z_s	คือ อิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย
i_s	คือ กระแสแหล่งจ่าย
i_L	คือ กระแสโหลด
i_{fh}	คือ องค์ประกอบหลักมูลของกระแสโหลด
i_{Lh}	คือ องค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสโหลด
i_c	คือ กระแสจากวงจรกรองแอกทีฟ
v_u	คือ แรงดันแหล่งจ่ายเฟส u
v_v	คือ แรงดันแหล่งจ่ายเฟส v
v_w	คือ แรงดันแหล่งจ่ายเฟส w
n	คือ จุดนิวัตต์
L	คือ ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง
h	คือ อันดับฮาร์มอนิก
$i(k)$	คือ สัญญาณรายคาบเวลาไม่ต่อเนื่อง
I_h	คือ ค่า Discrete Fourier Transform(DFT)
$D_h(z)$	คือ ฟังก์ชันโอนย้ายของตัวตรวจจับกระแสแบบรีเคอร์ซีฟดีเฟที
N	คือ จำนวนข้อมูลต่อคาบ
W	คือ $e^{\frac{j2\pi}{N}}$
e_i	คือ ค่าผิดพลาดด้านเข้า
$C(z)$	คือ ฟังก์ชันโอนย้ายของตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำ
T_s	คือ คาบการสุ่มค่าสัญญาณ(Sampling Period)
v_{af}	คือ แรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างขึ้น
v_c	คือ แรงดันที่จุดต่อร่วม
i_c^*	คือ กระแสคำสั่ง
z_s	คือ อิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย
z_f	คือ อิมพีแดนซ์เชื่อมโยง
i_1^*	คือ กระแสหลักมูลคำสั่ง
i_{DC}^*	คือ กระแสไหลเข้าตัวเก็บประจุคำสั่ง
v_h^*	คือ แรงดันฮาร์มอนิกคำสั่ง

- $G_h(z)$ คือ ฟังก์ชัน โอนย้ายการคำนวณหาองค์ประกอบฮาร์มอนิก
- $G_1(z)$ คือ ฟังก์ชัน โอนย้ายการคำนวณหาองค์ประกอบหลักมูล
- $G'_h(z)$ คือ ฟังก์ชัน โอนย้ายการคำนวณหาองค์ประกอบฮาร์มอนิก ทำการคำนวณบนแกนหมุน
- $G'_1(z)$ คือ ฟังก์ชัน โอนย้ายการคำนวณหาองค์ประกอบหลักมูล ทำการคำนวณบนแกนหมุน
- $h\omega$ คือ ความถี่ฮาร์มอนิก (rad/sec)
- v_1^* คือ แรงดันหลักมูลคำสั่ง
- i_{sd} คือ กระแสแหล่งจ่ายของค้ประกอบทางสเปซเวกเตอร์ในแกนอ้างอิงหมุน d
- i_{sq} คือ กระแสด้านแหล่งจ่ายของค้ประกอบทางสเปซเวกเตอร์ในแกนอ้างอิงหมุน q
- i_{su} คือ กระแสด้านแหล่งจ่ายเฟส u
- i_{sv} คือ กระแสด้านแหล่งจ่ายเฟส v
- i_{sw} คือ กระแสด้านแหล่งจ่ายเฟส w
- $i_{s\alpha}$ คือ กระแสด้านแหล่งจ่ายบนแกนอ้างอิง α
- $i_{s\beta}$ คือ กระแสด้านแหล่งจ่ายบนแกนอ้างอิง β
- v_d^* คือ แรงดันคำสั่งอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิงหมุน d
- v_q^* คือ แรงดันคำสั่งอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิงหมุน q
- v_α^* คือ แรงดันคำสั่งอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิง α
- v_β^* คือ แรงดันคำสั่งอินเวอร์เตอร์บนแกนอ้างอิง β
- s คือ ตัวอินทิเกรต
- K' คือ $\frac{K}{T_s}$
- $K1'$ คือ $\frac{K1}{T_s}$
- $G_{pf}(s)$ คือ ฟังก์ชัน โอนย้ายวงรอบเปิดวงรอบควบคุมกระแสหลักมูล
- K_c คือ ตัวชดเชยค่าคงที่

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเบื้องต้น

ในปัจจุบันได้มีการนำโหนดที่ไม่เป็นเชิงเส้นมาใช้กันมากขึ้นโดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง อาทิเช่น วงจรเรียงกระแส, อินเวอร์เตอร์, แหล่งจ่ายแรงดันสวิตชิง ฯลฯ ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากใน วงการอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังดังกล่าวก็ได้ก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิก ขึ้นมาในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะสร้างปัญหาโดยการเข้าไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบ เช่น อาจก่อให้เกิดปัญหากระแสและแรงดันเกินที่ตัวเก็บประจุที่ต่อในระบบเพื่อปรับปรุ่งค่าตัวประกอบ กำลัง หรืออาจก่อให้เกิดการทำงานผิดพลาดของระบบสื่อสาร, รีเลย์, ระบบคอมพิวเตอร์, ระบบควบคุม, เกิดความร้อนเกินในหม้อแปลงไฟฟ้า, เกิดการสูญเสียในระบบไฟฟ้า เป็นต้น

การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกที่ใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟ เข้ามาติดตั้งเพื่อที่จะกรองกระแสฮาร์มอนิก ออกไปจากระบบนั้นมีข้อเสียหลายประการ อาทิเช่น คุณสมบัติการกรองขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของ แหล่งจ่าย อาจเกิดปัญหากระแสเกิน ดังนั้นในระยะหลังจึงได้มีความพยายามที่จะนำเอาวงจรกรองแบบ แอกทีฟมาใช้แทนวงจรกรองแบบพาสซีฟ โดยจะนำมาต่อขนานกับโหนดซึ่งเรียกว่าวงจรกรองแอกทีฟแบบ ขนาน และนำมาต่ออนุกรมกับโหนดซึ่งเรียกว่าวงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรม และแบบที่ใช้วงจรกรองแอก ทีฟร่วมกับวงจรกรองแบบพาสซีฟหรือองค์ประกอบพาสซีฟ เช่น ตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุ ซึ่งเรามัก เรียกววงจรกรองกำลังแบบนี้ว่าเป็นแบบไฮบริด(Hybrid) อย่างไรก็ตามวงจรกรองที่มีการนำมาใช้จริงใน อุตสาหกรรมส่วนมากจะเป็นวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน ทั้งนี้เนื่องมาจากความง่ายของการออกแบบ และติดตั้ง ส่วนวงจรกรองแบบอนุกรมก็มีการผลิตอยู่บ้าง แต่ไม่เป็นที่แพร่หลายเพราะติดตั้งยากกว่าและ ต้องใช้ควบคู่กับวงจรแบบพาสซีฟด้วย ในส่วนวงจรกรองแบบไฮบริดนั้นถึงแม้จะช่วยลดขนาดของวงจร กรองแอกทีฟลง แต่จะทำให้ระบบมีความซับซ้อนมากขึ้นรวมทั้งจะทำให้เกิดข้อจำกัดของคุณสมบัติการ กำจัดฮาร์มอนิกด้วย

ในการนำวงจรกรองแอกทีฟมาต่อกับโหนดก็เพื่อให้วงจรกรองแบบแอกทีฟจ่ายกระแสฮาร์มอ นิกมาชดเชยกระแสฮาร์มอนิกจากโหนด วงจรกรองแอกทีฟมีข้อดีกว่าวงจรกรองแบบพาสซีฟ เช่น คุณสมบัติการกรองไม่ขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย สามารถจ่ายกระแสชดเชยได้ตามพิกัดสูงสุดของ วงจรกรองแอกทีฟ ทำให้ไม่เกิดภาวะกระแสเกิน และไม่เกิดปัญหาแรงดันเกินเหมือนในกรณีที่ใช้วงจรกรอง แบบพาสซีฟ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกที่จะพัฒนาวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน

วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานที่ใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตาม ลักษณะของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้คือ (1) วงจรกรองแบบ 3 เฟส 3 สาย และ (2) วงจรกรองแบบ 3 เฟส 4 สาย วงจรกรองแบบ 3 เฟส 3 สาย อินเวอร์เตอร์จะเป็นแบบ 3 เฟสบริดจ์ และมีตัวเก็บประจุเป็นตัวสร้าง

แหล่งแรงดันไฟตรง วงจรกรองแบบนี้จะไม่สามารถจ่ายกระแสที่ควอนซ์ศูนย์ที่ไหลในสายนิวทรัลได้ วงจรกรองแยกที่ฟแบบนี้จึงไม่สามารถที่จะกำจัดฮาร์มอนิกที่ควอนซ์ศูนย์หรือความไม่สมดุลของกระแส 3 เฟสได้ วงจรกรองแบบนี้จึงเหมาะที่จะใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่โหลดมีความสมดุลเท่านั้น ในกรณีของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย โดยทั่วไปเป็นวงจรกรองแบบ 3 เฟส 4 สาย ซึ่งสามารถจ่ายกระแสชดเชยลำดับศูนย์ในสายนิวทรัลได้ แต่ทั้งนี้ต้องมีส่วนควบคุมการไหลของกระแสที่ควอนซ์ศูนย์ สำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลด้วย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้วงจรกรองแยกที่ฟแบบ 3 เฟส 3 สาย เนื่องจากต้องการแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกำจัดฮาร์มอนิกของวิธีการใหม่ที่นำเสนอ ซึ่งวิธีการใหม่ที่นำเสนอนี้เมื่อสามารถนำไปใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สายได้แล้ว ในทางทฤษฎีก็จะสามารถนำไปใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ได้ เพียงเพิ่มส่วนควบคุมการไหลของกระแสที่ควอนซ์ศูนย์ที่ไหลเข้าออกวงจรกรองแยกที่ฟ

วงจรกรองแยกที่ฟที่นิยมใช้มีอยู่ 2 แบบ คือแบบตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านโหลด และแบบตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่าย วงจรกรองทั้งสองแบบเมื่อพิจารณาโดยผิวเผินจะดูแตกต่างกัน ทำให้การวิจัยและพัฒนาแยกออกเป็น 2 แนวทางและได้ข้อสรุปของคุณสมบัติที่แตกต่างกัน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอมุมมองใหม่ในการพิจารณาวงจรกรองแยกที่ฟแบบตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านโหลดร่วมกับตัวควบคุมกระแสในวงจร โดยแสดงให้เห็นว่าวงจรกรองดังกล่าวสามารถเขียนอยู่ในรูปของวงจรกรองที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายได้ ซึ่งแสดงถึงความสมมูลกันทางทฤษฎีของวงจรกรองทั้งสองแบบ และวงจรกรองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีตรวจจับและป้อนกลับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่มีข้อได้เปรียบว่าการตรวจจับกระแสด้านโหลดในกรณีของความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับกระแส วงจรที่นำเสนอนี้มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการนำไปใช้จริงโดยการเลือกใช้ตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอซีฟดีเอฟทีและตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำที่ได้เป็นฟังก์ชันโอนย้ายที่ง่ายในการคำนวณ และยังได้วิเคราะห์และออกแบบส่วนควบคุมในวงจรกรอง ทำให้งจรกรองโดยรวมมีเสถียรภาพ วงจรกรองที่นำเสนอได้ถูกนำไปสร้างจริง ซึ่งผลการทดลองยืนยันถึงสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีของวงจร

1.2 วัตถุประสงค์

ออกแบบและสร้างวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนาน ที่มีการตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่ายแบบใหม่ซึ่งมีความสมมูลกับวงจรกรองแยกที่ฟที่ตรวจจับกระแสด้านโหลดด้วยวิธีรีเคอซีฟดีเอฟที ร่วมกับการควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

พัฒนาสร้างวงจรรองแอกทีฟแบบขนานที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่ายที่มีโครงสร้างที่มีความสมมูลกับวงจรรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด โดยวงจรรองแอกทีฟที่สร้างต้องมีคุณสมบัติดังนี้ คือ ใช้ได้กับระบบแรงดัน 380 โวลต์ 3 เฟส 3 สาย มีกระแสพิกัด 5 แอมป์ ต่อเฟส และสามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายในอันดับใดๆ ที่ต้องการที่ไม่เกินอันดับที่ 20 ให้มีค่าไม่เกิน 0.5 แอมป์ หรือคิดเป็น 10% ของค่ากระแสพิกัดวงจรรอง

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาคุณสมบัติของวงจรรองแอกทีฟแบบต่างๆ
2. ศึกษาคุณสมบัติของการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีต่าง
3. ใช้คอมพิวเตอร์จำลองการทำงานของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย ที่มีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายด้วยวิธีรีโคโนสซิชันดีเอฟที และใช้การควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การทำงานทั้งด้านเสถียรภาพและผลตอบสนองภาวะชั่วครู่
4. สร้างต้นแบบวงจรรองแอกทีฟ
5. ทำการทดสอบวงจรทั้งหมด และทดลองใช้งาน
6. สรุปผล

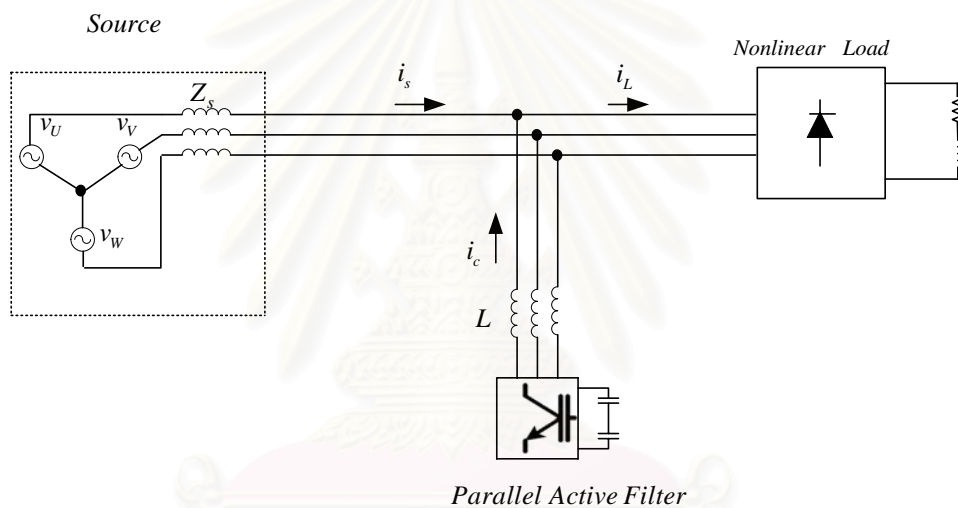
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีการพัฒนาเทคนิคการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายแบบใหม่ที่ง่ายต่อการสร้างจริงเพื่อใช้สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส
2. ได้เข้าใจถึงหลักการออกแบบการควบคุมของวงจรรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย
3. ผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้

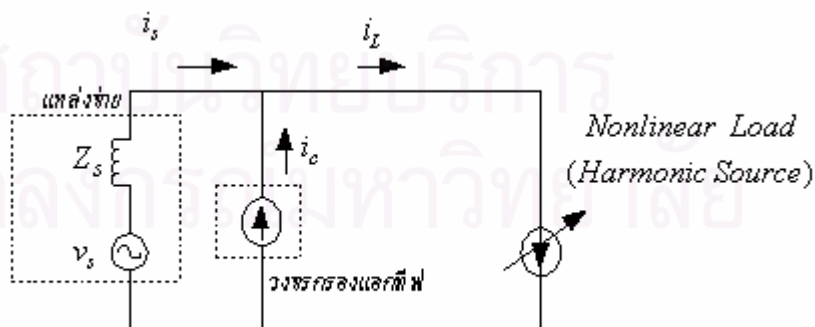
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับวงจรกรองแอกทีฟ

2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน

โหลดแบบไม่เชิงเส้นโดยทั่วไปจะสร้างกระแสฮาร์มอนิกไหลจากโหลดกลับไปสู่แหล่งจ่ายไฟทำให้กระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีความผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ส่งผลให้เกิดการผิดเพี้ยนของแรงดันตามมา ทำให้เกิดผลกระทบต่อนิโอดอื่นที่ต่อร่วมอยู่ด้วย เราสามารถลดผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นด้วยการใช้วงจรกรองแอกทีฟต่อขนานกับโหลดดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยวงจรกรองแอกทีฟจะตรวจจับกระแสและนำมาคำนวณหาฮาร์มอนิกแล้วทำการสร้างกระแสชดเชยไปหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกจากโหลด เพื่อให้กระแสจากแหล่งจ่ายมีเพียงแต่กระแสที่มีความถี่หลักมูลเท่านั้น



รูปที่ 2.1 การใช้วงจรกรองแอกทีฟกำจัดกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลต่อเฟสของวงจรในรูปที่ 2.1

- v_s คือ แรงดันแหล่งจ่าย
 z_s คือ อิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย
 i_s คือ กระแสแหล่งจ่าย
 i_L คือ กระแสโหลด
 i_{Lf} คือ องค์ประกอบหลักมูลของกระแสโหลด
 i_{Lh} คือ องค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสโหลด
 i_c คือ กระแสจากวงจรกรองแอกทีฟ
 v_u คือ แรงดันแหล่งจ่ายเฟส u
 v_v คือ แรงดันแหล่งจ่ายเฟส v
 v_w คือ แรงดันแหล่งจ่ายเฟส w
 n คือ จุดนิวทรัล
 L คือ ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง

เราสามารถเขียนวงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 2.1 ได้ดังรูปที่ 2.2 และจะได้ตามความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในส่วนต่างๆ เป็น

$$i_L = i_{Lf} + i_{Lh} \quad (2.1)$$

$$i_s = i_L - i_c \quad (2.2)$$

เมื่อแทน i_L จากสมการที่ (2.1) ลงในสมการที่ (2.2) และให้ $i_c = i_{Lh}$ จะได้

$$\begin{aligned} i_s &= i_{Lf} + i_{Lh} - i_{Lh} \\ &= i_{Lf} \end{aligned} \quad (2.3)$$

ดังนั้นเมื่อเราให้กระแสวงจรกรองแอกทีฟมีค่าเท่ากับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านโหลดจะทำให้กระแสด้านแหล่งจ่ายมีเฉพาะองค์ประกอบหลักมูลที่มีความถี่ 50 Hz

2.2 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟที(Recursive DFT)

การสร้างกระแสชดเชยของวงจรกรองแอกทีฟนั้นจำเป็นต้องรู้ว่ากระแสฮาร์มอนิกในระบบมีอยู่เท่าใด และต้องรู้ว่ากระแสฮาร์มอนิกใดอยู่ในระบบ ดังนั้นวงจรกรองแอกทีฟจึงต้องมีตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่ดี เพื่อที่จะได้ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกมาทำการคำนวณเพื่อที่จะสร้างกระแสชดเชยออกไป ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้เลือกตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟที ดังที่จะได้อธิบายต่อไป

สัญญาณรายคาบแบบเวลาไม่ต่อเนื่องโดยทั่วไปสามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลรวมขององค์ประกอบความถี่ต่างๆ ซึ่งอยู่ในรูปของเทอม $e^{j2\pi h}$ โดยที่ $h = 0, 1, -1, 2, -2, \dots$ และ N คือจำนวนข้อมูลต่อคาบ ดังแสดงในสมการที่ (2.4)

$$i(k) = \sum_{h=0}^{N-1} I_h e^{\frac{j2\pi hk}{N}} \tag{2.4}$$

เมื่อ I_h คือ ค่า Discrete Fourier Transform (DFT) ของฮาร์มอนิกอันดับที่ h และ $i(k)$ เป็นสัญญาณเข้ามีคาบเท่ากับ N เราสามารถคำนวณหาค่า DFT ของสัญญาณรายคาบ $i(k)$ เวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังสมการที่ (2.5)

$$I_h = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(k) e^{-\frac{j2\pi hk}{N}} \tag{2.5}$$

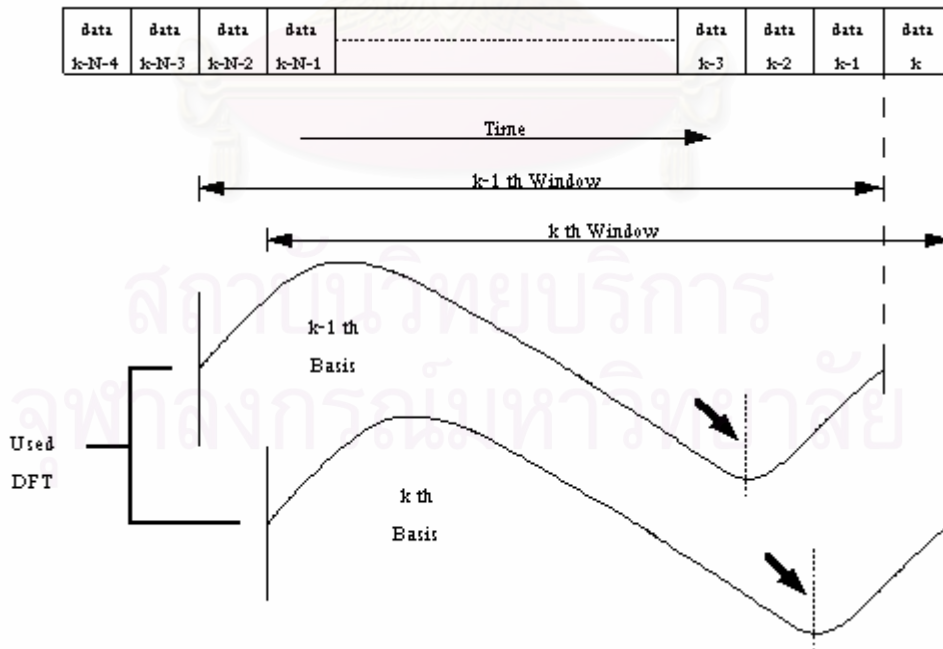
เมื่อกำหนดให้ $W = e^{\frac{j2\pi}{N}}$ สมการที่ (2.5) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.6)

$$I_h = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(k) W^{-hk} \tag{2.6}$$

เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกในระบบมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาดังนั้นในการทำ DFT เราจึงต้องเลือกรอบข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เลื่อนไปกับเวลา ซึ่งจะทำให้ได้ค่า DFT ที่ได้เป็นฟังก์ชันกับเวลาเรียกว่า Running DFT หรือ Sliding DFT ที่ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันฐานหลัก(Basis Function) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.7)

$$I_h(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(k-n) W^{hn} \tag{2.7}$$

การทำ Running DFT จะใช้ข้อมูลตั้งแต่จุดเวลาที่ $k - N + n$ ไปจนถึงจุดเวลาในปัจจุบัน คือ k โดยค่าฟังก์ชันฐานหลักที่ใช้ในการคำนวณจะต้องเลื่อนไปกับกรอบข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การทำ Running DFT

แทนค่า k ด้วย $(k-1)$ ลงในสมการที่ (2.7) จะได้สมการที่ (2.8)

$$I_h(k-1) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(k-1-n) W^{hn} \quad (2.8)$$

แทนค่า $n=m-1$ ลงในสมการที่ (2.8) จะได้

$$I_h(k-1) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N i(k-m) W^{h(m-1)} \quad (2.9)$$

คูณทั้งสองข้างด้วย W^h จะได้

$$W^h I_h(k-1) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N-1} i(k-m) W^{hm} + \frac{1}{N} i(k-N) W^{hN} \quad (2.10)$$

สมการที่ (2.7) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$I_h(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} i(k-n) W^{hn} + \frac{1}{N} i(k) \quad (2.11)$$

นำสมการที่ (2.9) เทียบกับสมการที่ (2.11) จะได้

$$\frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N-1} i(k-n) W^{hm} = I_h(k) - \frac{1}{N} i(k) \quad (2.12)$$

แทนสมการที่ (2.12) ลงในสมการที่ (2.10) และจัดรูปใหม่จะได้

$$I_h(k) = W^h I_h(k-1) + \frac{1}{N} \{i(k) - i(k-N) W^{hN}\} \quad (2.13)$$

เนื่องจาก $W^{hN} = 1$ จะได้รูปแบบการคำนวณแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟที (Recursive DFT) ดังสมการที่ (2.14)

$$I_h(k) = W^h I_h(k-1) + \frac{1}{N} \{i(k) - i(k-N)\} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.14) ค่า DFT ณ จุดเวลาปัจจุบัน ($I_h(k)$) สามารถหาค่าได้จากค่า DFT ณ จุดเวลาที่แล้ว ($I_h(k-1)$) คูณด้วย W^h และปรับค่าใหม่ด้วยเทอม $\frac{1}{N}$ คูณกับผลต่างของสัญญาณที่สุ่มค่าเข้ามาใหม่ ($i(k)$) กับสัญญาณเมื่อคาบเวลาที่แล้ว ($i(k-N)$) ในช่วงสภาวะกระแสอยู่ตัวและมีคาบพอดีเท่ากับ N ค่าผลต่าง ($i(k) - i(k-N)$) จะมีค่าเป็นศูนย์ตลอดเวลา ค่า DFT ณ จุดเวลาใหม่จะสามารถหาได้โดยใช้ค่า DFT เก่าเพียงอย่างเดียว ถ้ามองในเชิง Fourier Transform ในความหมายทั่วไปก็คือจะได้ขนาดและเฟสขององค์ประกอบที่ต้องการมีค่าคงที่ แต่ในที่นี้ขนาดของ DFT ที่ได้จะมีค่าคงที่แต่จะมีเฟสที่เปลี่ยนไปกับเวลาเรื่อยๆ ตามการคูณเข้ามาด้วย W^h ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1 สัญญาณขาออกที่ได้จะเป็นค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ณ เวลา k โดยตรง

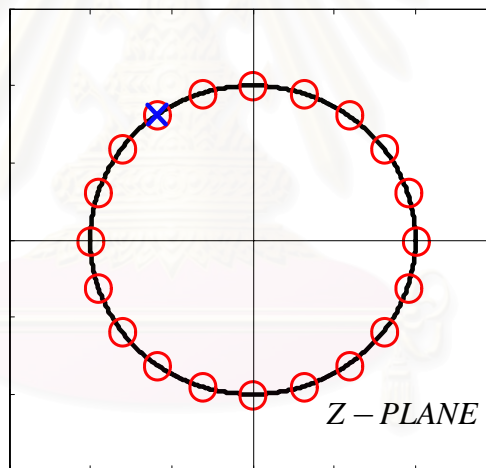
ในการคำนวณรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีนั้นเราจะเห็นได้ว่าในแต่ละครั้งที่มีการสุ่มค่ากระแสเข้ามาการหาค่า DFT ใหม่ของแต่ละฮาร์มอนิกจะใช้การคำนวณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้การคำนวณหาค่า DFT ของแต่ละฮาร์มอนิกจะเป็นอิสระต่อกันเราจึงสามารถเลือกที่จะคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกเฉพาะบางอันดับที่ต้องการได้ ถ้าเราคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกเพียงเฉพาะบางอันดับการคำนวณที่ต้องทำจะน้อยมากเมื่อเทียบกับการคำนวณแบบ Fast Fourier Transform (FFT) ตัวตรวจจับฮาร์มอนิกที่ได้จะมี

ลักษณะ Real – Time สมการที่ (2.14) เมื่อทำการแปลง Z สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายในรูปของ Z ได้ดังสมการที่ (2.15)

$$\begin{aligned} Z[I_h(k)] &= Z[W^h I_h(k-1) + \frac{1}{N} \{i(k) - i(k-N)\}] \\ D_h(z) &= \frac{I_h(z)}{I(z)} = \frac{1}{N} \frac{(1-z^{-N})}{(1-W^h z^{-1})} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$D_h(z)$ ในสมการที่ (2.15) มีรูปลักษณะของฟังก์ชันโอนย้ายคล้ายวงจรรอง IIR (Infinite Impulse Response Filter) แต่ในความเป็นจริงแล้ว $D_h(z)$ จะมีลักษณะเป็นวงจรรอง FIR (Finite Impulse Response Filter) เนื่องจากข้อ $1-W^h z^{-1}$ จะตัดกับศูนย์ตัวหนึ่งของ $1-z^{-N}$ พอดี ดังนั้นในความเป็นจริง $D_h(z)$ จึงมีแต่ศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (2.16) และสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นตัวอย่างการทำ DFT ในกรณีนี้ที่ $N = 20$ และ $h = 7$

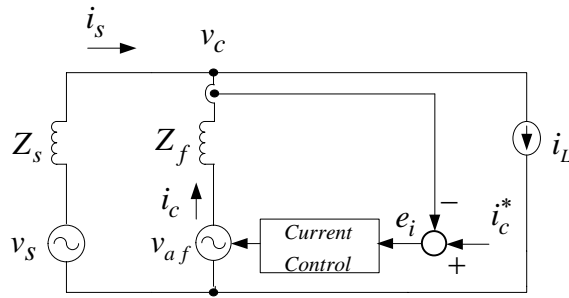
$$D_h(z) = \frac{1}{N} \prod_{i=0, i \neq n}^{N-1} (1-W^i z^{-1}) \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งขั้วและศูนย์ของ $D_h(z)$ เมื่อ $N = 20$ และ $h = 7$

2.3 การควบคุมกระแสฮาร์มอนิกด้วยตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำ

อินเวอร์เตอร์ในวงจรรองแยกที่ฟทำหน้าที่สร้างกระแสชดเชย(i_c) ตามกระแสชดเชยคำสั่ง (i_c^*) ที่คำนวณได้ เพื่อจ่ายกระแสเข้าไปหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกในระบบ โดยอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะสร้างแรงดันออก(v_{af}) เพื่อเอาชนะแรงดัน ณ จุดที่อินเวอร์เตอร์ต่ออยู่(v_c) เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวอิมพีแดนซ์เชื่อมโยงระบบมีค่าเพียงพอที่จะทำให้กระแสไหลเข้าสู่ระบบได้ตามต้องการ ดังสมการที่ (2.17)

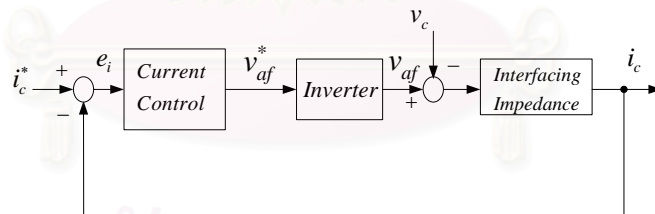


- โดยที่ v_{af} คือ แรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างขึ้น
- v_c คือ แรงดันที่จุดต่อร่วม
- i_c^* คือ กระแสคำสั่ง
- Z_f คือ อิมพีแดนซ์เชื่อมโยง

รูปที่ 2.5 การเชื่อมต่อของวงจรกรองแอกทีฟที่ใช้อินเวอร์เตอร์แรงดัน

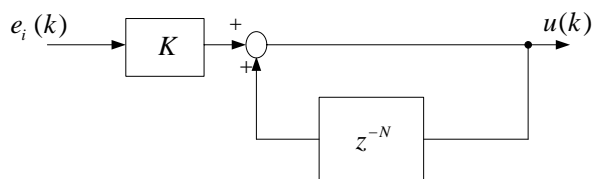
$$i_c = \frac{v_{af} - v_c}{Z_f} \tag{2.17}$$

ตัวควบคุมกระแส(Current Controller) จะนำค่ากระแสคำสั่งที่คำนวณได้ (i_c^*) และค่ากระแสของวงจรในขณะนั้น (i_c) ไปคำนวณหาค่าแรงดันคำสั่ง (v_{af}^*) อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันออก (v_{af}) ให้มีกระแสไหลเข้าสู่ระบบได้ตามต้องการซึ่งสามารถแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพการสร้างแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากกระแสคำสั่งทางด้านเข้าของตัวควบคุมกระแสสำหรับวงจรกรองแอกทีฟ ประกอบด้วยสัญญาณรูปคลื่นไซน์หลายความถี่ปะปนกันถ้าเราใช้ตัวควบคุมกระแสแบบ PI กระแสที่สร้างได้จริงในสภาวะอยู่ตัวจะผิดพลาดจากกระแสคำสั่ง อันเป็นผลเนื่องมาจากอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ PI มีค่าจำกัดที่ความถี่ฮาร์มอนิก ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ (Repetitive Current Control) ที่มีความเหมาะสมที่จะใช้ควบคุมสัญญาณคำสั่งที่มีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์หลายความถี่ปะปนกันซึ่งสามารถเขียนแผนภาพของตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำในเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังรูปที่ 2.7

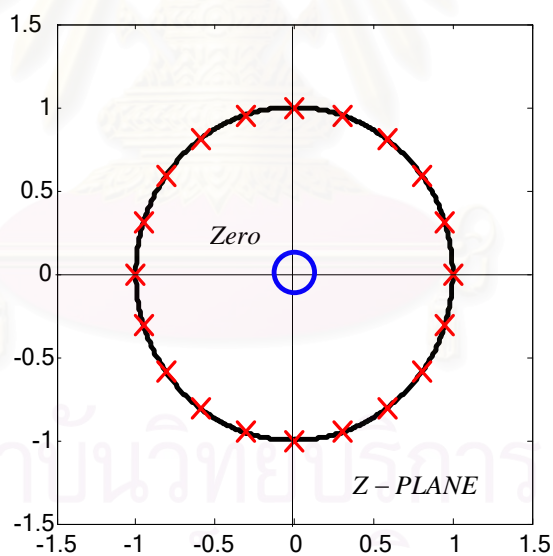


รูปที่ 2.7 แผนภาพของตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำในเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง

จากรูปที่ 2.7 สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำ ได้ดังสมการที่ (2.18)

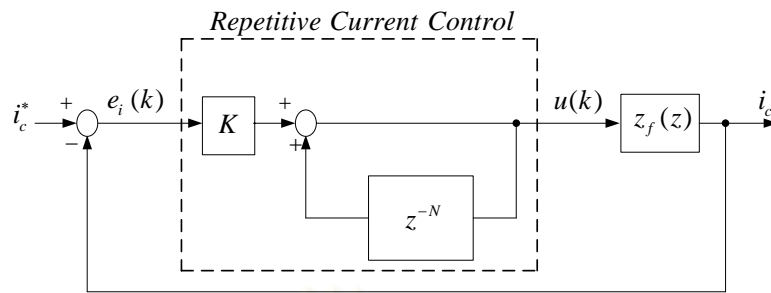
$$C(z) = \frac{U(z)}{E_i(z)} = \frac{K}{1 - Z^{-N}} \quad (2.18)$$

สมการที่ (2.18) สามารถนำมาวาดตำแหน่งขั้วและศูนย์ได้ดังรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำ มีศูนย์อยู่ที่จุดกำเนิดและมีขั้วกระจายอยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วย ณ ตำแหน่งความถี่ฮาร์มอนิก อัตราขยายของตัวควบคุมจะมีค่าสูงมาก แต่อัตราขยายจะมีค่าต่ำ ณ ตำแหน่งที่ไม่ใช่ความถี่ฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.8 ตำแหน่งขั้วและศูนย์ของตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำ เมื่อ $N = 20$

เมื่อเรานำตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำมาใช้ในการควบคุมกระแสสามารถเขียนเป็นแผนภาพของระบบในเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังรูปที่ 2.9 โดยที่ $z_f(z)$ คือ ค่าแปลง Z ของอิมพีแดนซ์เชื่อมต่อระหว่างวงจรรองแอกทีฟ



รูปที่ 2.9 แผนภาพตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ

จากรูปที่ 2.9 สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของระบบจากสัญญาณกระแสคำสั่งไปยังค่าผิดพลาดของกระแสได้ดังสมการที่ (2.19)

$$F(z) = \frac{E_i(z)}{I_c^*(z)} = \frac{1}{1 + \frac{K z_f(z)}{1 - z^{-N}}} \tag{2.19}$$

$E_i(z)$ และ $I_c^*(z)$ คือผลการแปลง Z ของ $e_i(k)$ และ $i_c^*(k)$ ตามลำดับ สัญญาณกระแสคำสั่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอนุกรมฟูริเยร์ได้ดังสมการที่ (2.20)

$$i_c^*(k) = \sum_{h=0}^{N-1} I_h e^{j\frac{2\pi hk}{N}} \tag{2.20}$$

เราสามารถพิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ของสมการที่ (2.19) ที่ความถี่ ω ใดๆ ได้โดยการแทนค่า Z ตามสมการที่ (2.21)

$$F(j\omega) = F(Z) \Big|_{z=e^{j\omega T_s}} \tag{2.21}$$

โดยที่ T_s คือคาบการสุ่มค่าสัญญาณ(Sampling Period)

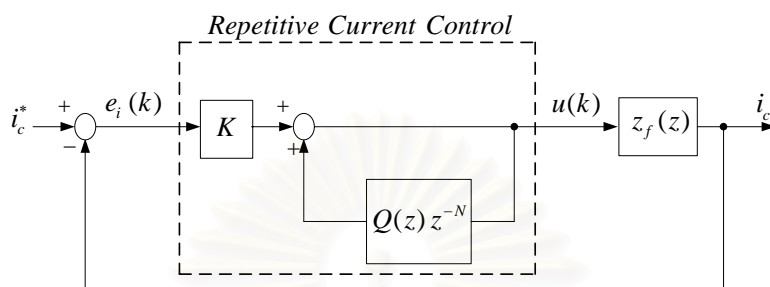
ในกรณีที่ฟังก์ชันโอนย้าย $z_f(z)$ เสถียรจะพบว่า

$$|F(j\omega)| = 0 \quad \text{ที่ } \omega = \frac{2\pi h}{NT_s} \quad \text{โดย } h=0,1,\dots,N-1 \tag{2.22}$$

กล่าวคือ $F(j\omega)$ มีค่าเป็นศูนย์ที่ทุกๆ ความถี่ฮาร์มอนิก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดของกระแสที่เกิดจากสัญญาณกระแสคำสั่งที่เป็นรายคาบจะถูกตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำกำจัดให้หมดไปหรือกล่าวได้ว่าระบบควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำสามารถควบคุมให้วงจรกรองแอกที่ฟสร้างกระแสจริงตามกระแสคำสั่งได้อย่างสมบูรณ์

เนื่องจากระบบควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำดังรูปที่ 2.9 มีอัตราขยายที่สูง ณ ตำแหน่งของความถี่ฮาร์มอนิกตั้งแต่ความถี่ศูนย์ไปจนถึงครึ่งหนึ่งของความถี่การสุ่มตัวอย่าง ซึ่งอัตราขยายที่มีค่ามาก ที่ความถี่สูงเช่นนี้อาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ และตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำยังเกิดปรากฏการณ์

Intersample Response เมื่อองค์ประกอบฮาร์มอนิกในสัญญาณกระแสมีความถี่เข้าใกล้ครึ่งหนึ่งของความถี่สุ่มตัวอย่าง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำใหม่ให้ตอบสนองต่อความถี่ที่จำกัดเฉพาะในย่านความถี่ที่ครอบคลุมอันดับของฮาร์มอนิกที่เราต้องการเท่านั้น ซึ่งจะทำได้โดยการใส่ตัวกรองผ่านต่ำ $Q(z)$ เข้าไปที่ส่วนป้อนกลับของตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพระบบควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำที่มีการใส่วงจรรองผ่านต่ำที่ส่วนป้อนกลับ

เมื่อมีการใส่วงจรรองผ่านต่ำเข้าไปในระบบจะทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่ออกจากวงจรรองผ่านต่ำ ทำให้สัญญาณฮาร์มอนิกในแต่ละความถี่เกิดการล่าช้าทางเวลาและการใส่ตัวกรองผ่านต่ำก็ยังทำให้อัตราขยายของตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำในช่วงของฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดลดลงไปด้วย

การนำตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำไปใช้นั้นยังมีข้อเสียอยู่คือ ความยุ่งยากในการออกแบบวงจรรองผ่านต่ำ, เกิดการล่าช้าทางเวลา, การลดทอนของอัตราขยายในช่วงความถี่ฮาร์มอนิก และเสถียรภาพของระบบ ซึ่งข้อเสียเหล่านี้สามารถกำจัดออกไปได้โดยการนำตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำไปพิจารณาใช้ร่วมกับตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีรีโคโนสตรัคชันที่ ดีเอฟที่ ดังที่จะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

วงจรกรองแอกทีฟที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่าย ที่สมมูลกับการตรวจจับด้านโหลด

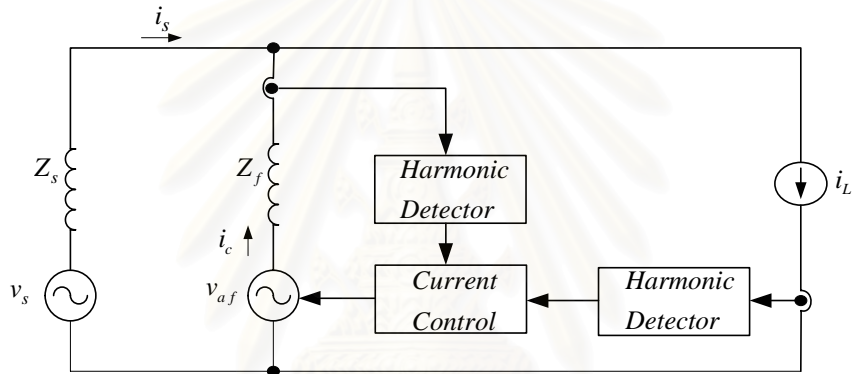
3.1 ตำแหน่งการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสามารถแบ่งตามตำแหน่งการตรวจจับได้ 2 แบบคือ

- การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด
- การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่าย

ในบทนี้เราจะเปรียบเทียบให้เห็นความคล้ายคลึงกันของวิธีการตรวจจับทั้งสองแบบนี้

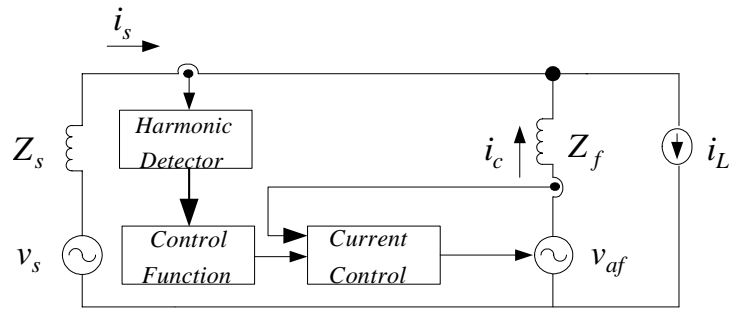
3.1.1 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด



รูปที่ 3.1 วงจรกรองแอกทีฟที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด

รูปที่ 3.1 แสดงวงจรสมมูลต่อเฟสของระบบที่ใช้วงจรกรองแอกทีฟแบบตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด ในกรณีนี้อุปกรณ์วัดกระแสจะถูกติดตั้งไว้ที่ด้านโหลด ซึ่งสัญญาณออกจะถูกส่งต่อไปยังตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก(Harmonic Detector) เพื่อคำนวณหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกในกระแสโหลด ส่วนอุปกรณ์ตัวตรวจจับกระแสอีกตัวหนึ่งที่ติดตั้งไว้ที่วงจรกรองแอกทีฟ จะทำหน้าที่ตรวจจับกระแสของวงจรกรองแอกทีฟว่ามีค่าตรงกับกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้จากทางด้านโหลดหรือไม่ ซึ่งถ้าหากมีความคลาดเคลื่อนตัวควบคุมกระแส(Current Control)ก็จะทำหน้าที่ปรับค่าแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์จนกระแสทั้งสองมีค่าเท่ากัน ผลก็คือกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดจะไหลวนระหว่างวงจรกรองแอกทีฟกับโหลดเท่านั้น ทำให้กระแสจากแหล่งจ่ายจึงมีเพียงองค์ประกอบหลักมูลตามที่ต้องการ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลดมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน การชดเชยฮาร์มอนิกเป็นไปในลักษณะวงรอบเปิดและให้คุณสมบัติการกรองที่ดีในกรณีที่อุปกรณ์วัดกระแส(Current Transformer Sensor)มีลักษณะที่เป็นอุดมคติ แต่การตรวจจับกระแสวิธีนี้ก็ยังมีข้อเสียเช่นกัน คือในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้หมดเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์วัดกระแส

3.1.2 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่าย

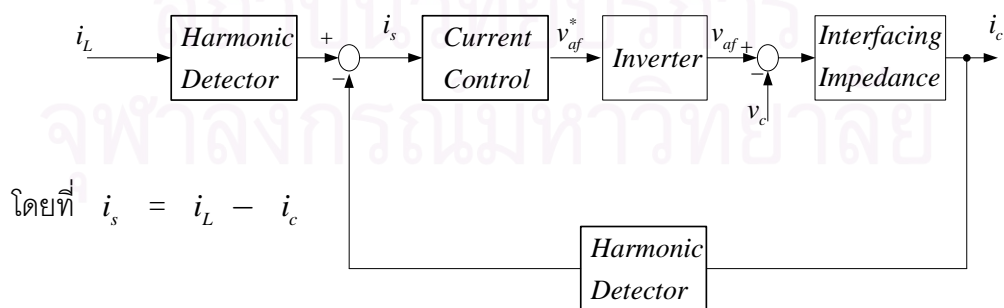


รูปที่ 3.2 วงจรกรองแอกทีฟที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่าย

รูปที่ 3.2 แสดงวงจรสมมูลต่อเฟสของวงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย อุปกรณ์วัดกระแสที่แหล่งจ่ายจะทำหน้าที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก และนำส่งค่าที่ตรวจจับได้ผ่านฟังก์ชันควบคุม (Control Function) ซึ่งจะทำหน้าที่กำหนดค่ากระแสที่วงจรกรองแอกทีฟควรจ่ายเข้าไปในระบบ โดยงานวิจัยส่วนใหญ่มักจะควบคุมให้วงจรกรองแอกทีฟประพฤติตัวดังเสมือนตัวเหนี่ยวนำค่าต่ำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน อันจะทำให้กระแสฮาร์มอนิกจากโหลดไหลลงสู่วงจรกรองแอกทีฟเหมือนในกรองวงจรแบบพาสซีฟ ตัวควบคุมกระแสจะทำหน้าที่ควบคุมให้กระแสของวงจรกรองแอกทีฟมีค่าตามค่าที่กำหนดโดยฟังก์ชันควบคุม ในกรณีทั่วๆ ไปตัวควบคุมกระแสจะเป็นแบบ PI หรือแบบฮิสเทเรซิส เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิก ทางด้านแหล่งจ่ายจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อวงจรกรองแอกทีฟจ่ายกระแสเข้าไปในระบบ จึงทำให้เกิดการทำงานในลักษณะวงรอบปิด วงจรกรองแอกทีฟในลักษณะนี้จึงต้องออกแบบโดยพิจารณาความถี่เสถียรภาพของระบบโดยรวมประกอบด้วย

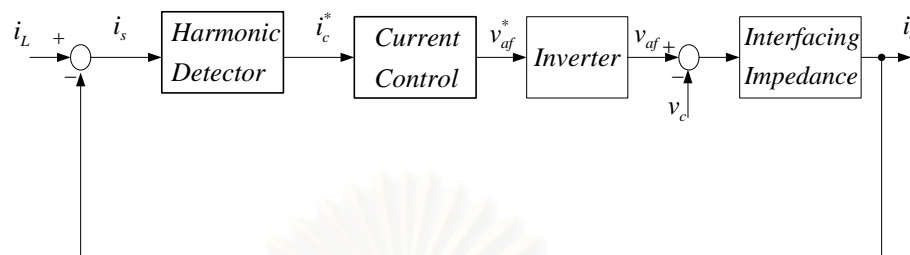
3.2 วงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่สมมูลกับการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด

วงจรสมมูลในรูปที่ 3.1 สามารถนำมาเขียนแผนภาพการควบคุมได้ดังรูปที่ 3.3

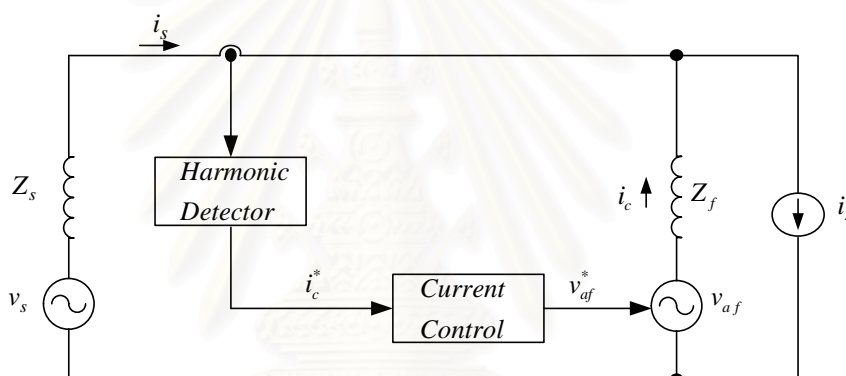


รูปที่ 3.3 แผนภาพการควบคุมของวงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด เมื่อพิจารณาส่วนควบคุมกระแสร่วมด้วย

จากรูปที่ 3.3 เราสามารถลดรูปตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่วงจรรองและที่โหลดมาเป็นตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายดังรูปที่ 3.4 และเมื่อนำแผนภาพในรูปที่ 3.4 ไปเขียนวงจรสมมูลต่อเฟสจะได้ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงถึงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายนั่นเอง



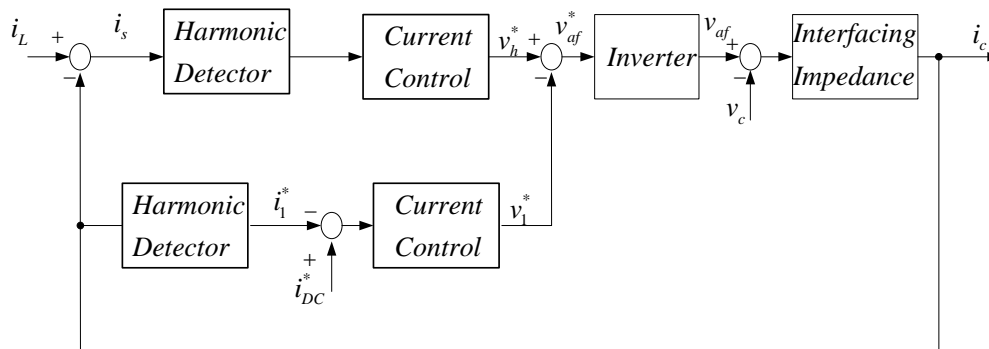
รูปที่ 3.4 แผนภาพการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่คิดมาจากการลดรูปการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลต่อเฟสการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่คิดมาจากการลดรูปการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด

จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 ทำให้เราได้ข้อสรุปว่า วงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด เมื่อพิจารณาส่วนควบคุมกระแสร่วมด้วยแล้ว จะสามารถแปลงเป็นวงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายได้

แต่เนื่องจากในทางปฏิบัตินั้นจำเป็นต้องมีส่วนควบคุมกระแสหลักมูล เพื่อรักษาระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะได้ดังรูปที่ 3.6



โดยที่ i_{DC}^* คือ กระแสไหลเข้าตัวเก็บประจุคำสั่ง

i_1^* คือ กระแสหลักมูลคำสั่ง

v_1^* คือ แรงดันหลักมูลคำสั่ง

v_h^* คือ แรงดันฮาร์มอนิกคำสั่ง

รูปที่ 3.6 แผนภาพการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่มีส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

แผนภาพรูปที่ 3.6 แสดงถึงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่คิดมาจากการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลด โดยมีการเพิ่มส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรงซึ่งทำให้ได้ข้อสรุปที่ว่า วงจรกรองแยกที่พีที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลดหรือด้านแหล่งจ่ายสามารถแปลงกลับไปมาระหว่างกันได้ ทำให้เราเข้าใจถึงความสมมูลกันในทางทฤษฎีของวงจรทั้งสองแบบ และในทางปฏิบัติแล้วในกรณีที่อยู่ปรกฏวัดกระแสมีอัตราขยายที่ไม่เป็นเชิงเส้น การตรวจจับกระแสจากด้านแหล่งจ่ายจะยังคงให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีกว่า และวงจรกรองยังมีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่าด้วย

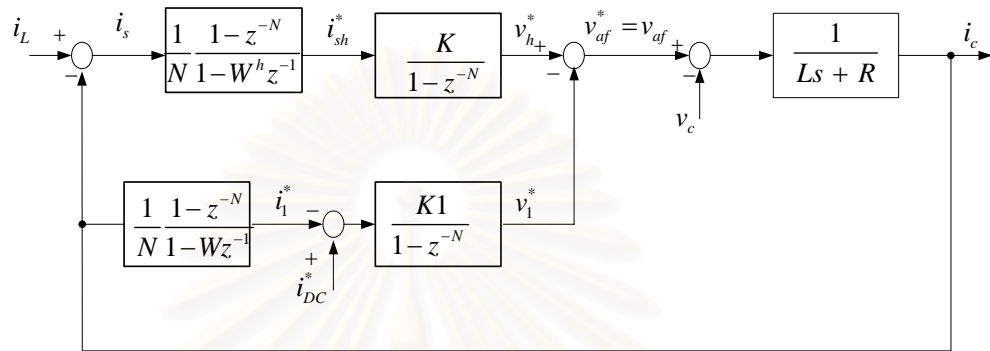
3.3 การนำตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีมาใช้ร่วมกับตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ

เนื่องจากองค์ประกอบของวงจรกรองแยกที่พีที่สำคัญๆ นั้นจะประกอบไปด้วยตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก(Harmonic Detector) และส่วนควบคุมกระแส(Current Control) ซึ่งมีอยู่หลายแบบ ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกตัวตรวจจับกระแสและตัวควบคุมกระแสมาใช้ โดยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟที และตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ ที่มีฟังก์ชันโอนย้ายเป็นไปตามสมการที่ (2.15) และ (2.18) ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

$$\text{Harmonic Detection Transfer Function : } D_h(z) = \frac{1}{N} \frac{1 - z^{-N}}{1 - W^h z^{-1}} \quad (2.15)$$

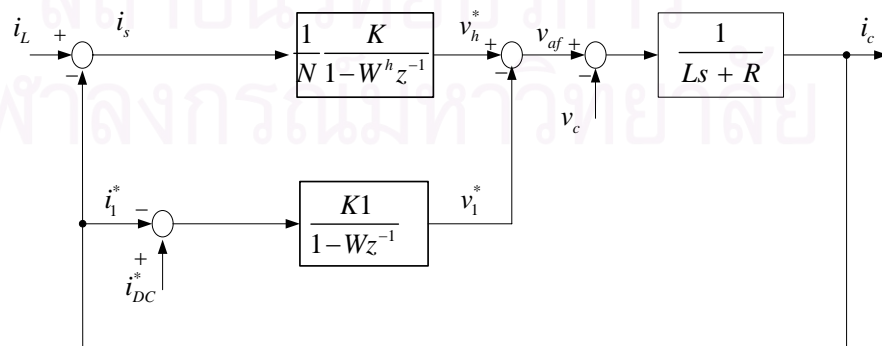
$$\text{Repetitive Current Control Transfer Function: } C(z) = \frac{K}{1 - z^{-N}} \quad (2.18)$$

เมื่อกำหนดให้ฟังก์ชันโอนย้ายของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 1 และฟังก์ชันโอนย้ายของอิมพีแดนซ์เชื่อมต่อ (Interfacing Impedance) เป็น $\frac{1}{Ls + R}$ แทนค่าฟังก์ชันโอนย้ายของตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟที, ตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ และอิมพีแดนซ์เชื่อมต่อลงในรูป 3.6 จะได้บล็อกไดอะแกรมของระบบดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายที่มีการแทนค่าฟังก์ชันโอนย้ายของตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและตัวควบคุมแบบวิธีทำซ้ำและอิมพีแดนซ์เชื่อมต่อ

จากรูปที่ 3.7 เราจะพบว่าเทอม $1 - z^{-N}$ ที่เป็นเศษของฟังก์ชันโอนย้ายของตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟที และเป็นส่วนของฟังก์ชันโอนย้ายของตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำนั้นสามารถตัดกันได้ รูปที่ 3.7 จึงสามารถลดรูปได้เป็นรูปที่ 3.8 ซึ่งจะได้ข้อสรุปว่า วงจรกรองแอกทีฟที่ใช้ตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลดแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีและตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ จะสมมูลกับวงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายป้อนกลับผ่านฟังก์ชันโอนย้ายที่มีขั้วอยู่ที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด ($z = W^h$) และในส่วนที่ตรวจจับกระแสหลักมูลจากวงจรกรองแอกทีฟจะมีขั้วอยู่ที่ความถี่หลักมูล ($z = W$) ซึ่งพบว่าเป็นวงจรที่มีโครงสร้างที่ง่ายกว่าวงจรเดิมมาก



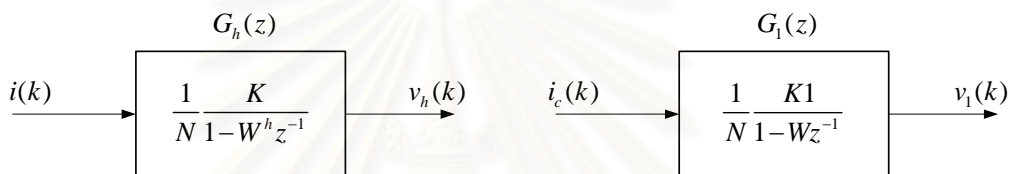
รูปที่ 3.8 แผนภาพของวงจรกรองแอกทีฟหลังจากการลดรูปของตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีและตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ

3.4 การสร้างวงจรกรองแอกทีฟที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 3.8 สามารถนิยามฟังก์ชันโอนย้าย $G_h(z)$ ดังสมการที่ (3.1) ของการกำจัดองค์ประกอบฮาร์มอนิก และฟังก์ชันโอนย้าย $G_1(z)$ ดังสมการที่ (3.2) ของการควบคุมองค์ประกอบหลักมูลได้ดังรูปที่ 3.9

$$G_h(z) = \frac{1}{N} \frac{K}{1 - W^h z^{-1}} \quad (3.1)$$

$$G_1(z) = \frac{1}{N} \frac{K1}{1 - W z^{-1}} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.9 แผนภาพฟังก์ชันโอนย้ายการกำจัดฮาร์มอนิกและการควบคุมองค์ประกอบแรงดันหลักมูล

การนำฟังก์ชันโอนย้าย $G_h(z)$ หรือ $G_1(z)$ ไปคำนวณในทางดิจิทัลนั้นไม่สามารถทำได้ง่ายเหมือนอย่างเนื่องจากสัมประสิทธิ์ W ที่ไม่เป็นเลขจำนวนเต็มทำให้ตำแหน่งของขั้วคลาดเคลื่อนไปจากวงกลมหนึ่งหน่วยในโดเมน Z ซึ่งจะมีผลต่อเสถียรภาพและความสามารถในการกำจัดฮาร์มอนิก ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาเราจึงต้องเปลี่ยนมาทำการคำนวณบนแกนอ้างอิงที่หมุนไปด้วยความถี่ฮาร์มอนิก h และที่ความถี่หลักมูลแทน เพื่อที่จะขจัดสัมประสิทธิ์ W^h และ W ดังจะแสดงได้ดังต่อไปนี้

จากทฤษฎีบทของ Z -Transform เมื่อ

$$Z[x(k)] = X(z) \quad (3.3)$$

จะได้ความสัมพันธ์ที่ว่า

$$Z[a^k x(k)] = X(a^{-1}z) \quad , \text{เมื่อ } a \text{ คือค่าคงที่ใดๆ} \quad (3.4)$$

โดยเทียบให้ $W^{-h} = a$ และ $v_h(k) = x(k)$

ถ้ากำหนดให้

$$G_h(z) = \frac{Z[v_h(k)]}{Z[i(k)]} \quad (3.5)$$

จะได้

$$Z[v_h(k)] = G_h(z) Z[i(k)] \quad (3.6)$$

และ

$$Z[W^{-hk} v_h(k)] = V_h(W^h z) \quad (3.7)$$

$$Z[W^{-hk} v_h(k)] = G_h(W^h z) Z[W^{-hk} i(k)] \quad (3.8)$$

กำหนดให้

$$v'_h(k) = W^{-hk} v_h(k) \quad (3.9)$$

$$i'(k) = W^{-hk} i(k) \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.8) จะได้

$$Z[v'_h(k)] = G_h(W^h z) Z[i'(k)] \quad (3.11)$$

จะได้

$$G_h(W^h z) = \frac{Z[v'_h(k)]}{Z[i'(k)]} \quad (3.12)$$

ดังนั้น

$$G'_h(z) = G_h(W^{-h} z) \quad (3.13)$$

ดังนั้นฟังก์ชันโอนย้าย $G_h(z)$ ของการคำนวณหาองค์ประกอบแรงดันฮาร์มอนิก และฟังก์ชันโอนย้าย $G_1(z)$ ของการคำนวณหาองค์ประกอบแรงดันหลักมูล เมื่อพิจารณาให้ทำการคำนวณบนแกนหมุนจะได้ดังสมการที่ (3.14) และ สมการที่ (3.15) ตามลำดับ

$$G'_h(z) = \frac{1}{N} \frac{K}{1-z^{-1}} \quad (3.14)$$

$$G'_1(z) = \frac{1}{N} \frac{K_1}{1-z^{-1}} \quad (3.15)$$

เมื่อเรานำการคำนวณบนแกนอ้างอิงที่หมุนไปด้วยความถี่ฮาร์มอนิก h และที่ความถี่หลักมูล สัมประสิทธิ์ W^h ในสมการที่ (3.1) และสัมประสิทธิ์ W ในสมการที่ (3.2) จะกลายเป็น 1 จึงไม่เป็นปัญหาในการเรื่องความคลาดเคลื่อนในการคำนวณทางดิจิทัล

ในการคำนวณหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้า 3 เฟส จะเริ่มจากการแปลงปริมาณกระแส 3 เฟส ไปเป็นปริมาณกระแสเฟสเวกเตอร์ ดังสมการที่ (3.16) จากนั้นนำกระแสบนแกนอ้างอิง α, β ไปคำนวณบนแกนอ้างอิงหมุน ที่หมุนไปด้วยความถี่ฮาร์มอนิก $h\omega$ ดังสมการที่ (3.17)

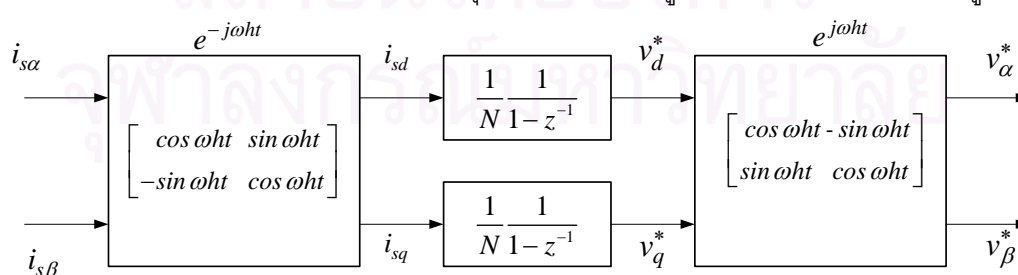
$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{su} \\ i_{sv} \\ i_{sw} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos h\omega t & \sin h\omega t \\ -\sin h\omega t & \cos h\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha}^* \\ v_{\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos h\omega t & -\sin h\omega t \\ \sin h\omega t & \cos h\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

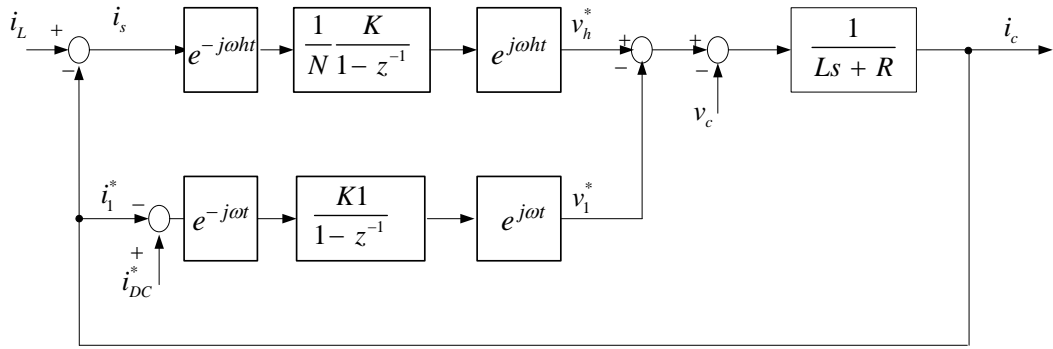
- โดยที่ i_{sd} คือ กระแสแหล่งจ่ายของค้ประกอบทางสเปซเวกเตอร์ในแกนอ้างอิงหมุน d
 i_{sq} คือ กระแสด้านแหล่งจ่ายของค้ประกอบทางสเปซเวกเตอร์ในแกนอ้างอิงหมุน q
 i_{su} คือ กระแสด้านแหล่งจ่ายเฟส u
 i_{sv} คือ กระแสด้านแหล่งจ่ายเฟส v
 i_{sw} คือ กระแสด้านแหล่งจ่ายเฟส w
 v_d^* คือ แรงดันบนแกนอ้างอิงหมุน d
 v_q^* คือ แรงดันบนแกนอ้างอิงหมุน q
 v_{α}^* คือ แรงดันบนแกนอ้างอิง α
 v_{β}^* คือ แรงดันบนแกนอ้างอิง β

กระแส i_{sd} , i_{sq} ที่ได้ นั้นจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบไฟตรงและไฟสลับ โดยองค์ประกอบที่มีความถี่ตรงกับความเร็วฮาร์มอนิกจะมีค่าเป็นไฟตรง ส่วนองค์ประกอบที่มีความถี่อื่นจะมีค่าเป็นไฟสลับ เมื่อนำกระแสทั้งสองส่วนนี้มาผ่านฟังก์ชันโอนย้าย $\frac{1}{1-z^{-1}}$ ซึ่งก็คือตัวอินทิเกรตจะได้เป็นแรงดันที่วงจรกรองแอกที่ฟต้องสร้าง v_{af}^* แต่ยังเป็นค่าบนแกนหมุน ดังนั้นเมื่อแปลงมาอยู่บนแกนนิ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.18) และถ้ากระแสแหล่งจ่ายมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ต้องการปะปนอยู่จะทำให้เกิดเป็นสัญญาณไฟตรงที่ถูกอินทิเกรตเกิดเป็นแรงดันที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสภาวะอยู่ตัวกระแสฮาร์มอนิกก็จะถูกกำจัดหมด และองค์ประกอบไฟตรงบนแกนหมุนก็จะลดลงเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



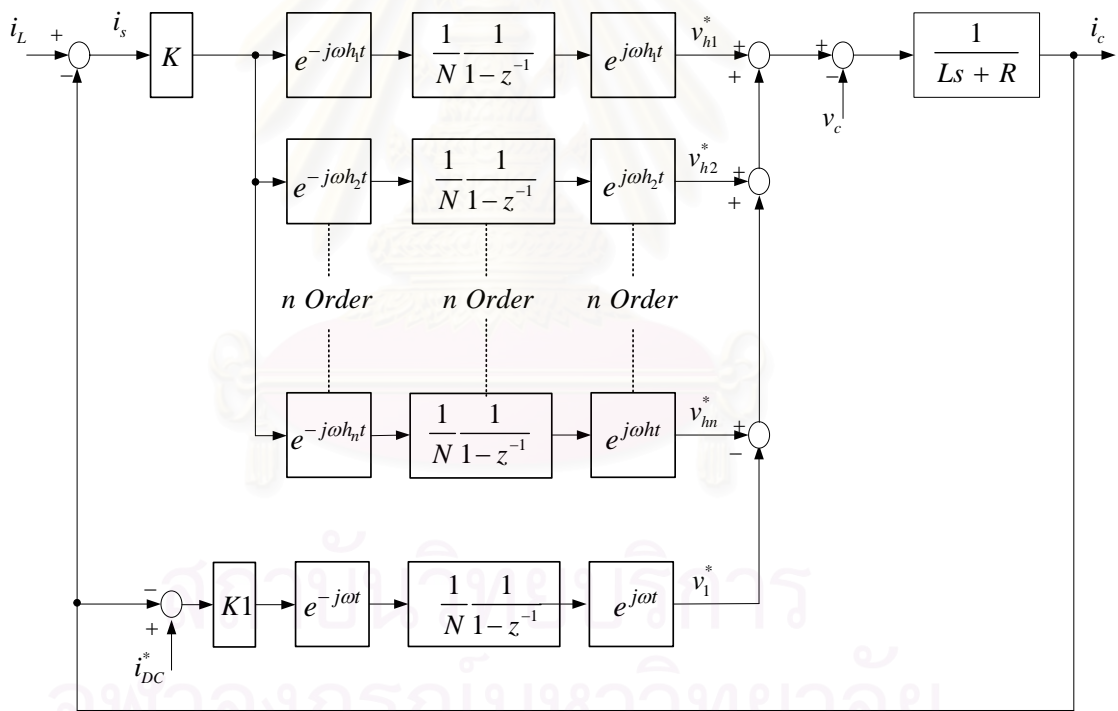
รูปที่ 3.10 แผนภาพการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกบนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความถี่ฮาร์มอนิก $h\omega$

รูปที่ 3.8 เมื่อนำมาคำนวณบนแกนหมุนจะได้ดังรูปที่ 3.11



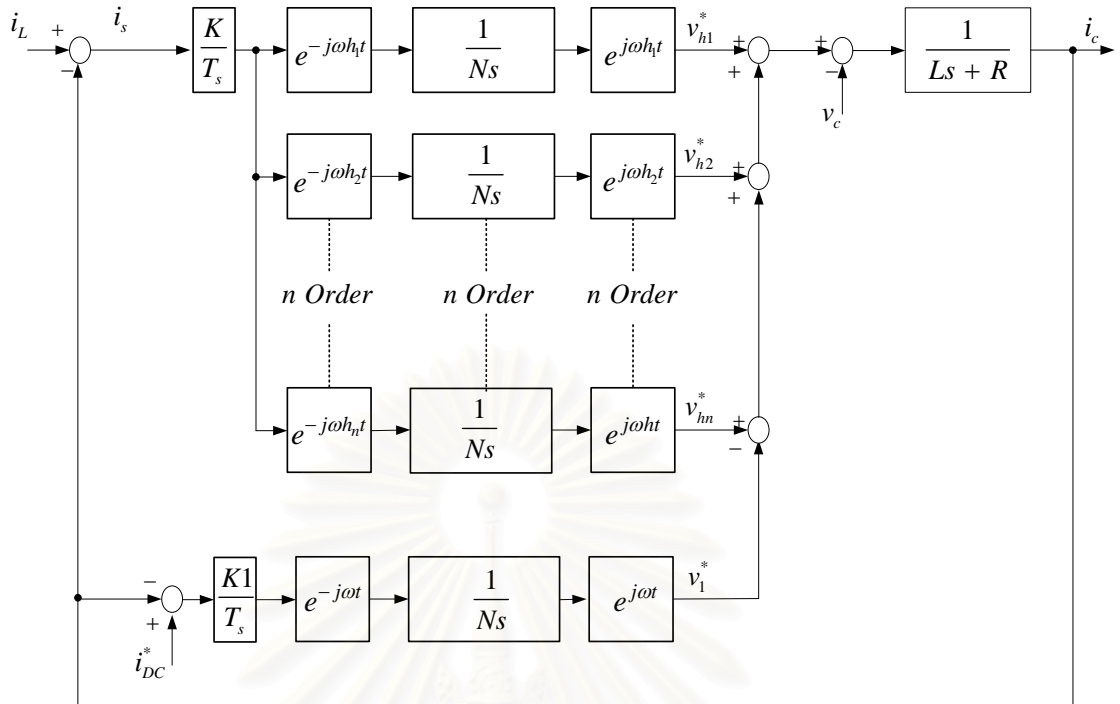
รูปที่ 3.11 แผนภาพรวมการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน

แผนภาพในรูปที่ 3.11 เป็นแผนภาพรวมของวงจรกรองแอกทีฟในกรณีที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับเดียว หากต้องการกำจัดพร้อมกันที่หลายอันดับวงจรกรองที่ใช้จะมีโครงสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนภาพการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่หลายอันดับที่มีการคำนวณบนแกนหมุน

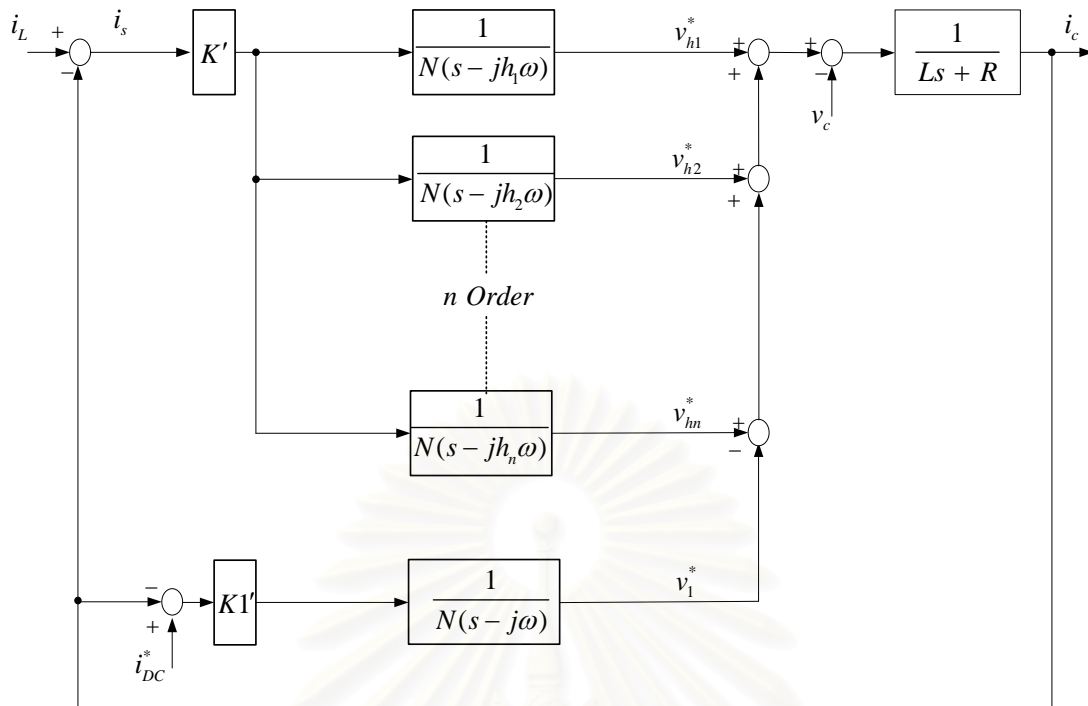
รูปที่ 3.12 เป็นการคำนวณในทางเวลาไม่ต่อเนื่อง ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเวลาต่อเนื่องได้ โดยแทนตัวอินทิเกรตแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง $\frac{1}{1-z^{-1}}$ ด้วยตัวอินทิเกรตแบบเวลาต่อเนื่อง $\frac{1}{sT_s}$ ซึ่งการกำจัดฮาร์มอนิกแบบเวลาต่อเนื่องสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนภาพการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่หลายอันดับที่มีการคำนวณบนแกนหมุน
พิจารณาแบบเวลาต่อเนื่อง

แผนภาพในรูปที่ 3.13 เพื่อให้เกิดความง่ายในการวิเคราะห์ต่อไปสามารถลดรูปการคำนวณบนแกนหมุน
แบบเวลาต่อเนื่อง (สรรคิพงษ์ โฆษิตเกษม) ได้ดัง รูปที่ 3.14

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



เมื่อ $K' = \frac{K}{T_s}$, $K1' = \frac{K1}{T_s}$

รูปที่ 3.14 แผนภาพการลดรูปการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่หลายอันดับแบบเวลาต่อเนื่องที่มี
การคำนวณบนแกนหมุน

จากแผนภาพรูปที่ 3.14 สรุปได้ว่า การนำเอาวิธีการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอซีฟดีเอฟที่มาใช้ร่วมกับตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ โดยการนำไปคำนวณบนแกนหมุนจะทำให้ได้ฟังก์ชันโอนย้ายที่ง่ายไม่ซับซ้อนเป็นตัวอินทิเกรตที่สามารถแสดงได้ทั้งในรูปแบบเวลาต่อเนื่องและแบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้ ทั้งยังช่วยลดข้อเสียในส่วนของตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำที่ไม่ต้องมีการออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำเนื่องจาก $1 - z^{-N}$ ที่เป็นส่วนของตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำสามารถตัดกันได้ด้วยตัวเศษ $1 - z^{-N}$ ของตัวตรวจจับสนกระแสแบบรีเคอซีฟดีเอฟที่ และเมื่อนำไปคำนวณบนแกนหมุนแล้วจะทำให้ได้ฟังก์ชันโอนย้ายที่เป็นตัวอินทิเกรตเพียงตัวเดียวนั่นเอง

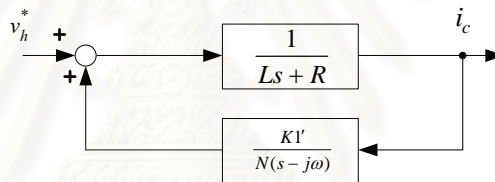
บทที่ 4

การออกแบบวงจรรองแอกทีฟ

เนื่องจากวงจรรองแอกทีฟที่มีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่าย ซึ่งเมื่อมองในเชิงควบคุมแล้วจะเป็นแบบวงรอบปิด ซึ่งทำให้ต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของการควบคุมซึ่งจากบทที่ 3 รูปที่ 3.14 พบว่าวงจรรองแอกทีฟมีวงรอบปิดอยู่ 2 วงรอบคือ วงรอบปิดควบคุมกระแสหลักมูล และวงรอบปิดของวงจรรองโดยรวม ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพจึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ทั้งสองวงรอบ เพื่อให้วงจรรองแอกทีฟมีเสถียรภาพและมีสมรรถนะที่ดี

4.1 การวิเคราะห์วงรอบกระแสหลักมูล

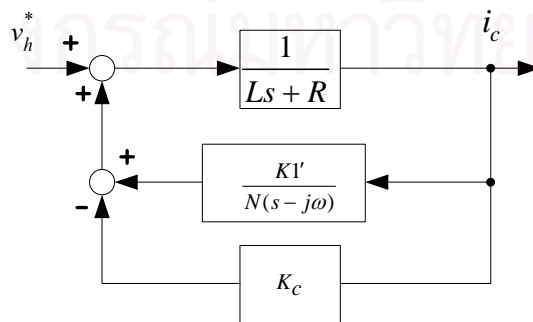
จากรูปที่ 3.14 พิจารณาให้ i_{DC}^* และ v_c เป็นสัญญาณรบกวน ในการวิเคราะห์วงรอบกระแสหลักมูลเราจะพิจารณาแรงดันคำสั่งฮาร์มอนิกรวม ($v_h^* = \sum v_{hi}^*$) ที่ได้จากวงรอบกำจัดการฮาร์มอนิกเป็นสัญญาณอ้างอิงและให้กระแสของวงจรรองเป็นสัญญาณออกซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และหาฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดได้ดังสมการที่ (4.1)



รูปที่ 4.1 แผนภาพวงรอบควบคุมกระแสหลักมูล

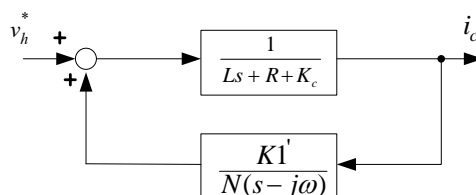
$$G_{pf}(s) = \frac{1}{Ls + R} \frac{K1'}{N(s - j\omega)} \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) พบว่าวงรอบกระแสหลักมูลมีขั้วอยู่ 2 ตัว คือที่ตำแหน่ง $-\frac{R}{L}$ และที่ตำแหน่ง $j\omega$ ซึ่งเป็นตัวกำหนดผลตอบสนองทางเวลา ดังนั้นเราจึงทำการชดเชยโดยการเลื่อนขั้วทั้งสองตัวไปให้ไกลจากแกนจินตภาพทางซ้ายมากๆ โดยการเพิ่มตัวชดเชยค่าคงที่ K_c ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพการชดเชยได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพวงรอบควบคุมกระแสหลักมูลที่มีการชดเชยเสถียรภาพ

แผนภาพรูปที่ 4.2 สามารถยุบ K_c ร่วมกับฟังก์ชันโอนย้าย $\frac{1}{Ls + R}$ ได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพการลดรูปรวมกันของฟังก์ชันโอนย้าย $\frac{1}{Ls + R}$ กับตัวชดเชย K_c

จากรูปที่ 4.3 สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายระหว่าง i_c กับ v_h^* ได้ดังสมการที่ (4.2)

$$\frac{I_c(S)}{V_h^*(S)} = \frac{s - j\omega}{Ls^2 + (R + K_c - j\omega L)s - \frac{K1'}{N} - j\omega(R + K_c)} \quad (4.2)$$

จากสมการที่ (4.2) สามารถหาสมการคุณลักษณะ(Characteristic Equation) ได้ดังสมการที่ (4.3)

$$Ls^2 + (R + K_c - j\omega L)s - \frac{K1'}{N} - j\omega(R + K_c) = 0 \quad (4.3)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$s^2 + \left(\frac{R + K_c}{L} - j\omega\right)s - \frac{K1'}{NL} - \frac{j\omega(R + K_c)}{L} = 0 \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.4) พบว่ามีขั้วอยู่ 2 ตัว และถ้าเรากำหนดให้อยู่ที่ตำแหน่ง $-P_1, -P_2$ ซึ่งสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายได้ดังสมการที่ (4.5)

$$\begin{aligned} (s + P_1)(s + P_2) &= 0 \\ s^2 + (P_1 + P_2)s + P_1P_2 &= 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

เทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (4.4) กับสมการที่ (4.5) จะได้

สัมประสิทธิ์ s^1 :

$$\frac{R + K_c}{L} - j\omega = P_1 + P_2 \quad (4.6)$$

จะได้

$$K_c = L(P_1 + P_2) + j\omega L - R \quad (4.7)$$

สัมประสิทธิ์ s^0 :

$$\frac{-K1'}{NL} - \frac{j\omega(R + K_c)}{L} = P_1P_2 \quad (4.8)$$

$$K1' = -NL\left\{P_1P_2 + \frac{j\omega(R + K_c)}{L}\right\} \quad (4.9)$$

เมื่อเราเลือกให้ $-P_1, -P_2 = -2500$, $L = 4 \text{ mH}$, $R = 0.5 \Omega$, $N = 200$ และ $\omega = 2\pi(50)$ จะได้

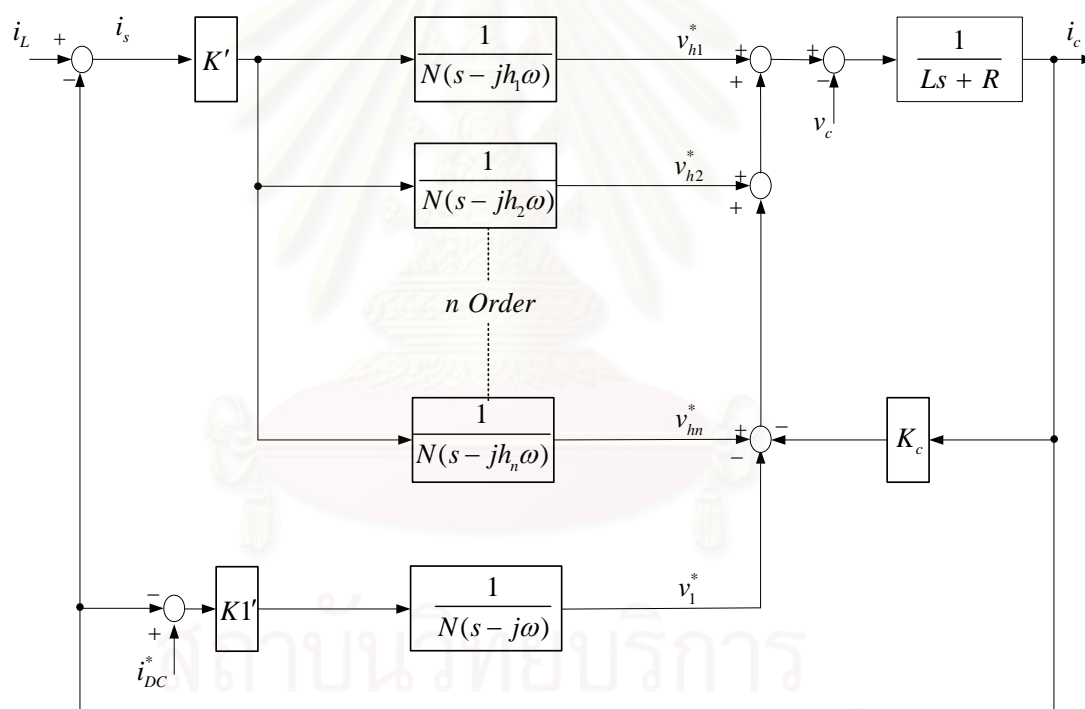
$$K_c = 19.5 + j1.2567 \quad (4.10)$$

$$K1' = -45921042 - j1256648 \quad (4.11)$$

จากสมการที่ (4.10) และ (4.11) ทำให้เราได้ค่าของอัตราขยาย $K1'$ และค่าของตัวชดเชย K_c ที่แน่นอน ซึ่งเมื่อเราแทนค่าทั้งสองค่านี้ลงในสมการที่ (4.2) ก็จะทำให้ได้ตำแหน่งของขั้วทั้งสองตัวอยู่ที่ -2500 ที่ทำให้เกิดเสถียรภาพและผลตอบสนองทางเวลาที่เพียงพอ

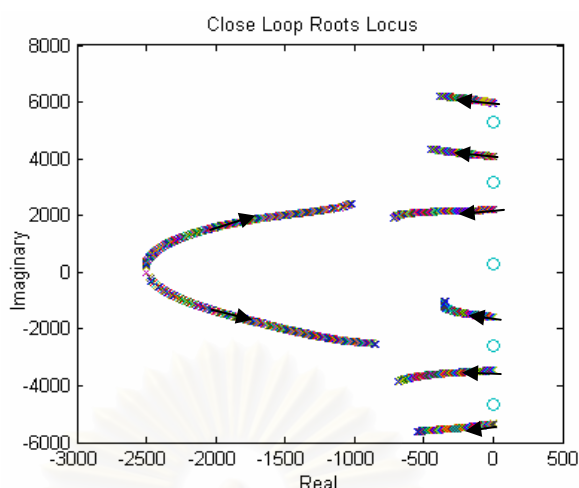
4.2 การวิเคราะห์ห้วงรอบปิดของวงจรรองแอกทีฟโดยรวม

เมื่อแทนแผนภาพของวงรอบควบคุมกระแสหลักมูลที่มีการเพิ่มตัวชดเชย K_c ลงในรูปที่ 3.14 จะได้ดังแผนภาพรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพวงจรรองรวมกรณีกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่หลายอันดับและมีการเพิ่มตัวชดเชยวงรอบควบคุมกระแสหลักมูล

เมื่อพิจารณาเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5^{th} , 7^{th} , 11^{th} , 13^{th} , 17^{th} และ 19^{th} จะพบว่าเมื่อให้อัตราขยาย K' เปลี่ยนค่าจาก 1 ถึง 2,000,000 จะได้ทางเดินขั้วของระบบแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ทางเดินขั้วของวงจรรองเมื่อ K' เปลี่ยนค่าจาก 1 ถึง 2,000,000

จากการที่เราเลือกวิธีการชดเชยด้วยค่าคงที่ K_c ของวงรอบควบคุมกระแสหลักมูลนั้นทำให้มีขั้วของวงรอบกระแสหลักมูลอยู่ที่ตำแหน่งแกนจริงทางด้านลบทั้งสองตัว และเมื่อดูจากรูปที่ 4.5 จะพบว่าขั้วทั้งสองตัวนี้จะวิ่งไปทางขวามือซึ่งถ้าหากเราเพิ่มค่าของอัตราขยาย K' มากเกินไปอาจทำให้วงจรรองแยกที่พีเกิดปัญหาเสถียรภาพได้ และในส่วนของขั้วที่อยู่บนแกนจินตภาพนั้นคือขั้วที่ตำแหน่งฮาร์มอนิกแต่ละตัวที่เราต้องการกำจัด โดยขั้วแต่ละตัวนั้นจะวิ่งไปทางซ้ายมือ แต่เมื่อเราเพิ่มค่าของ K' สูงถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้ขั้วที่ความถี่ฮาร์มอนิกเริ่มวกกลับวิ่งไปทางขวามือแทน ดังนั้นเราจึงต้องเลือกอัตราขยาย K' ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเสถียรภาพและผลตอบสนองของทางเวลาที่พอเพียง ซึ่งขณะนี้เราเลือก K' เท่ากับ 2,000,000 เพื่อให้วงจรรองแยกที่พีมีเสถียรภาพ และให้ผลตอบสนองต่อสภาวะชั่วครู่ได้ภายในหนึ่งคาบของความถี่หลักมูล จากผลการวิเคราะห์นี้สามารถยืนยันได้จากผลการจำลองการทำงานและผลการทดสอบการทำงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การจำลองการทำงานและการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก

เพื่อเป็นการยืนยันถึงความสามารถการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองที่ออกแบบ ในบทนี้เราจะแสดงผลจำลองการทำงานและผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองแอกที่พจนานที่นำเสนอที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอฟที่รวมกับตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ ทำการตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่าย โดยผลการจำลองการทำงานและผลการทดสอบนั้นจะแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกับวงจรกรองแอกที่ฟที่ได้ออกแบบและวิเคราะห์ไว้

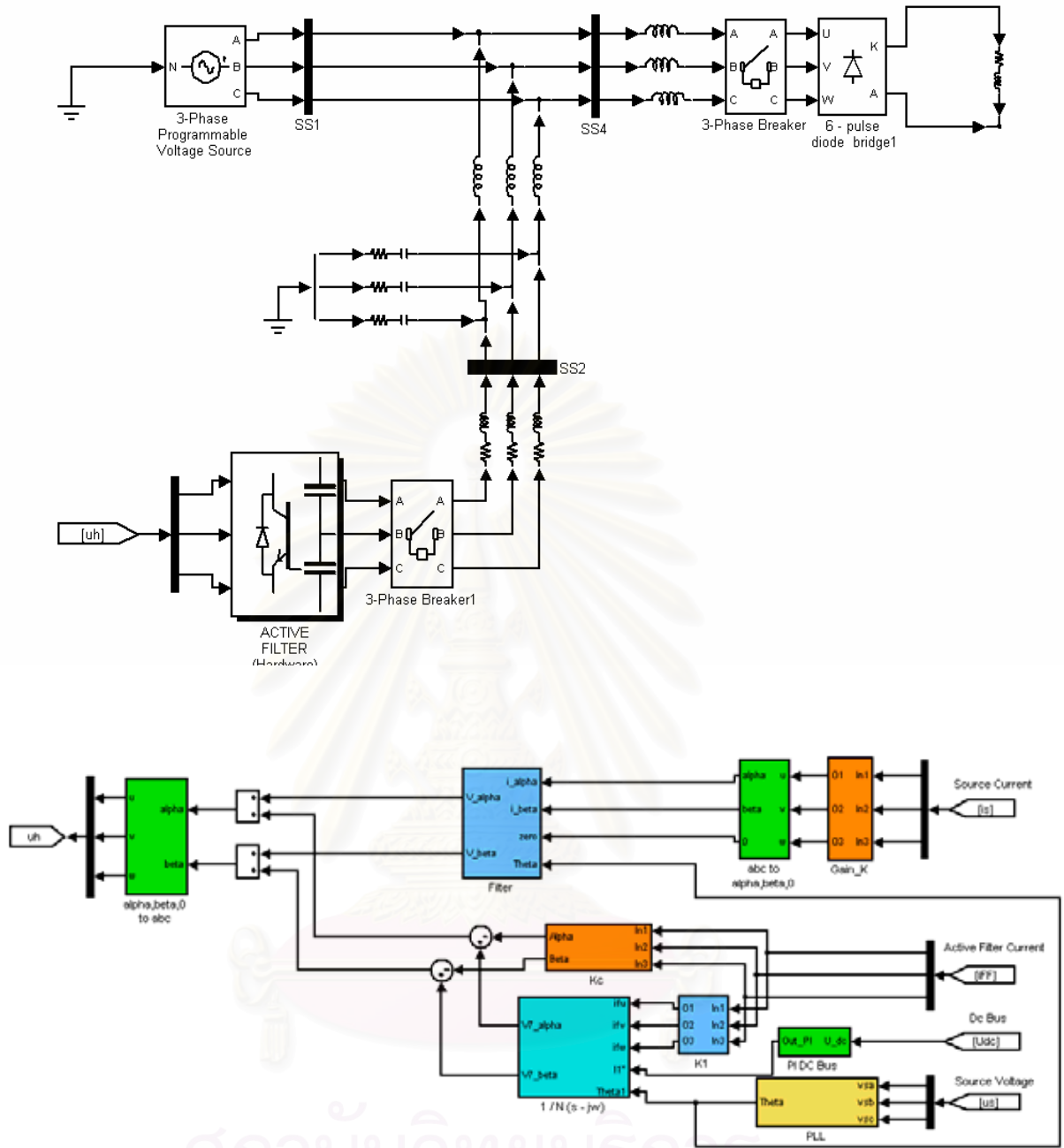
5.1 การจำลองการทำงาน

ในการจำลองการทำงานเราเลือกใช้โปรแกรม MATHLAB/SIMULINK โมดูล POWER SYSTEM BLOCKSET ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพที่ใช้ในการจำลองการทำงานของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ได้ดังรูปที่ 5.1 การจำลองการทำงานนี้เราจะทำกรณีที่สอดคล้องกับที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 4 คือการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 6 อันดับคือ 5th, 7th, 11th, 13th, 17th และ 19th โดยจะดูถึงสมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่เลือกกำจัด และดูถึงผลตอบสนองของสภาวะชั่วคราวที่ได้ออกแบบไว้ให้มีค่าไม่เกิน 1 คาบของความถี่หลักมูล ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3

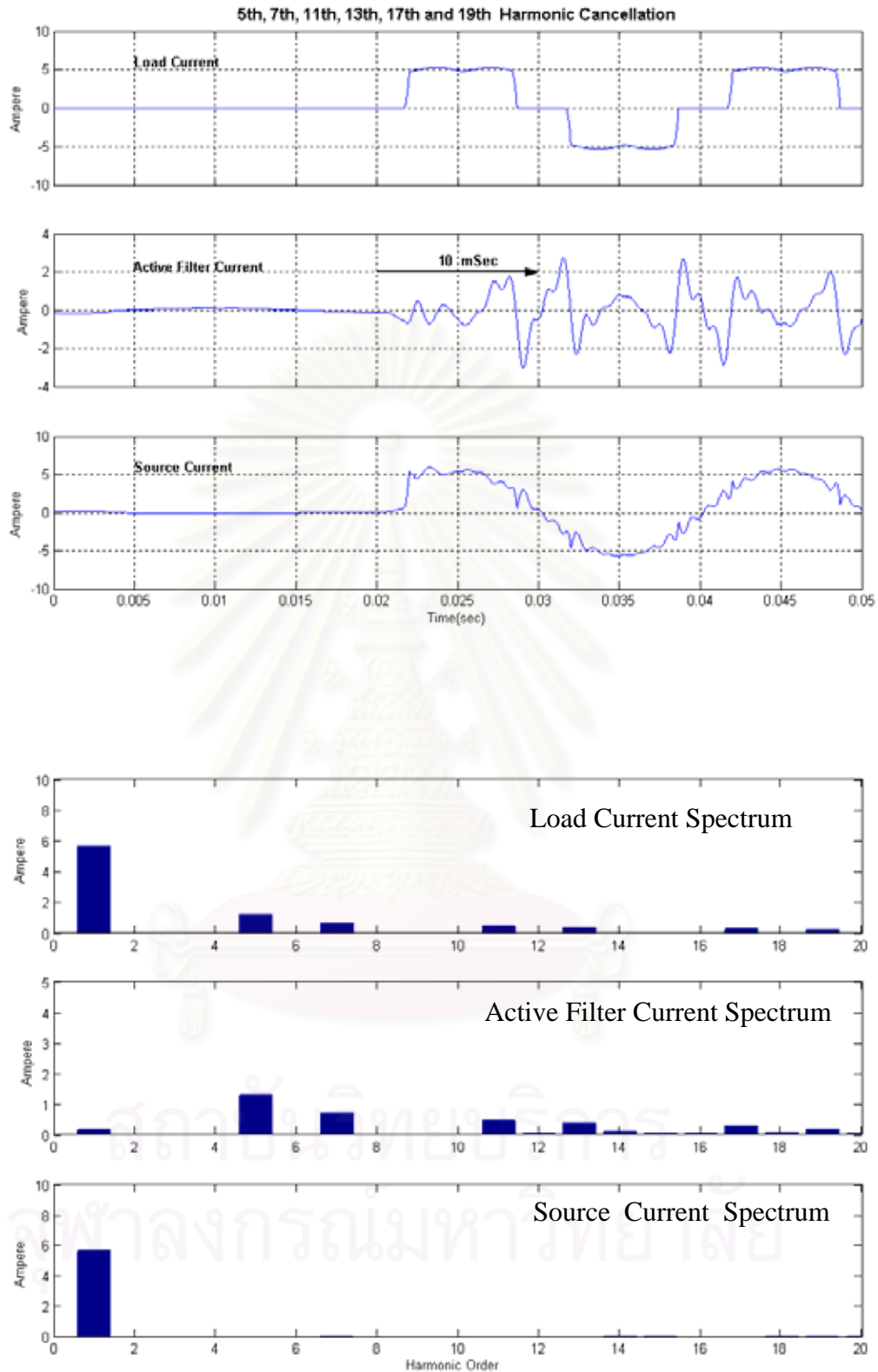
การจำลองการทำงานอีกส่วนหนึ่งจะเป็นการทำงานที่สอดคล้องกับการทดสอบ นั่นคือเราจะแบ่งการจำลองการทำงานของวงจรกรองแอกที่ฟออกเป็น 3 กรณี คือ

- 1) กรณีการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 1 อันดับ โดยเลือกแสดงการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th แสดงดังรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5
- 2) กรณีกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 2 อันดับ โดยเลือกแสดงการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th และ 7th แสดงดังรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7
- 3) กรณีกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 3 อันดับ โดยเลือกแสดงการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th, 7th และ 11th แสดงดังรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9

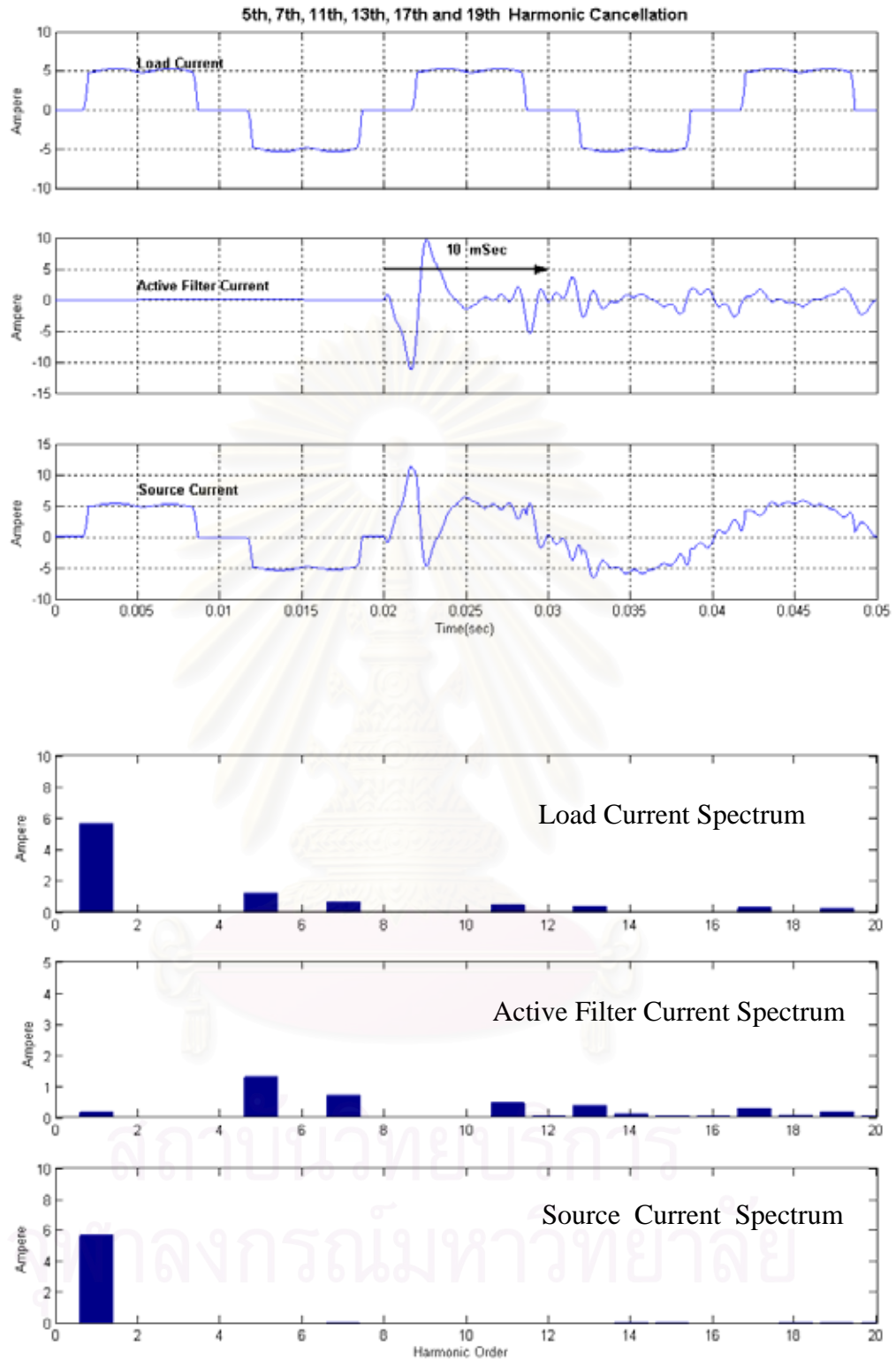
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



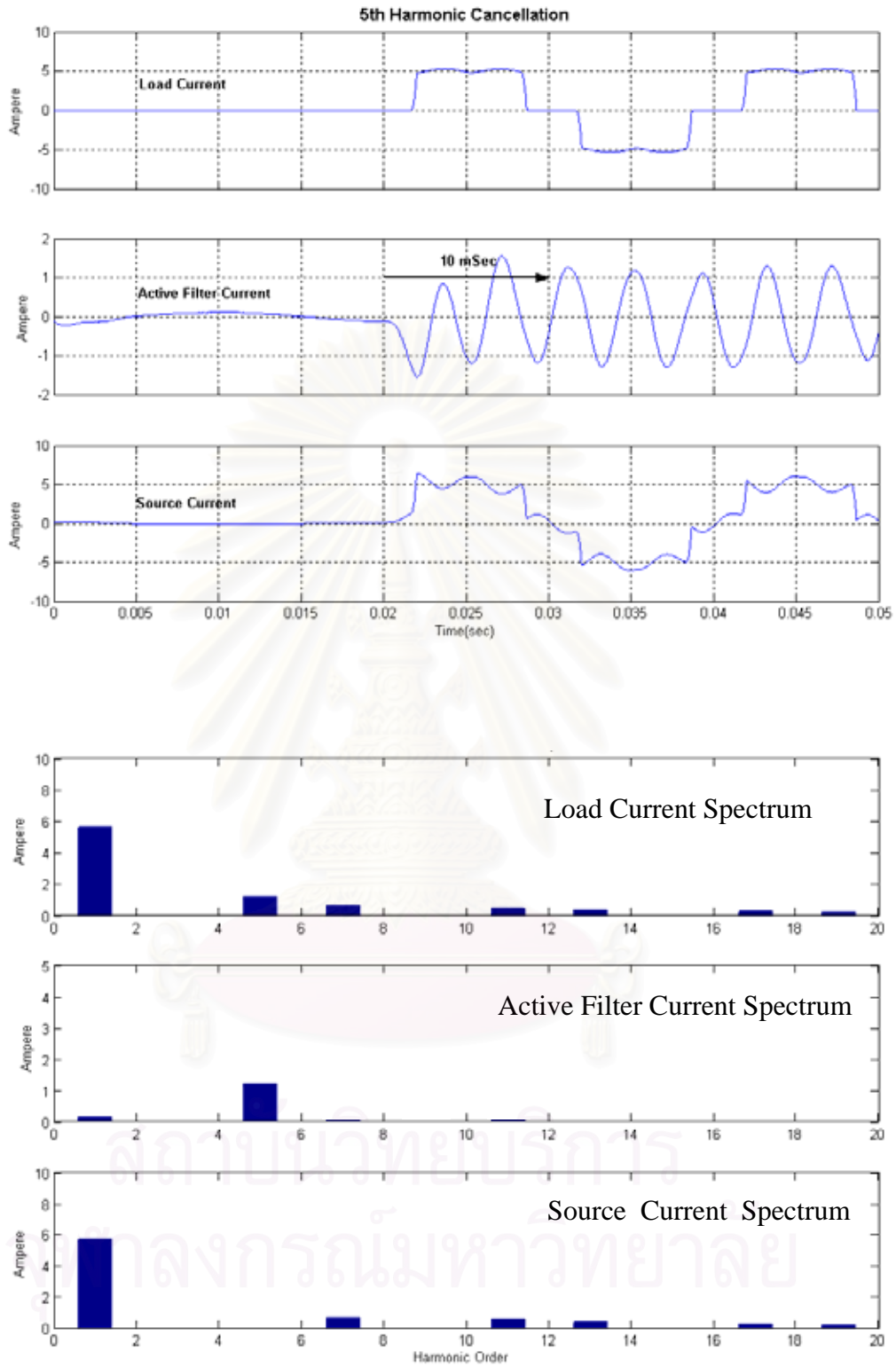
รูปที่ 5.1 แผนภาพการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK



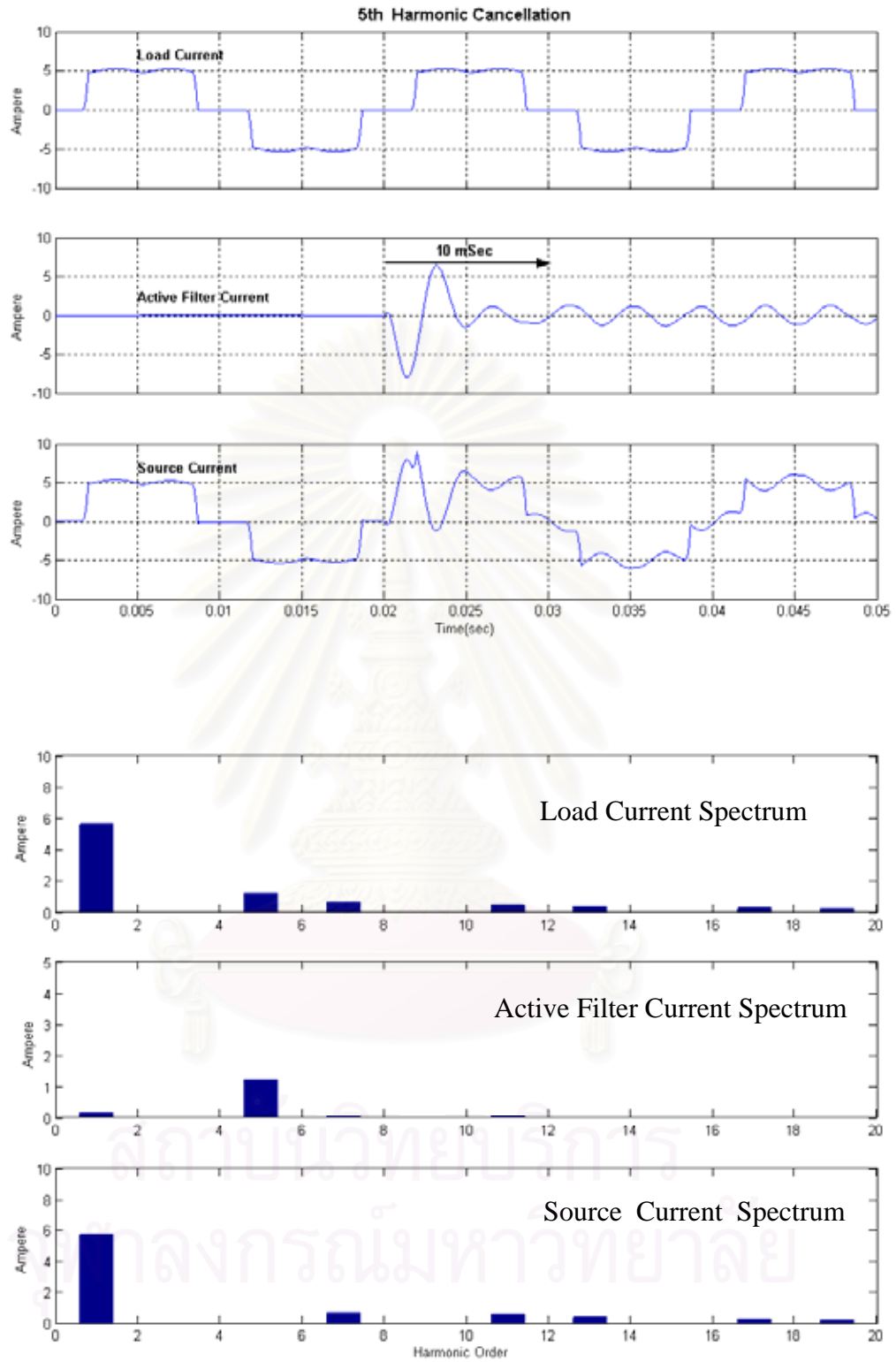
รูปที่ 5.2 ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 6 อันดับ (อันดับที่ 5th & 7th & 11th & 13th & 17th และ 19th) เมื่อกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงแบบขึ้น



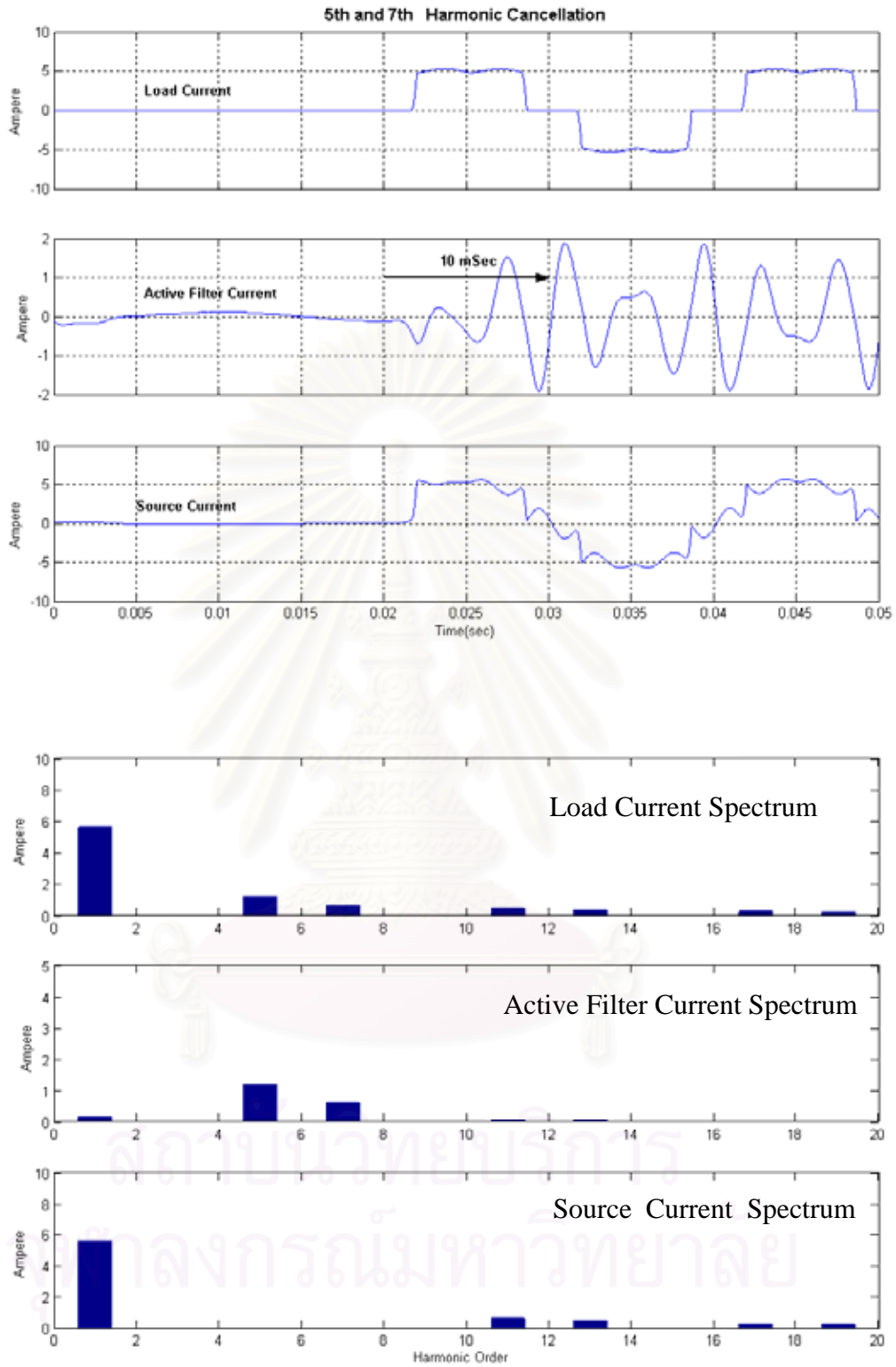
รูปที่ 5.3 ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันทีละ 6 อันดับ (อันดับที่ 5^{th} & 7^{th} & 11^{th} & 13^{th} & 17^{th} และ 19^{th}) เมื่อวงจรกรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแส



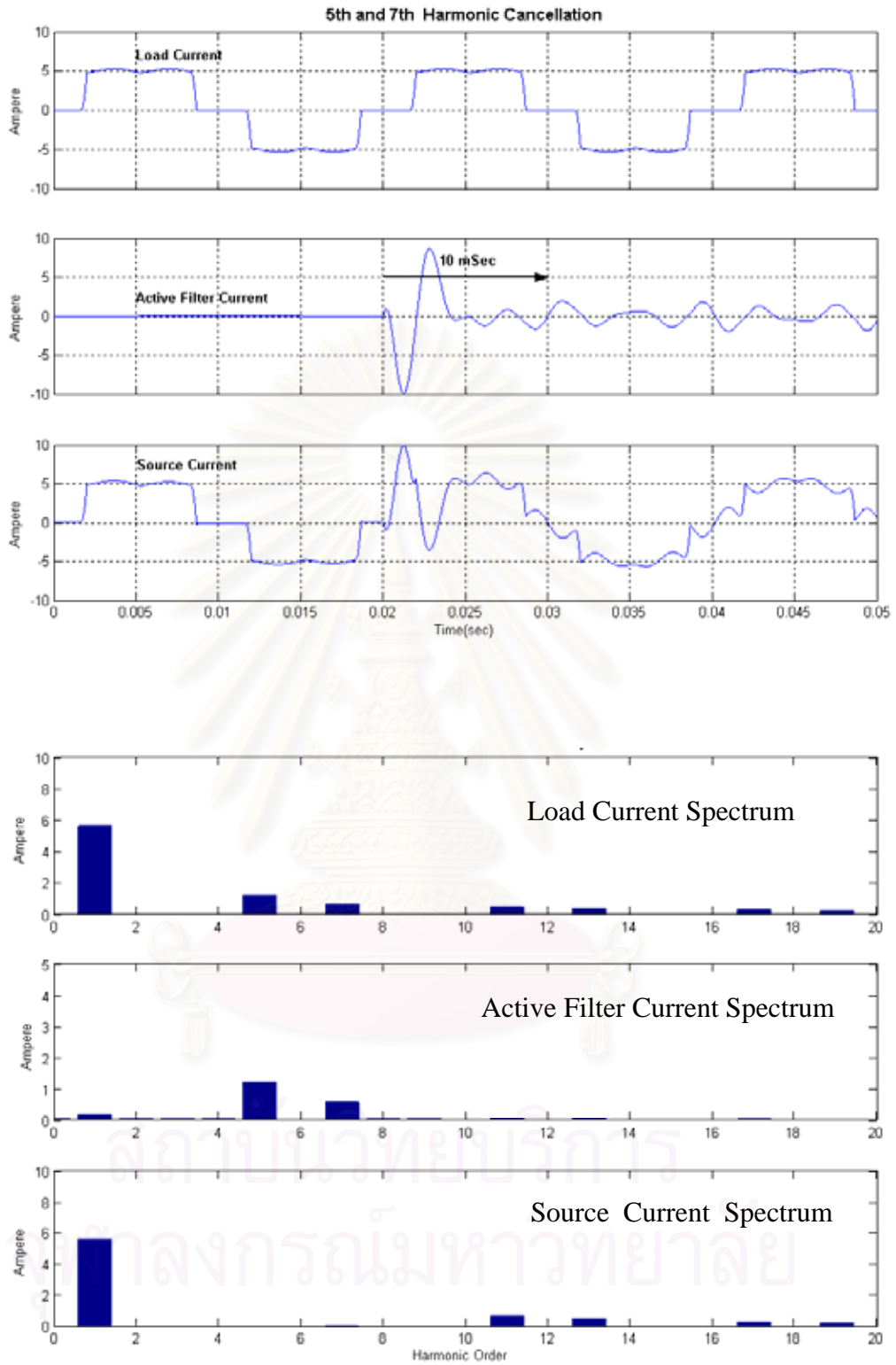
รูปที่ 5.4 ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 1 อันดับ (อันดับที่ 5th) เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น



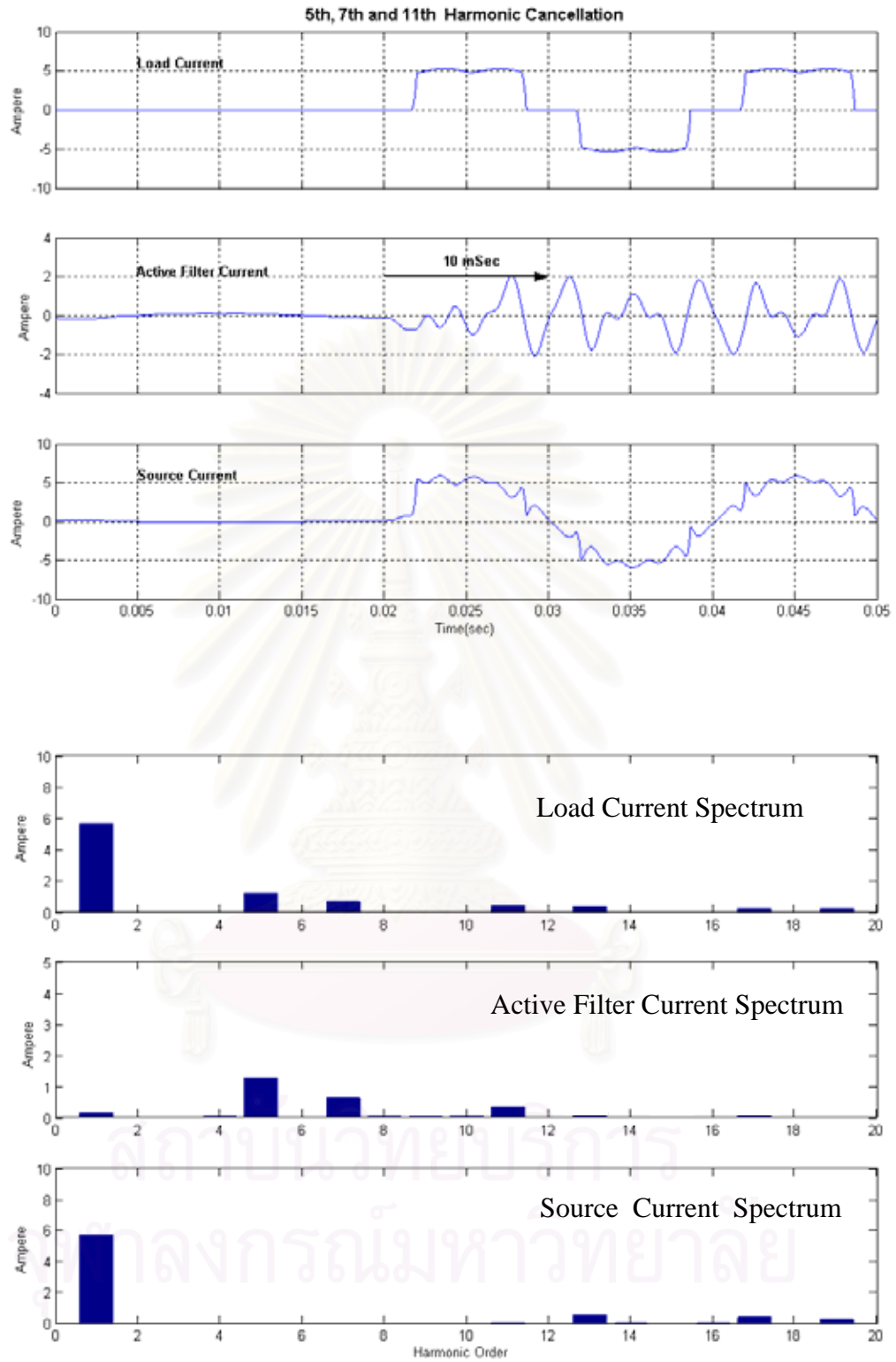
รูปที่ 5.5 ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 1 อันดับ
(อันดับที่ 5th) เมื่อวงจรกรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแส



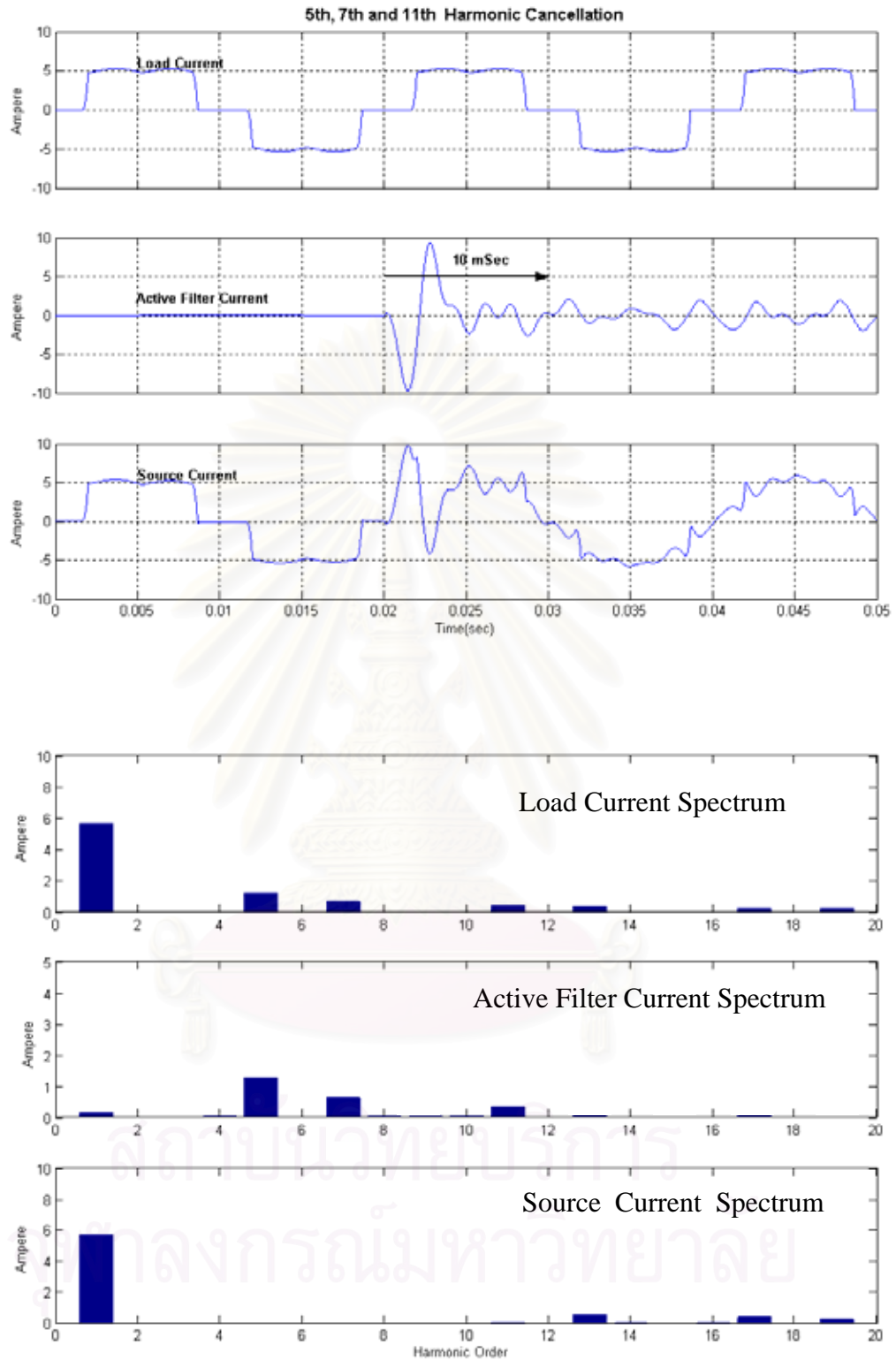
รูปที่ 5.6 ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 2 อันดับ (อันดับที่ 5th และ 7th) เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น



รูปที่ 5.7 ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 2 อันดับ (อันดับที่ 5th และ 7th) เมื่อวงจรกรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแส



รูปที่ 5.8 ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 3 อันดับ
(อันดับที่ 5th & 7th และ 11th) เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น



รูปที่ 5.9 ผลการจำลองการทำงานการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 3 อันดับ (อันดับที่ 5th & 7th และ 11th) เมื่อวงจรกรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแส

5.2 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก

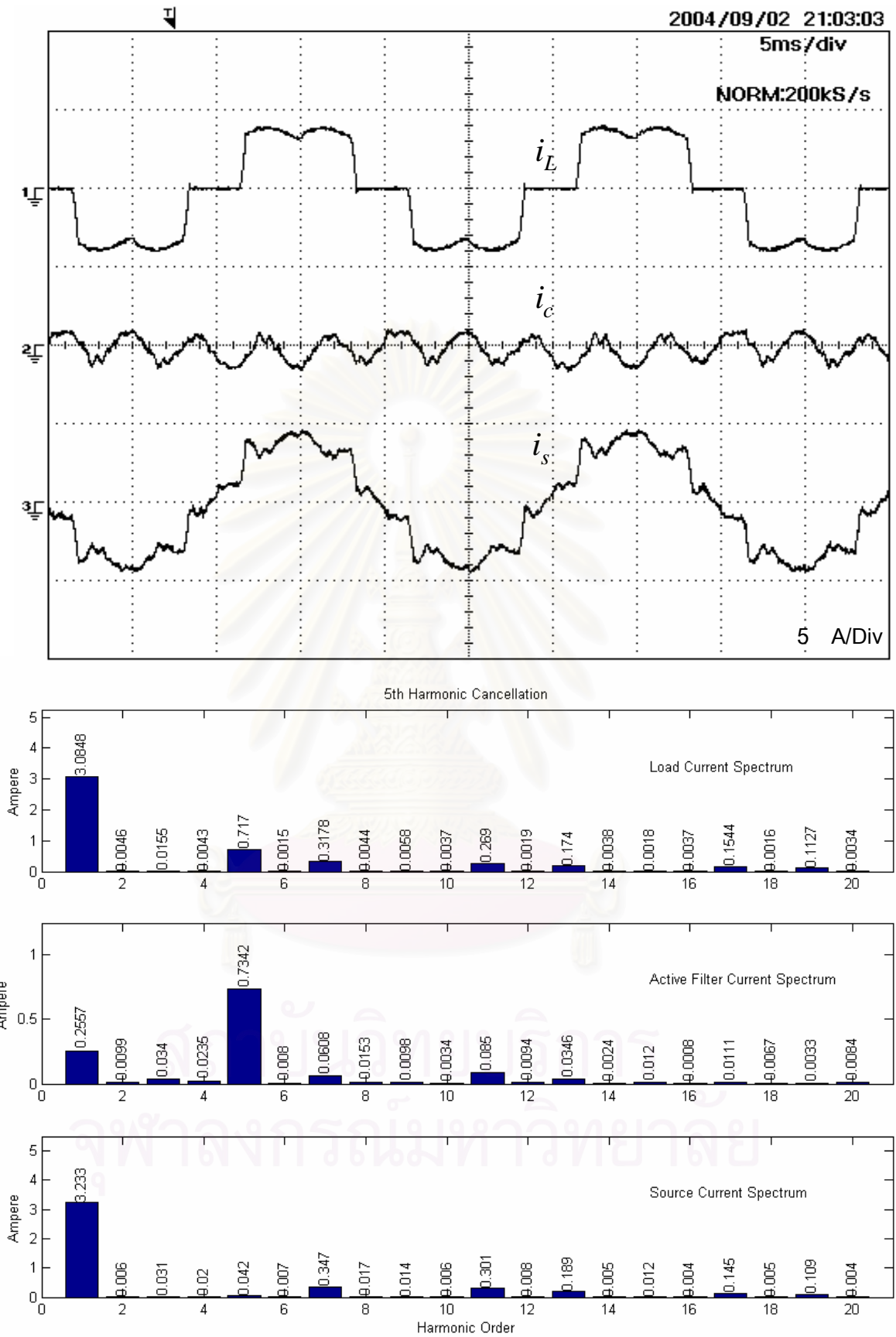
ในการทดสอบความสามารถในการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองแอกทีฟขนาน ซึ่งจะทดสอบการทำงานของระบบโดยอาศัยฮาร์ตแวร์และซอฟต์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาตามภาคผนวก ก โดยระบบที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นระบบ 3 เฟส 3 สาย 380 V 50 Hz มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส แบบบริดจ์ 3 เฟส ขนาด 1.5 kVA วงจรกรองแอกทีฟสร้างแรงดันโดยอินเวอร์เตอร์ผ่านหม้อแปลง 2 : 1 เป็นตัวเชื่อมต่อกับระบบกำลัง ซึ่งทางด้านแรงดันสูงจะมีวงจรกรองผ่านต่ำต่ออยู่ ผลการทดลองการกำจัดฮาร์มอนิกที่จะนำเสนอในบทนี้จะจำแนกออกเป็นจำนวนของฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด ดังต่อไปนี้

5.2.1 การกำจัดฮาร์มอนิกทีละ 1 อันดับ

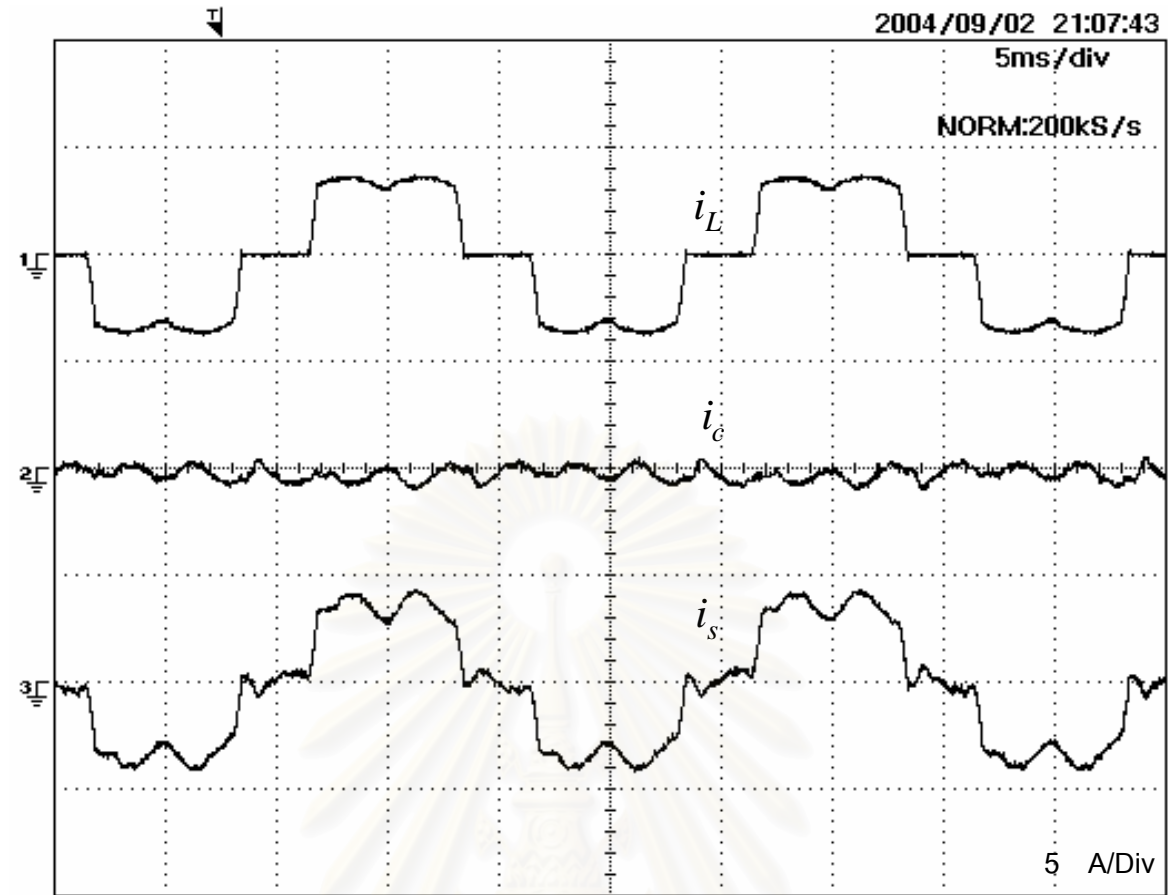
ในการกำจัดฮาร์มอนิกทีละอันดับเราจะพิจารณาเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th, 7th, 11th, 13th, 17th และ 19th ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.15 จากผลการทดลองจะเห็นว่าวงจรกรองแอกทีฟที่นำเสนอมานี้แล้วสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ตามต้องการ ซึ่งสามารถสรุปผลการกำจัดได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการกำจัดฮาร์มอนิกทีละ 1 อันดับ

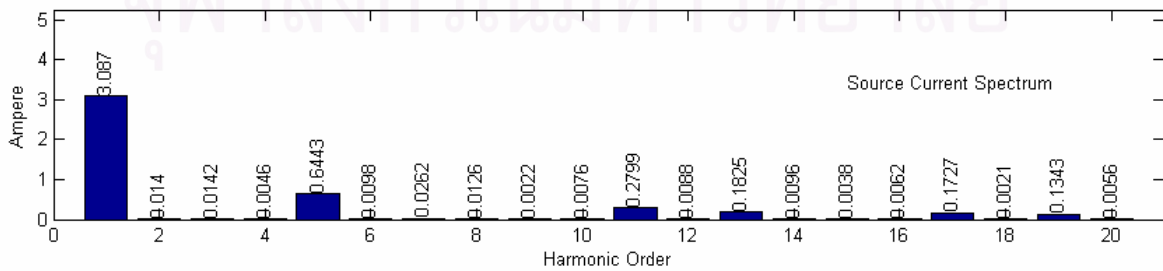
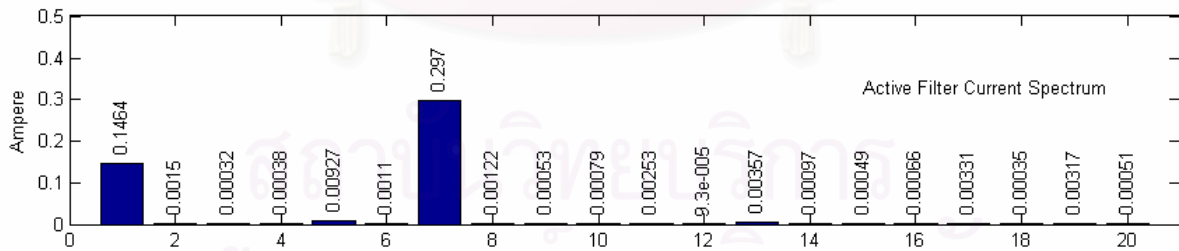
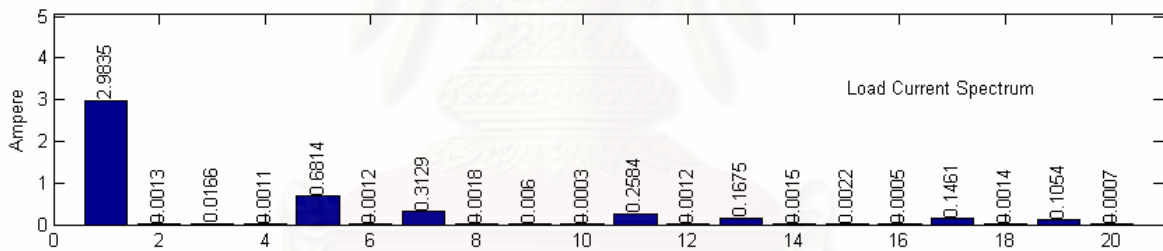
อันดับฮาร์มอนิก (h)	กระแสโหลดฮาร์มอนิก (i_{Lh})	กระแสแหล่งจ่ายฮาร์มอนิก (i_{sh})	ฮาร์มอนิก เปอร์เซ็นต์เหลือ $\frac{ i_{sh} }{ i_{Lh} } (\%)$
5 th	0.717	0.0420	5.91
7 th	0.3129	0.0262	8.37
11 th	0.2469	0.046	18.63
13 th	0.1751	0.0268	15.31
17 th	0.1616	0.0459	28.40
19 th	0.101	0.023	22.77



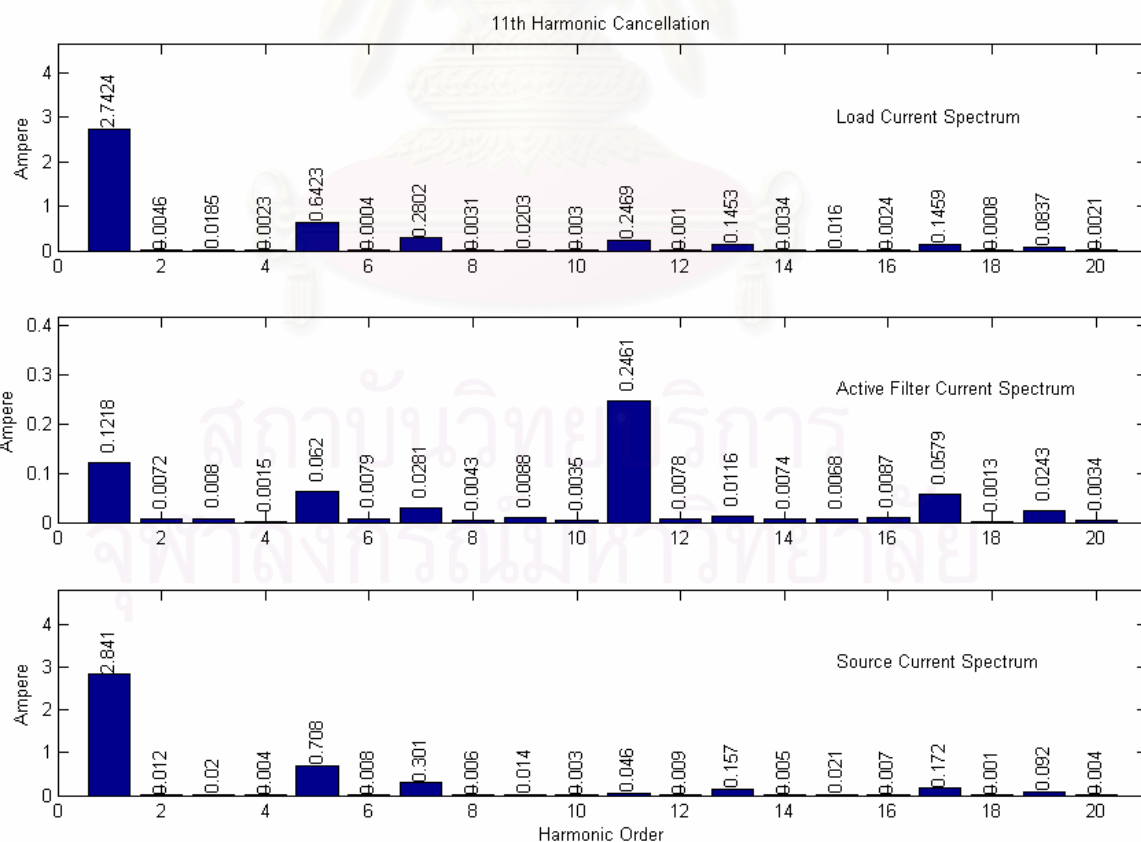
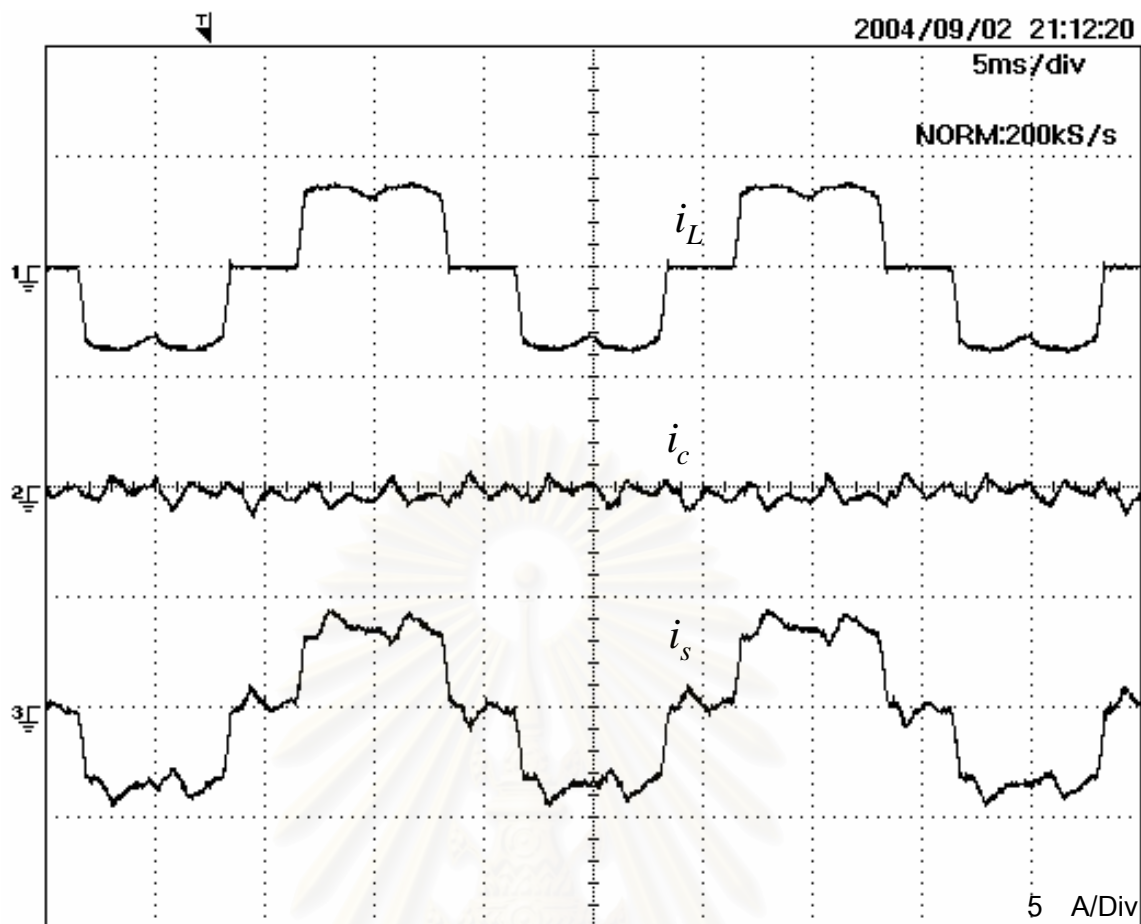
รูปที่ 5.10 ผลการกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th



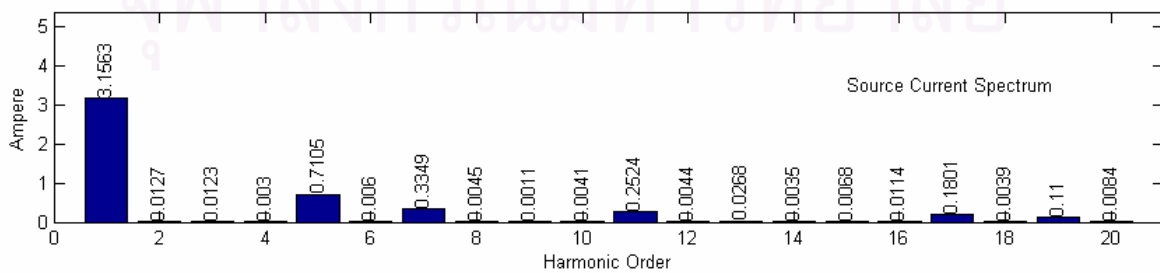
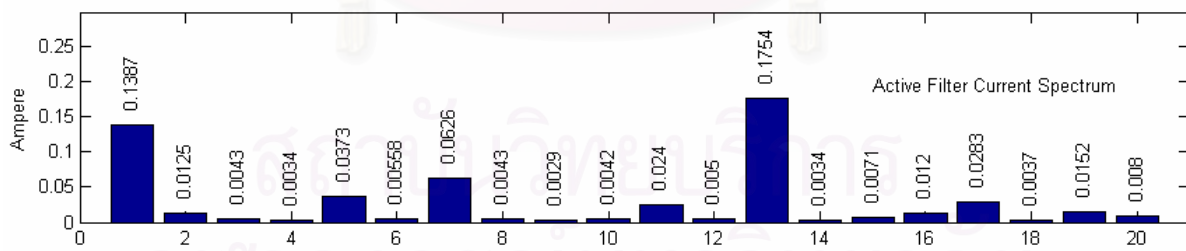
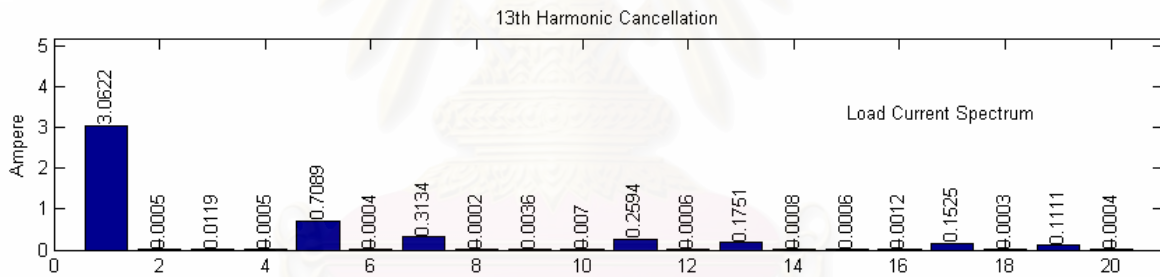
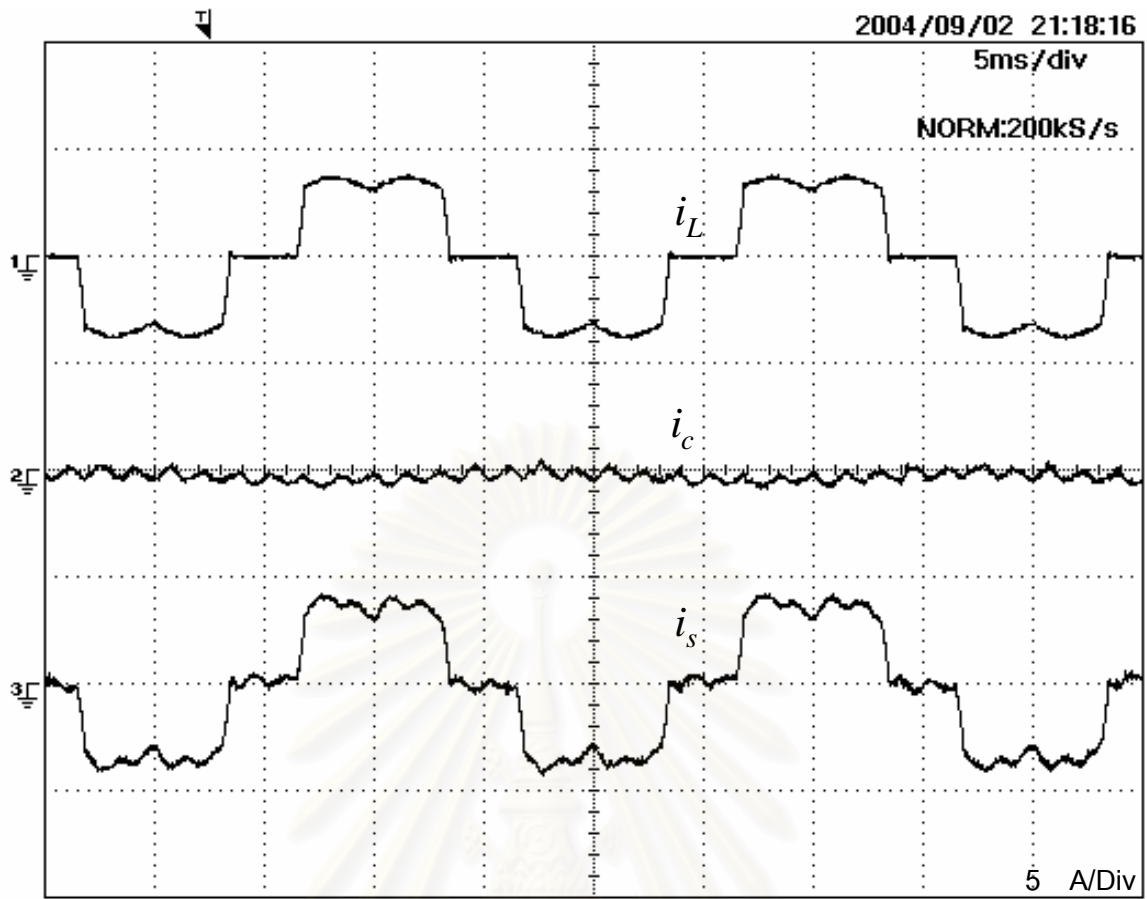
7th Harmonic Cancellation



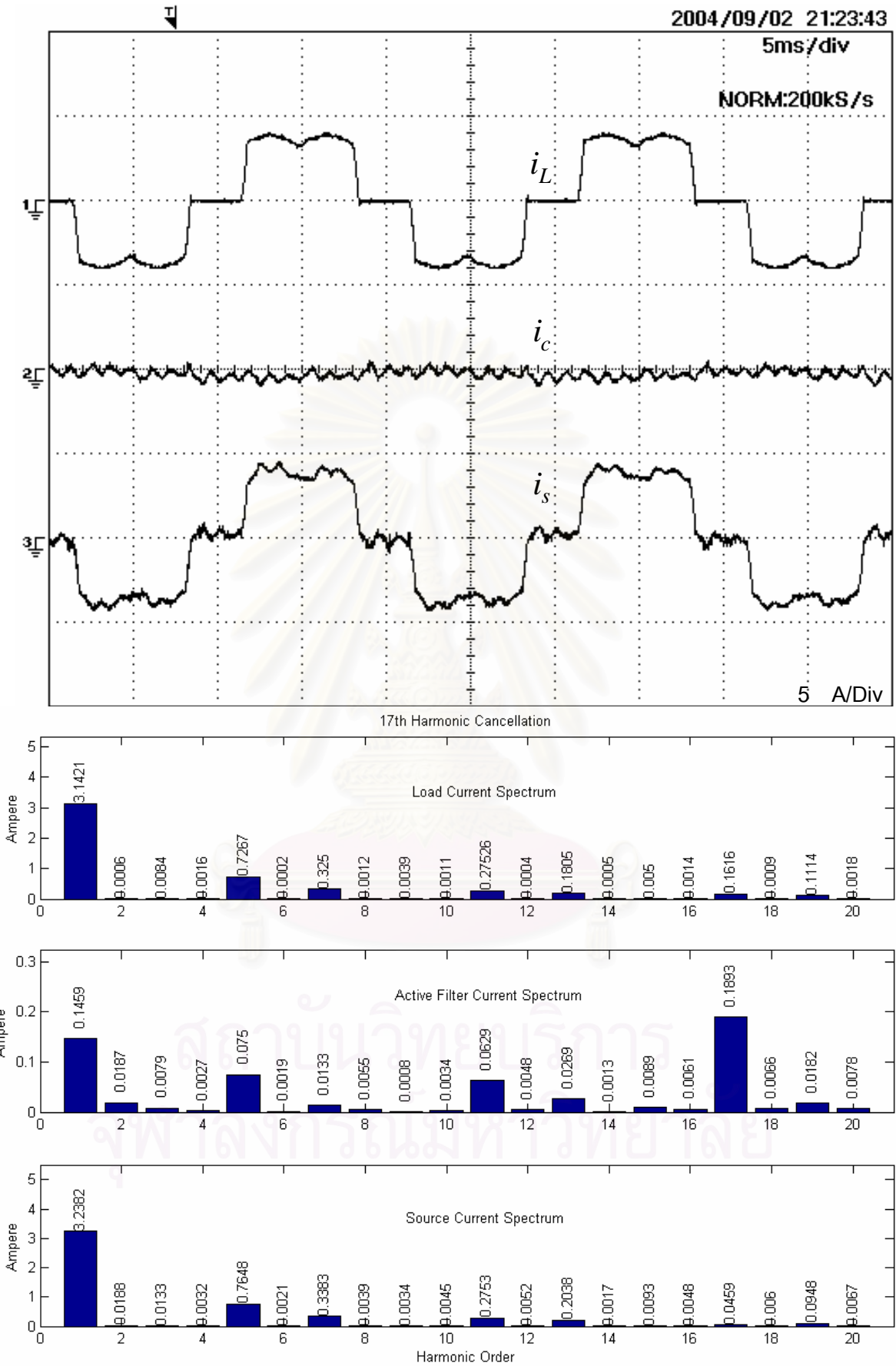
รูปที่ 5.11 ผลการกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 7th



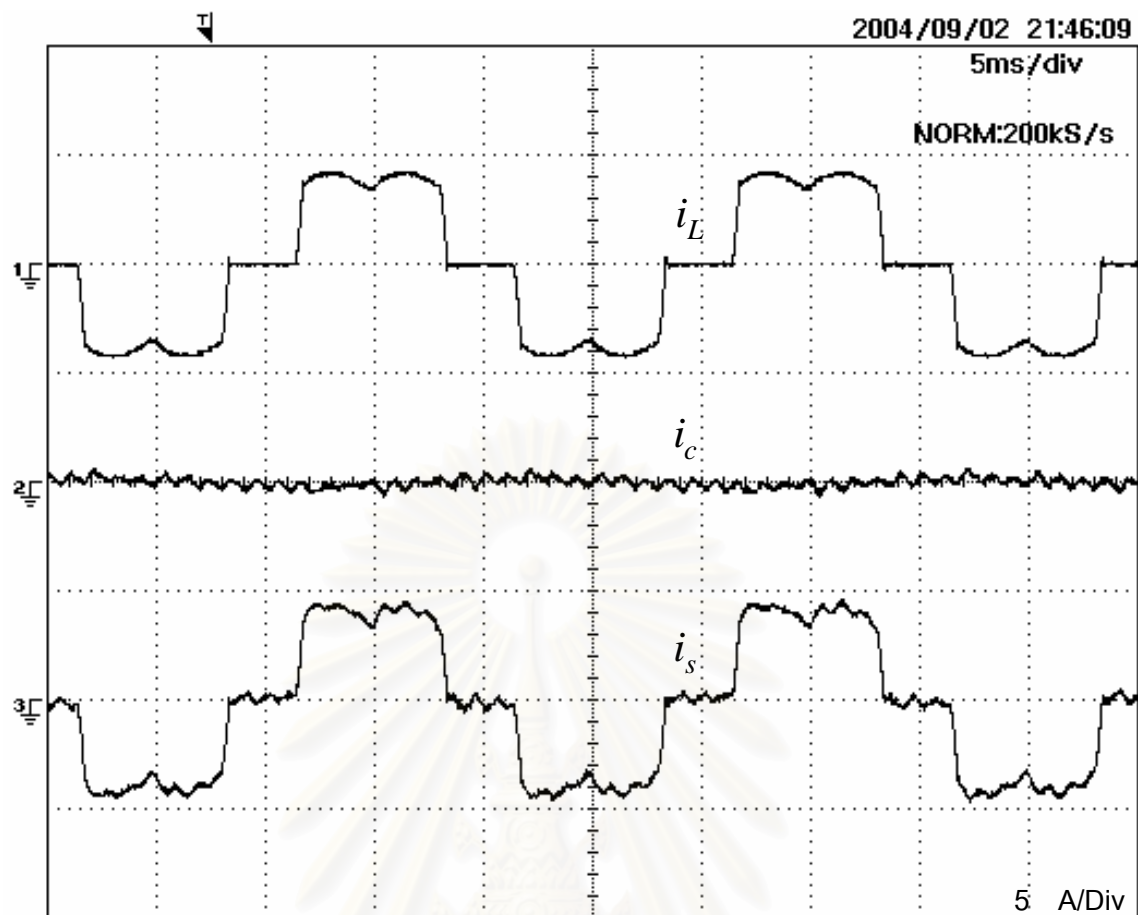
รูปที่ 5.12 ผลการกำจัดเฉพาะฮาร์โมนิกอันดับที่ 11th



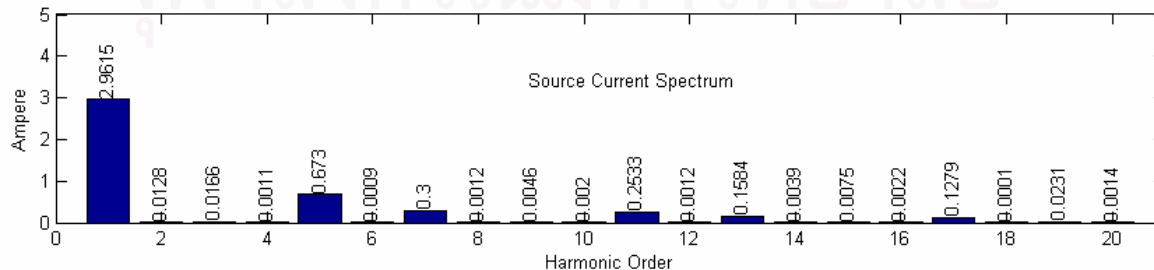
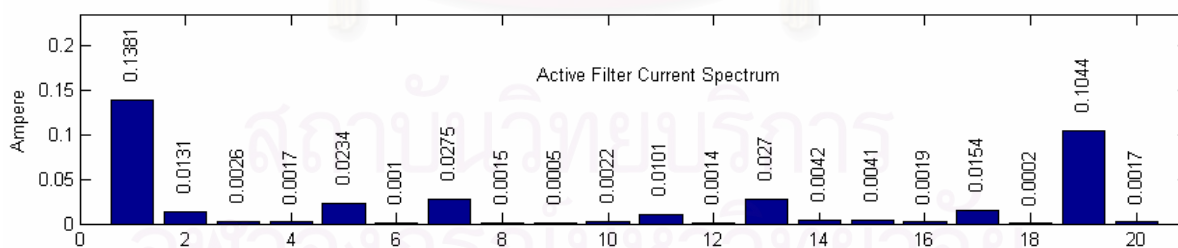
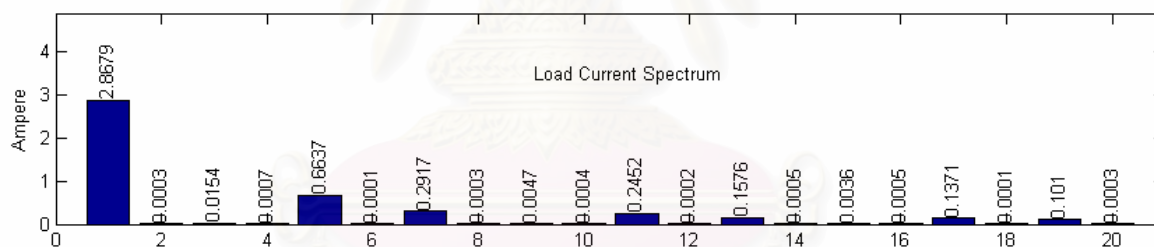
รูปที่ 5.13 ผลการกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 13th



รูปที่ 5.14 ผลการกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 17th



19th Harmonic Cancellation



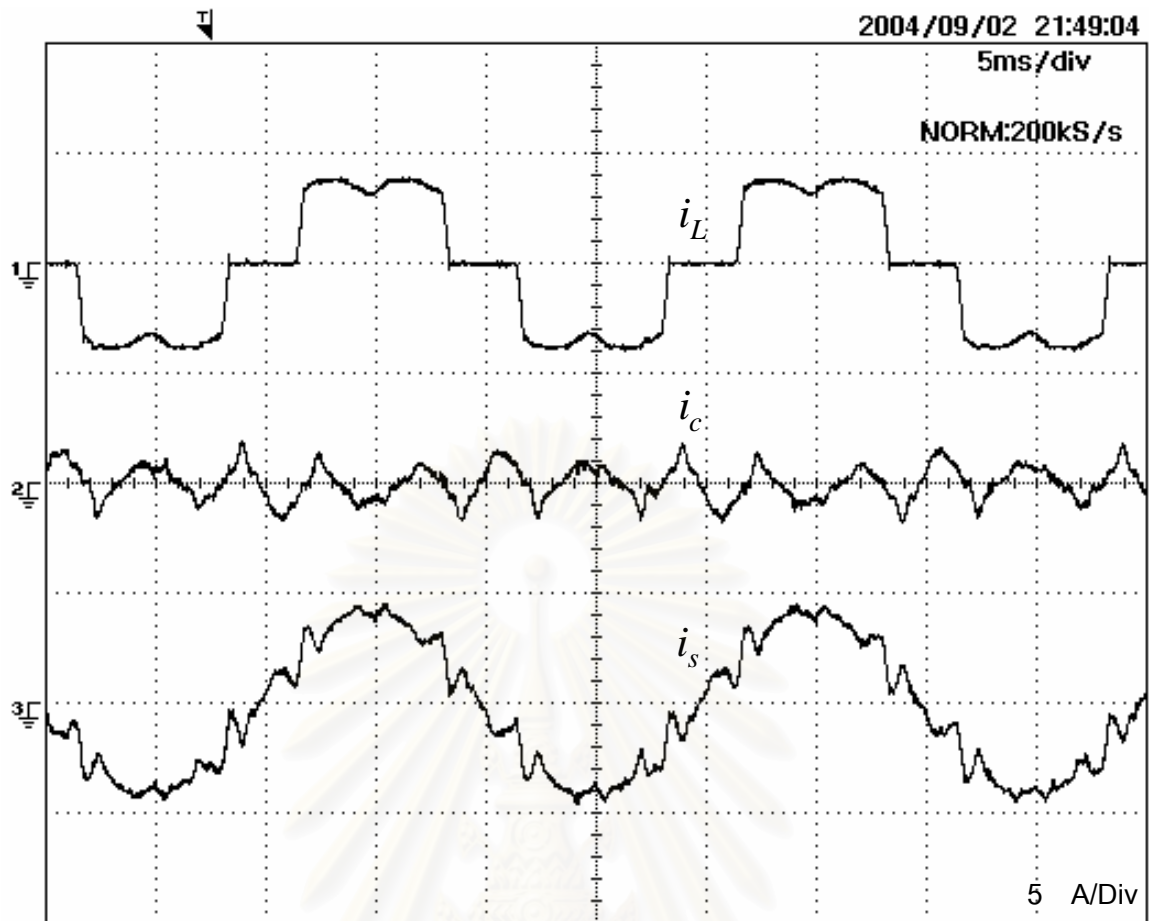
รูปที่ 5.15 ผลการกำจัดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 19th

5.2.2 การกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 2 อันดับ

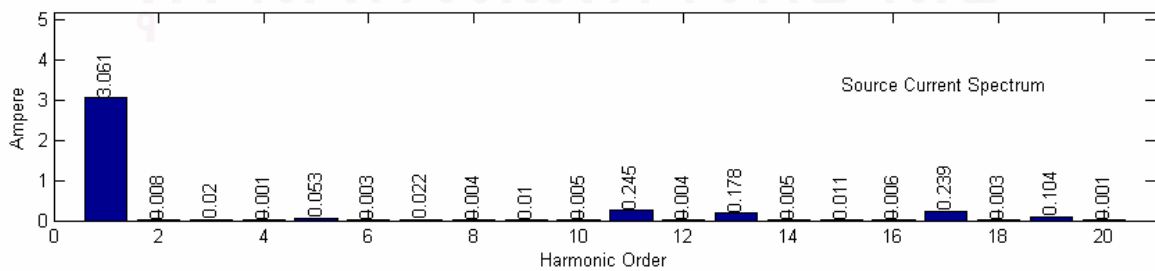
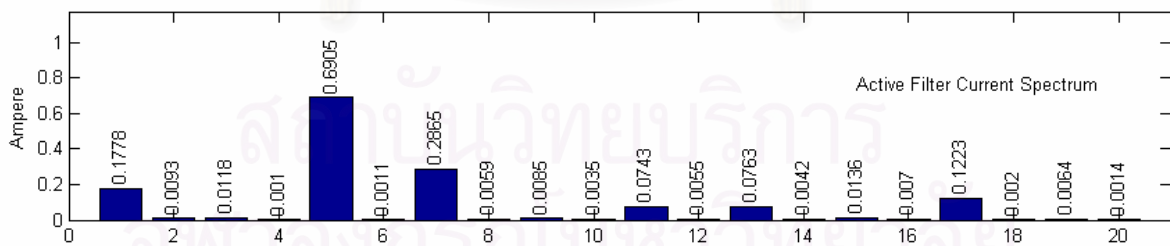
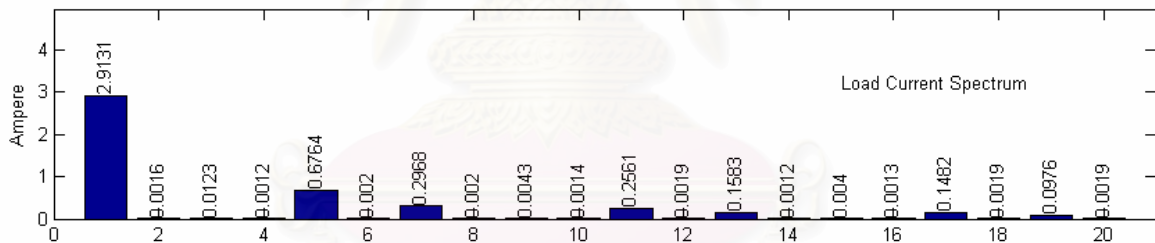
ในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 2 อันดับเราจะพิจารณาเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th, 7th, 11th, 13th, 17th และ 19th โดยการเลือกกำจัดเป็นคู่ดังนี้คือ 5th&7th, 5th&11th, 5th&13th, 5th&17th, 5th&19th, 11th&17th, 11th&19th, 13th&17th, 17th&19th ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 5.16 ถึงรูปที่ 5.24 จากผลการทดลองจะเห็นว่าวงจรกรองแอกทีฟที่นำเสนอสามารถกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 2 อันดับได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งสามารถสรุปผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละสองอันดับได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 2 อันดับ

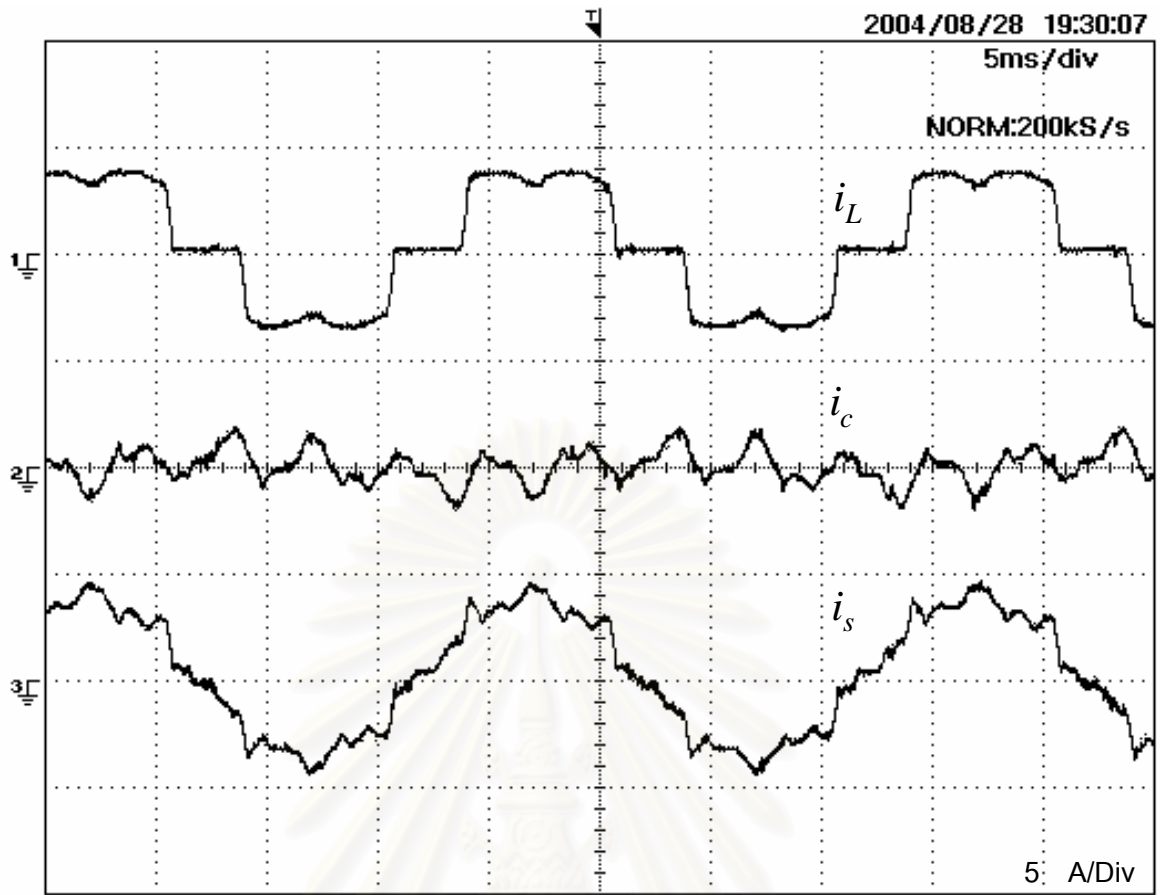
คู่อันดับฮาร์มอนิก ที่ต้องการกำจัด	อันดับฮาร์มอนิก (h)	กระแสโหลด ฮาร์มอนิก (i_{Lh})	กระแส แหล่งจ่าย ฮาร์มอนิก (i_{sh})	ฮาร์มอนิก เปอร์เซ็นต์ของเหลือ $\frac{ i_{sh} }{ i_{Lh} }$ (%)
5 th &7 th	5 th	0.676	0.053	7.84
	7 th	0.297	0.022	7.41
5 th &11 th	5 th	0.618	0.034	5.50
	11 th	0.231	0.047	20.35
5 th &13 th	5 th	0.606	0.045	7.43
	13 th	0.142	0.027	19.01
5 th &17 th	5 th	0.674	0.037	5.49
	17 th	0.149	0.058	38.93
5 th &19 th	5 th	0.677	0.035	5.17
	19 th	0.104	0.044	42.31
11 th &13 th	11 th	0.251	0.044	17.53
	13 th	0.161	0.020	12.42
11 th &19 th	11 th	0.258	0.043	16.67
	19 th	0.100	0.029	29.00
13 th &17 th	13 th	0.167	0.0198	11.85
	17 th	0.14	0.045	27.21
17 th &19 th	17 th	0.142	0.022	15.49
	19 th	0.097	0.031	31.96



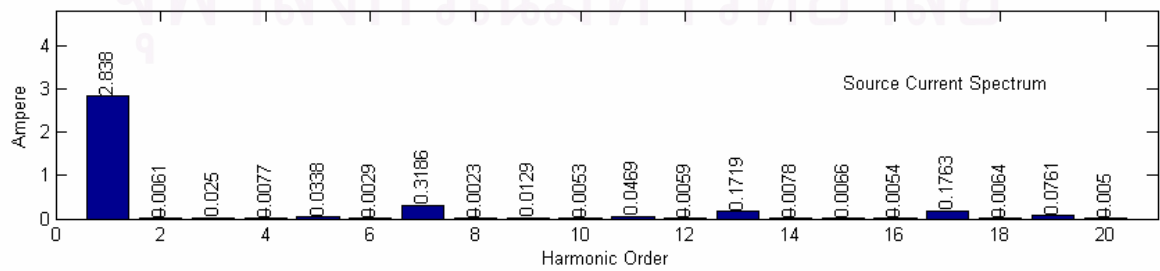
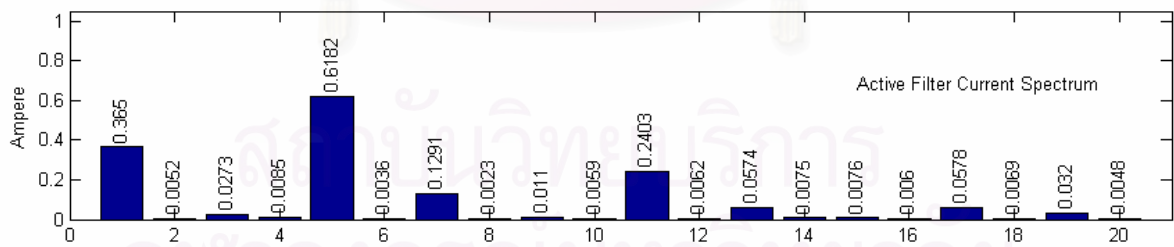
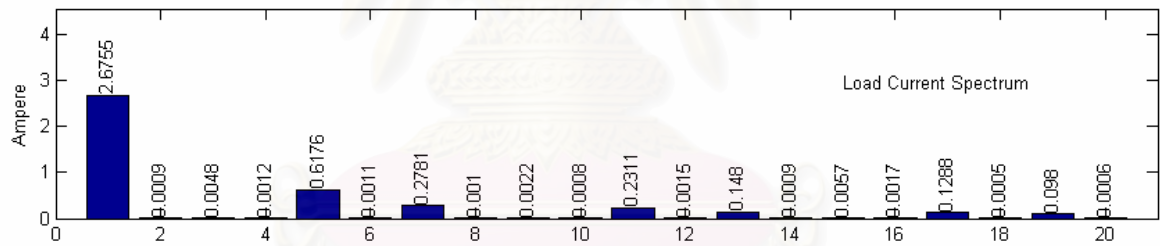
5th and 7th Harmonic Cancellation



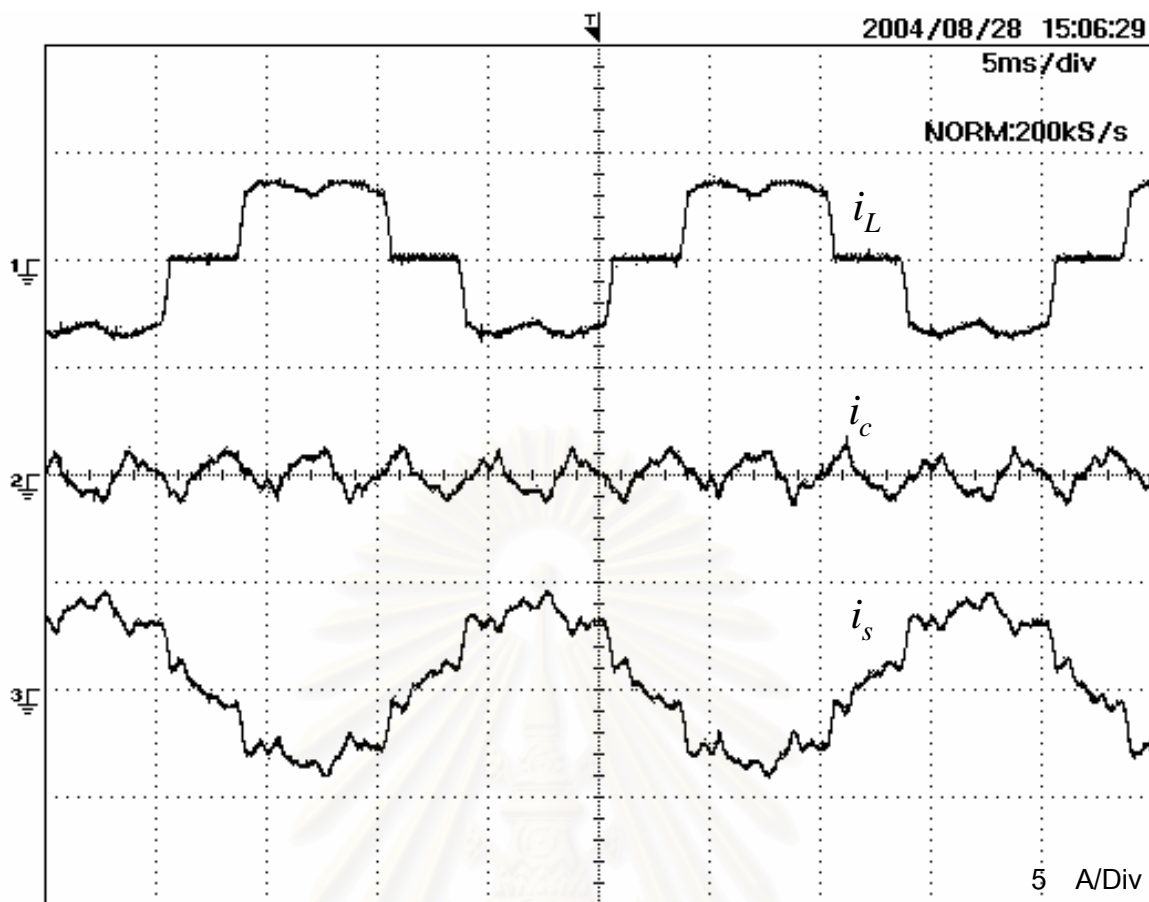
รูปที่ 5.16 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th และอันดับที่ 7th



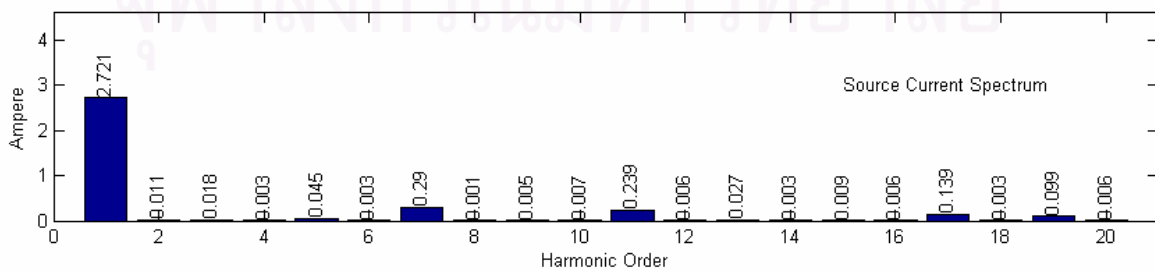
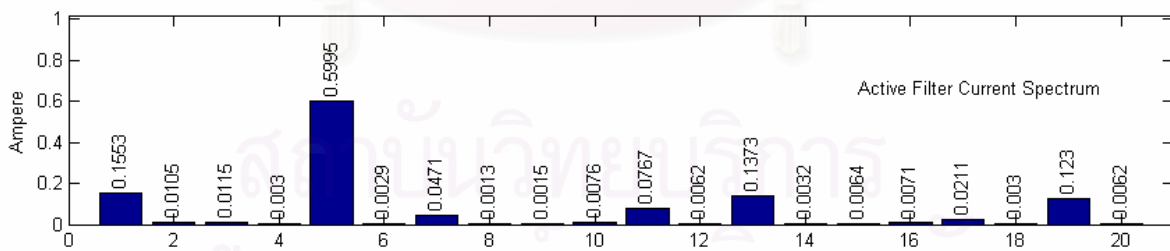
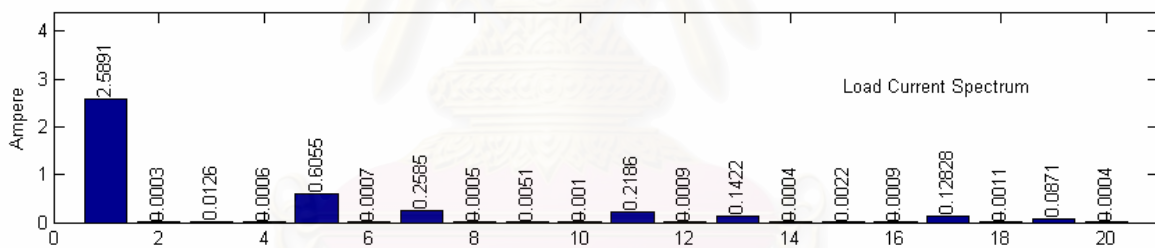
5th and 11th Harmonic Cancellation



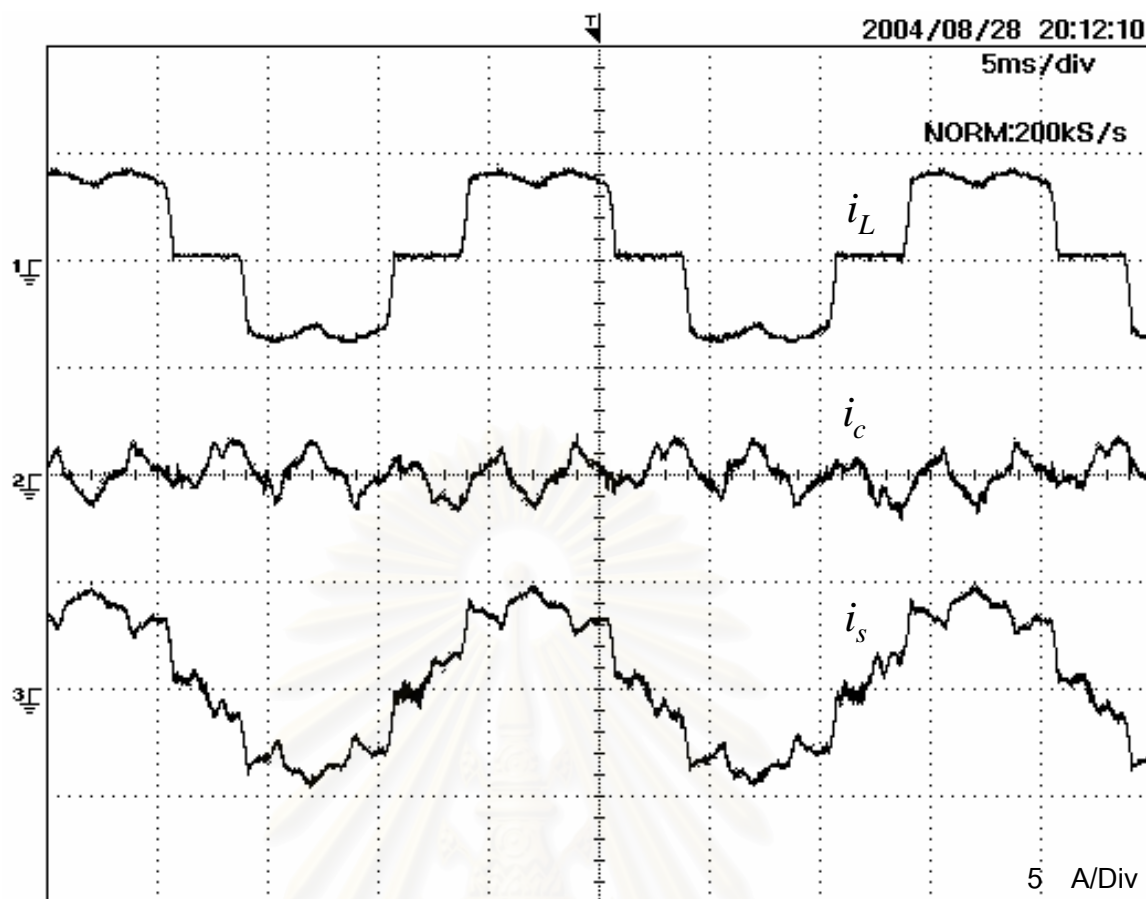
รูปที่ 5.17 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th และอันดับที่ 11th



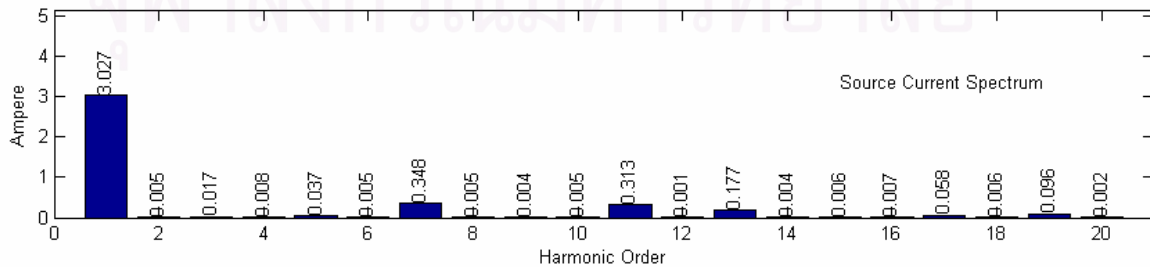
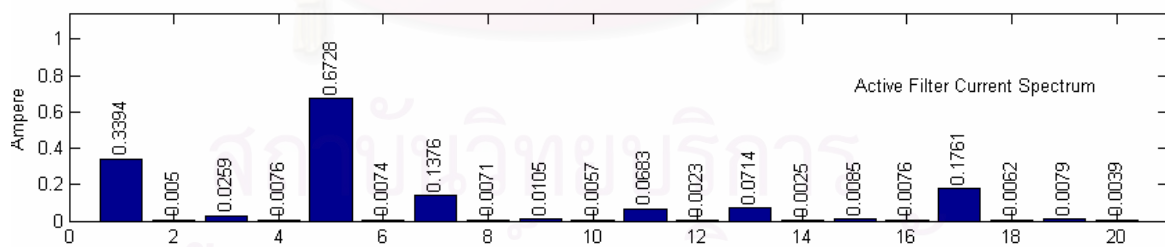
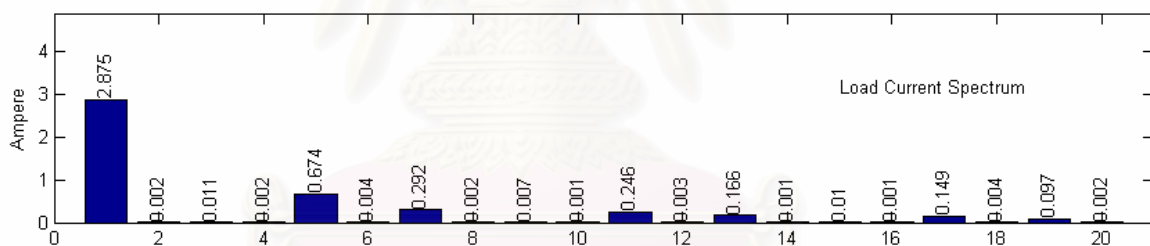
5th and 13th Harmonic Cancellation



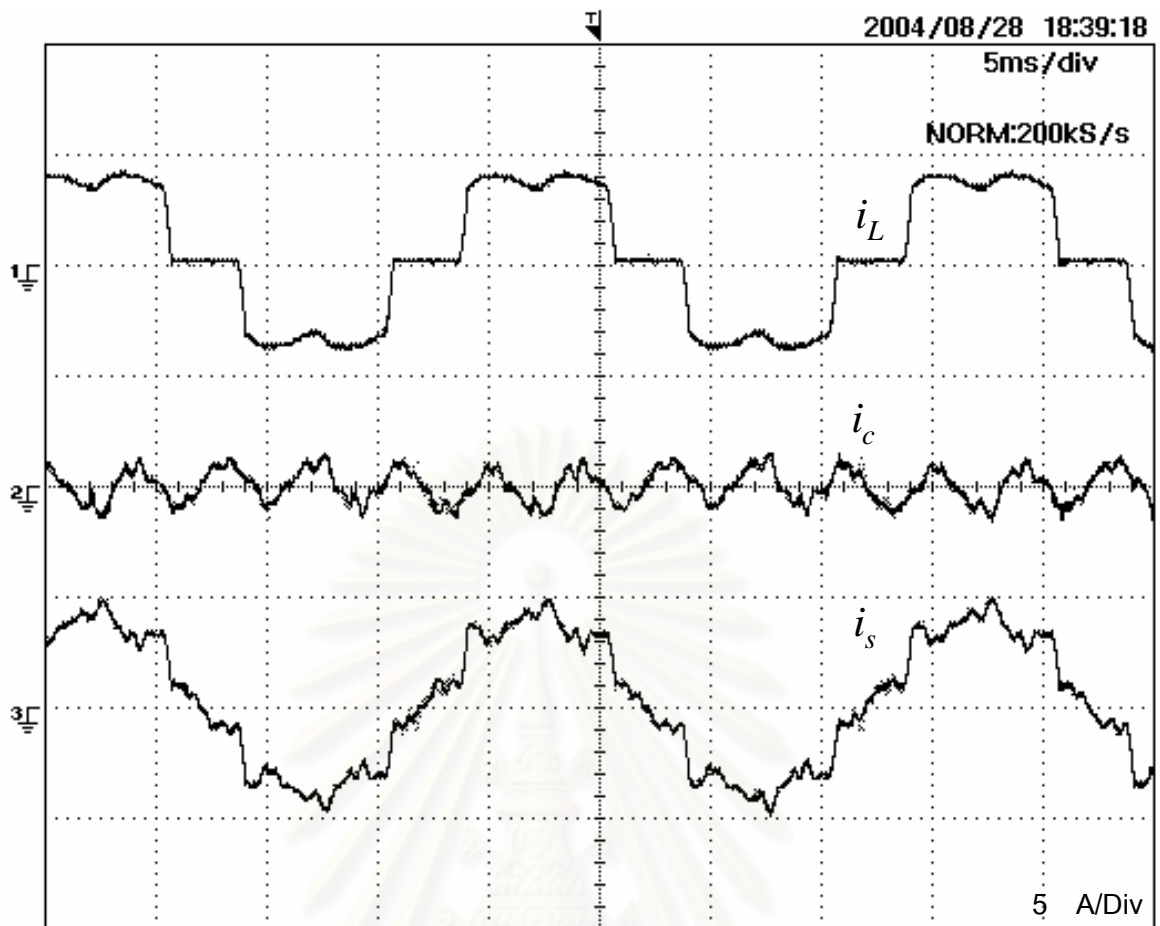
รูปที่ 5.18 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th และอันดับที่ 13th



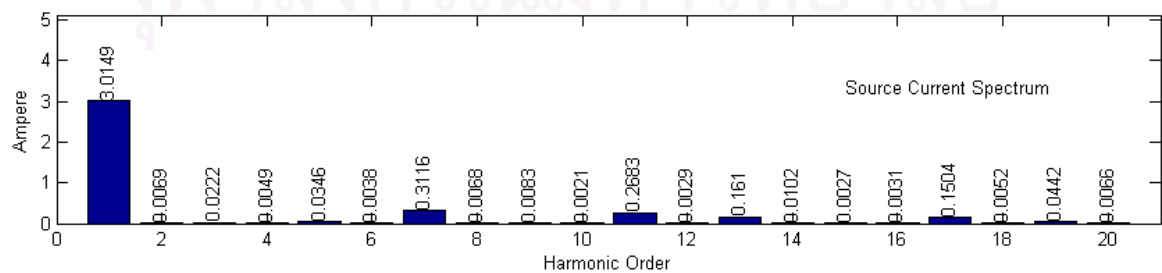
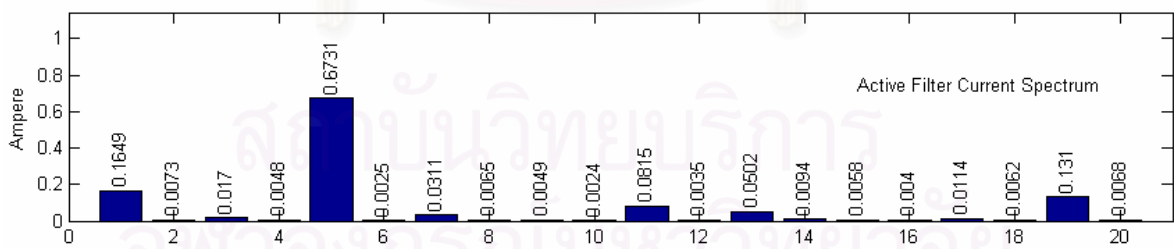
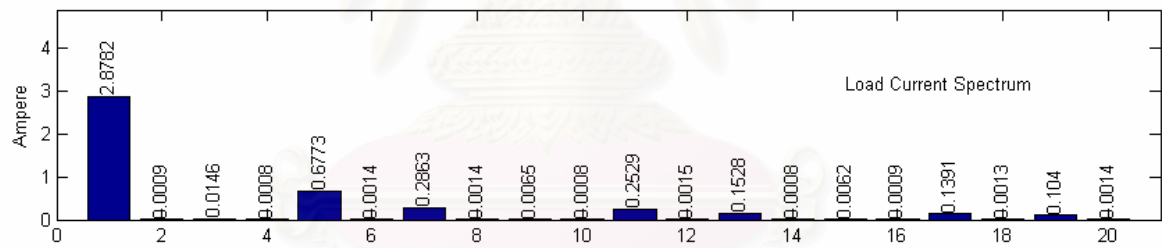
5th and 17th Harmonic Cancellation



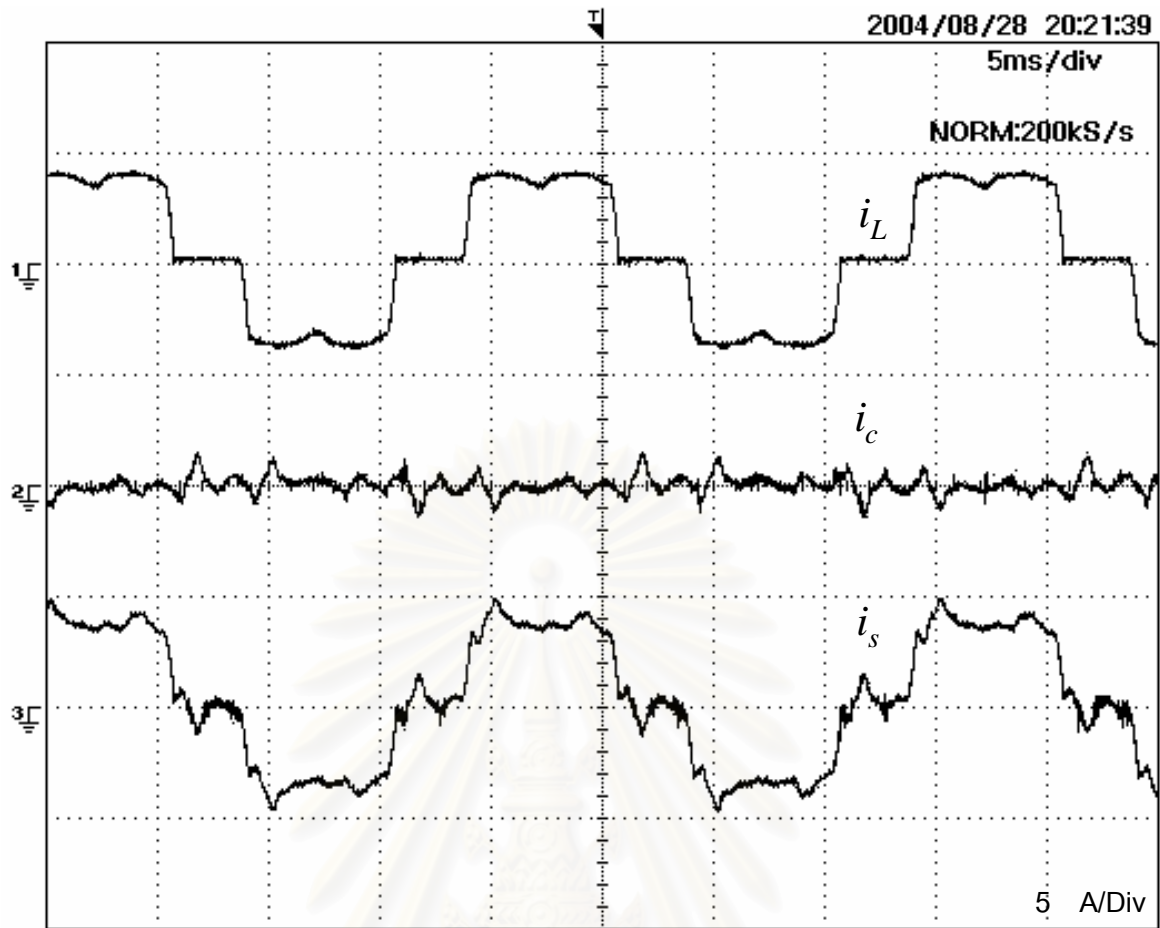
รูปที่ 5.19 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th และอันดับที่ 17th



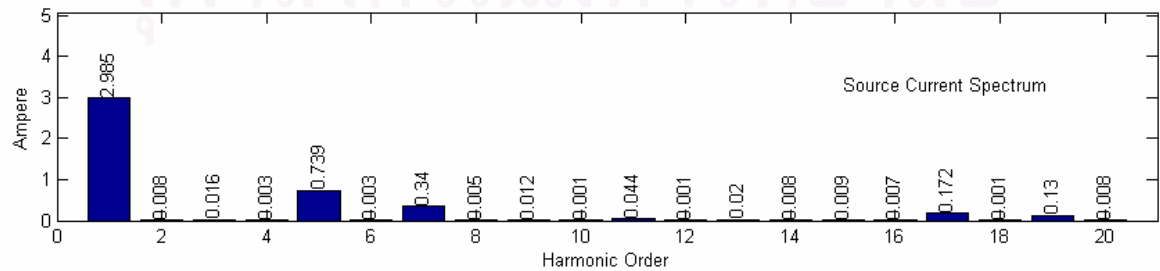
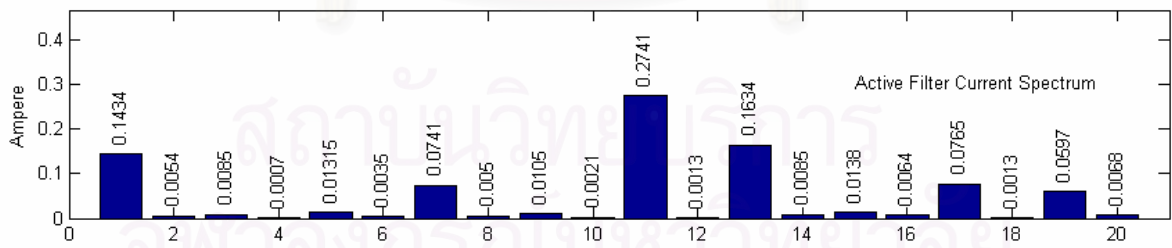
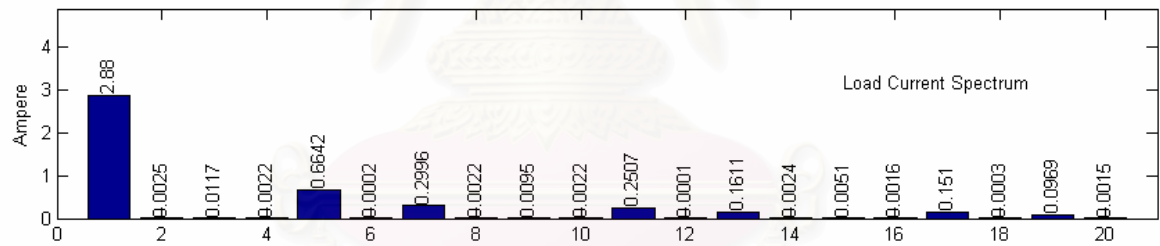
5th and 19th Harmonic Cancellation



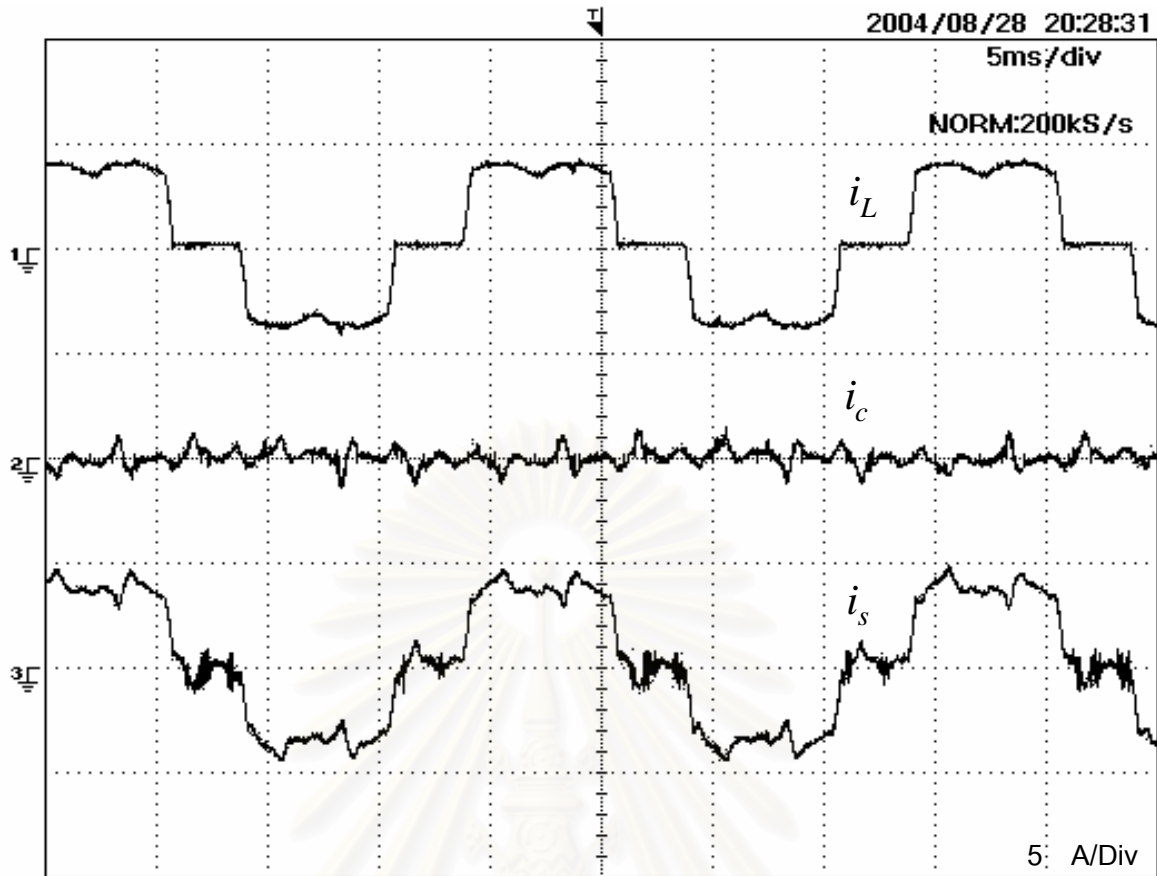
รูปที่ 5.20 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th และอันดับที่ 19th



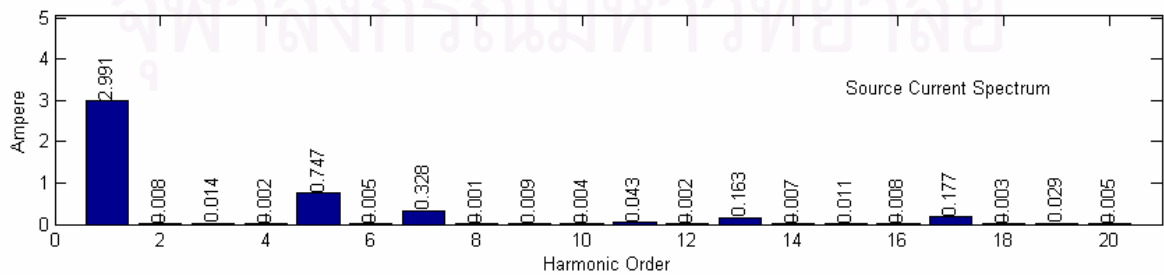
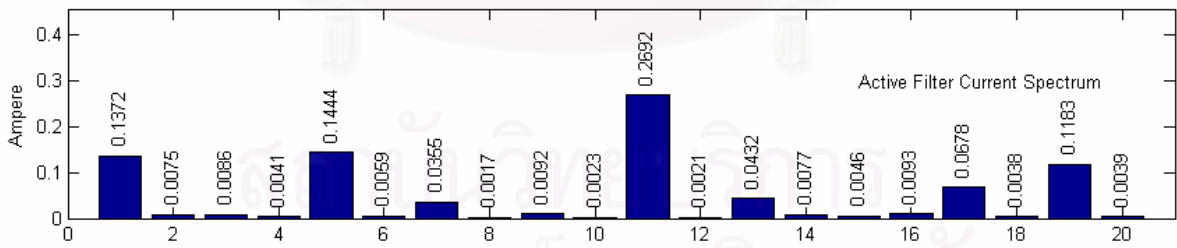
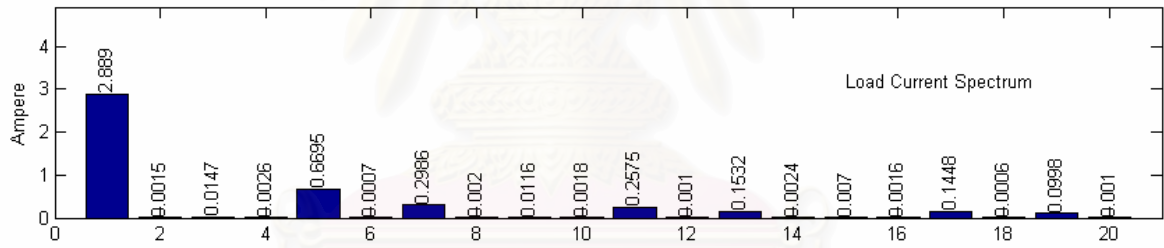
11th and 13th Harmonic Cancellation



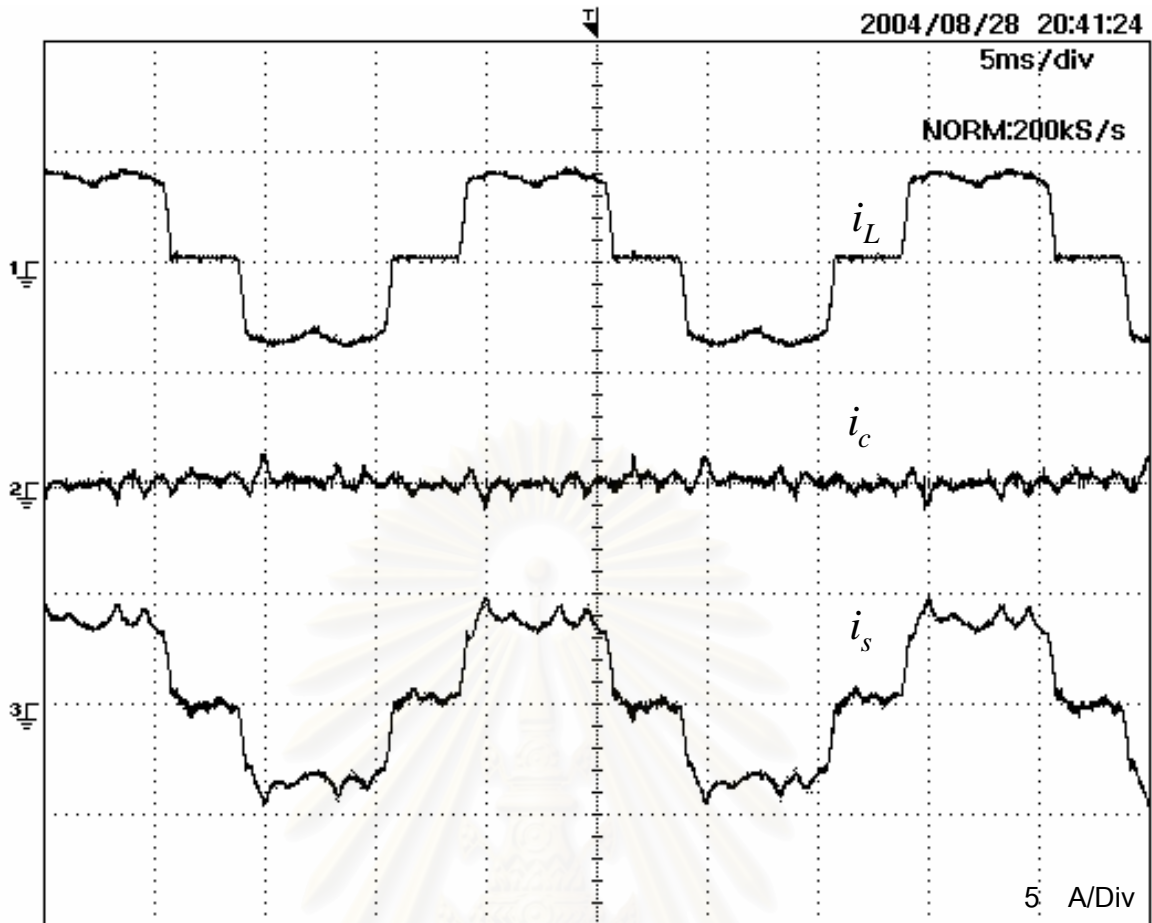
รูปที่ 5.21 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 11th และ อันดับที่ 13th



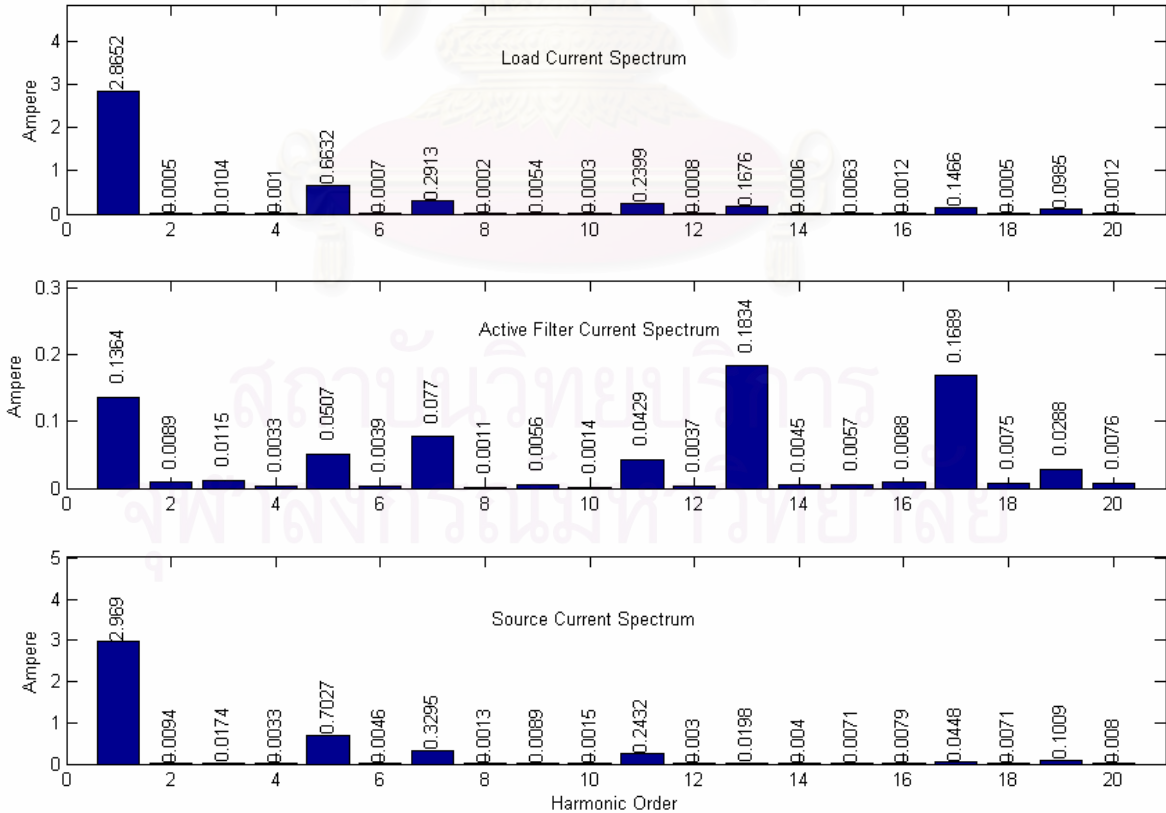
11th and 19th Harmonic Cancellation



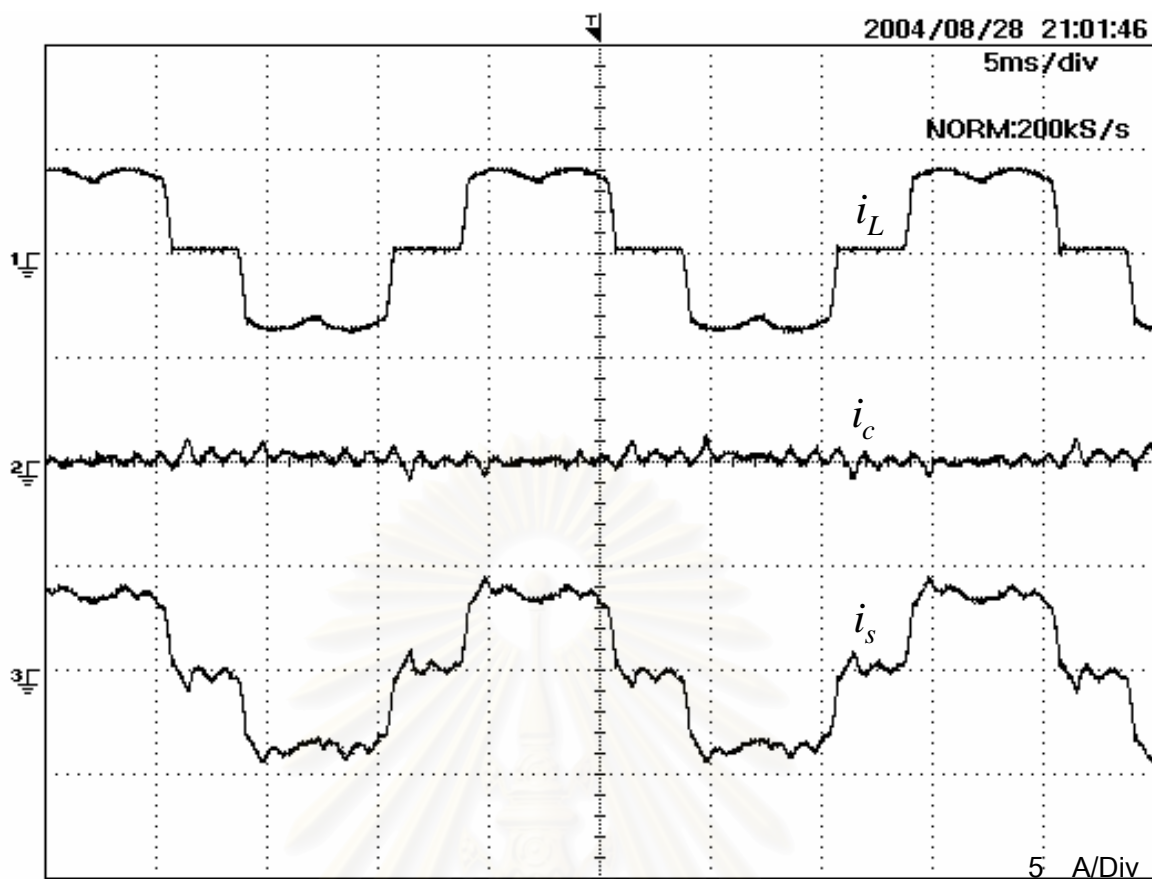
รูปที่ 5.22 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 11th และอันดับที่ 19th



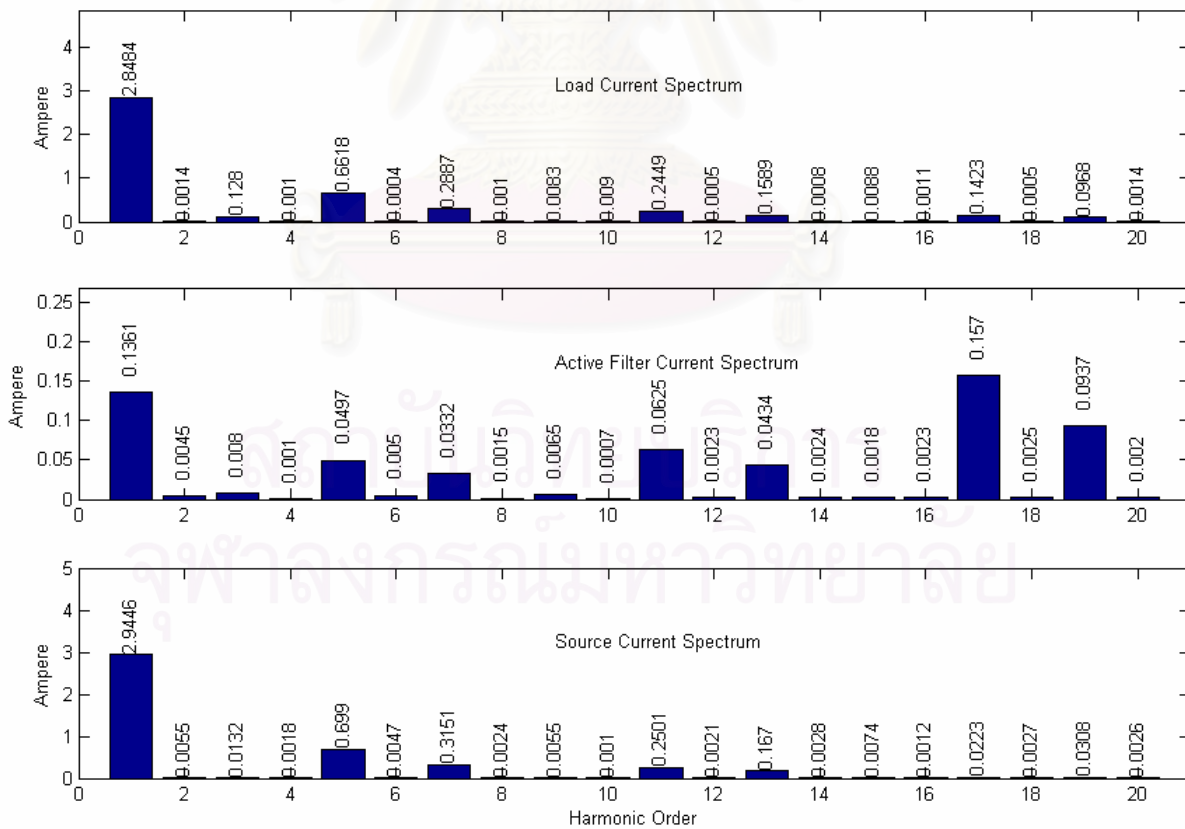
13th and 17th Harmonic Cancellation



รูปที่ 5.23 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 13th และอันดับที่ 17th



17th and 19th Harmonic Cancellation



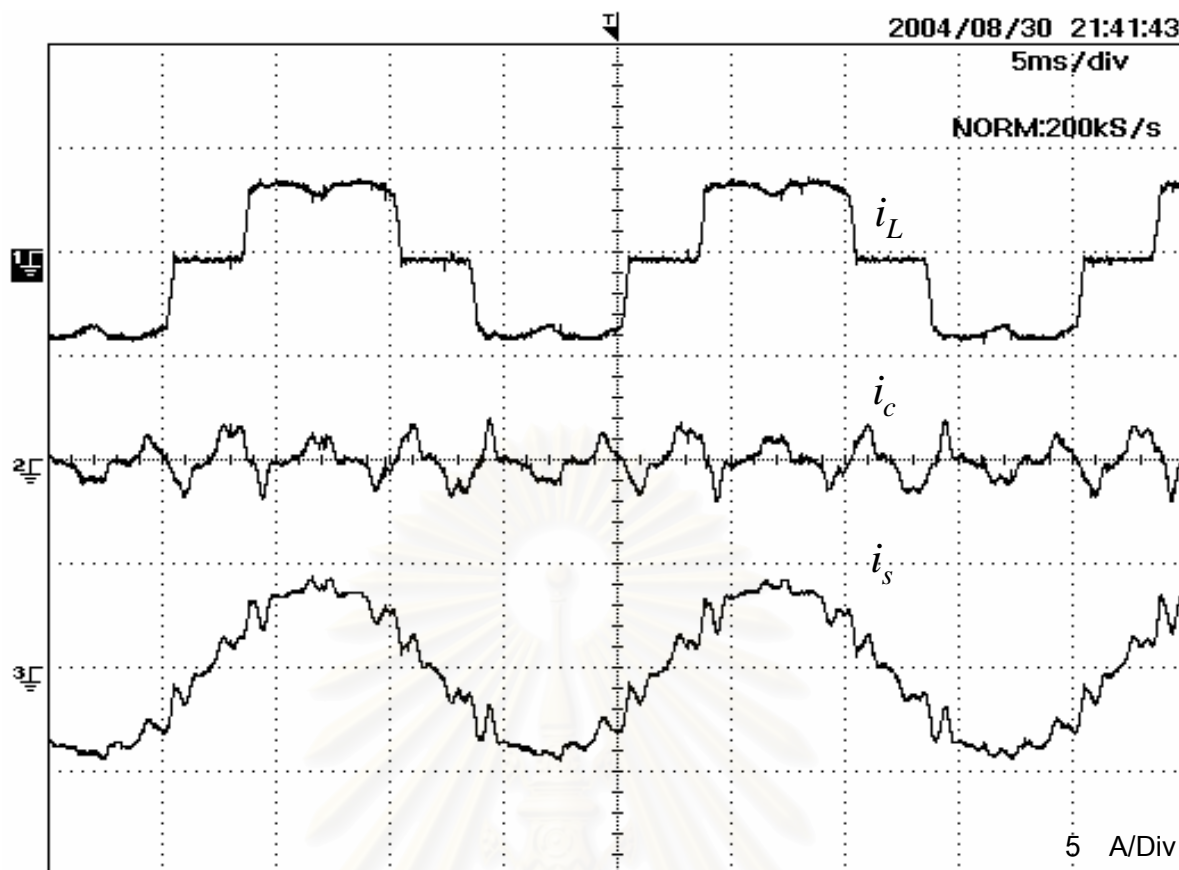
รูปที่ 5.24 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 17th และอันดับที่ 19th

5.2.3 การกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 3 อันดับ

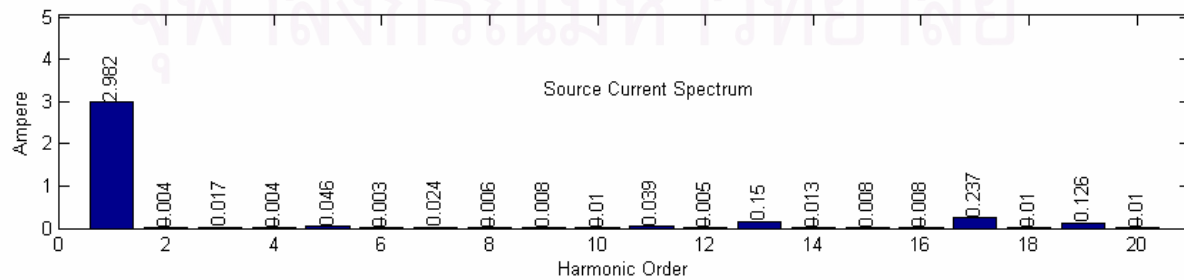
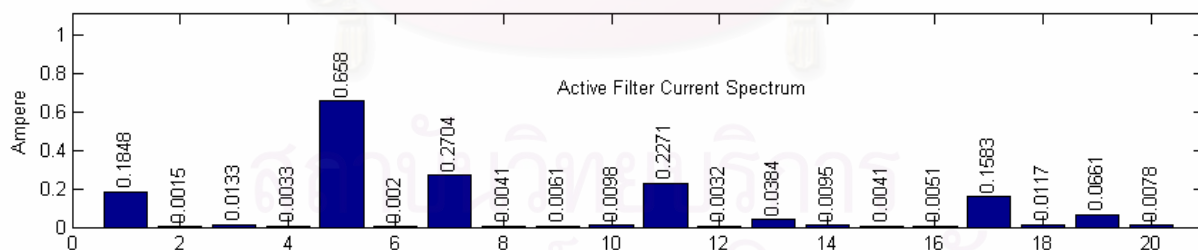
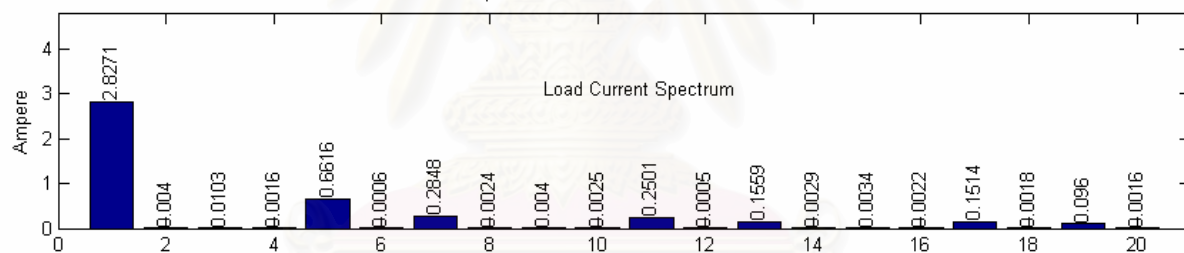
ในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 3 อันดับเราจะพิจารณาเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th, 7th, 11th, 13th, 17th และ 19th ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 5.16 ถึง รูปที่ 5.24 จากผลการทดลองจะเห็นว่าวงจรกรองแยกที่ฟที่เสนอสามารถกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 3 อันดับได้ โดยสรุปผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ละ 3 อันดับ ได้ดังตารางที่ 5.3

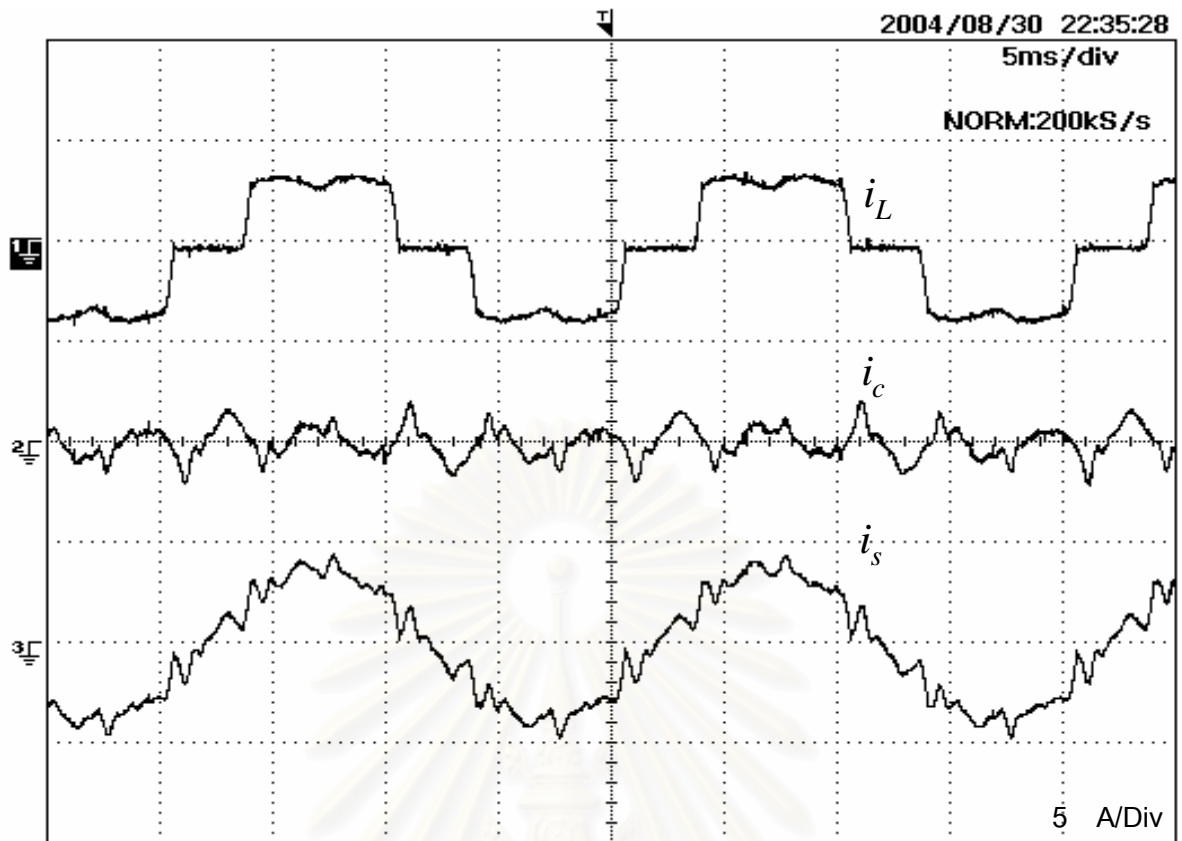
ตารางที่ 5.3 สรุปผลการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 3 อันดับ

อันดับฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด	อันดับฮาร์มอนิก (h)	กระแสโหลดฮาร์มอนิก (i_{Lh})	กระแสแหล่งจ่ายฮาร์มอนิก (i_{sh})	ฮาร์มอนิกเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย $\frac{ i_{sh} }{ i_{Lh} } (\%)$
5 th &7 th &11 th	5 th	0.662	0.046	6.95
	7 th	0.285	0.024	8.42
	11 th	0.250	0.039	15.60
5 th &7 th &13 th	5 th	0.637	0.056	8.79
	7 th	0.262	0.021	8.02
	13 th	0.135	0.034	25.19
5 th &7 th &17 th	5 th	0.647	0.055	8.50
	7 th	0.275	0.017	6.18
	17 th	0.147	0.057	38.78
5 th &7 th &19 th	5 th	0.585	0.056	9.57
	7 th	0.233	0.017	7.30
	19 th	0.073	0.034	46.58
7 th &11 th &13 th	7 th	0.256	0.024	9.38
	11 th	0.235	0.034	14.47
	13 th	0.127	0.036	28.35
7 th &11 th &17 th	7 th	0.263	0.010	3.80
	11 th	0.230	0.040	17.39
	17 th	0.136	0.030	22.06
7 th &11 th &19 th	7 th	0.235	0.014	5.96
	11 th	0.217	0.039	17.97
	19 th	0.067	0.025	37.31
11 th &13 th &17 th	11 th	0.252	0.036	14.29
	13 th	0.152	0.033	21.71
	17 th	0.154	0.038	24.68
11 th &13 th &19 th	11 th	0.257	0.034	13.23
	13 th	0.145	0.035	24.14
	19 th	0.086	0.040	46.51
13 th &17 th &19 th	13 th	0.150	0.026	17.33
	17 th	0.153	0.026	16.99
	19 th	0.082	0.043	52.44

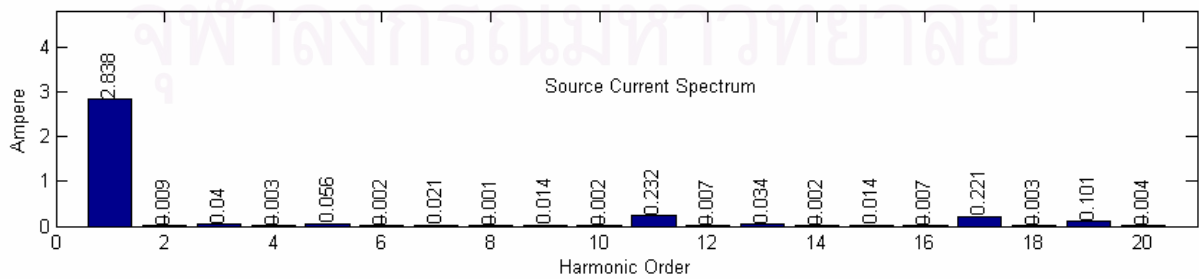
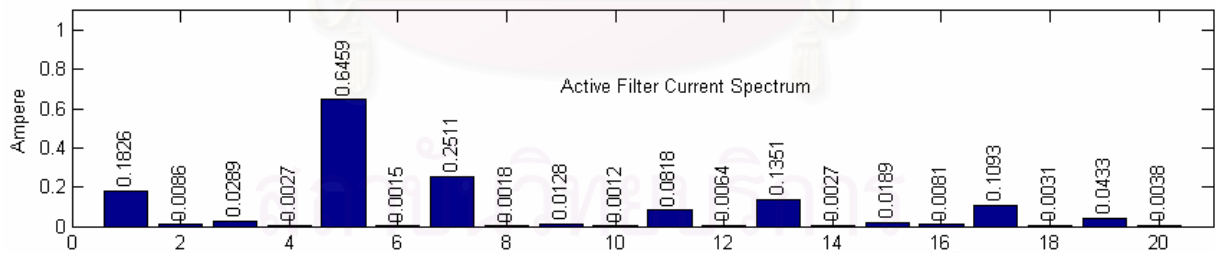
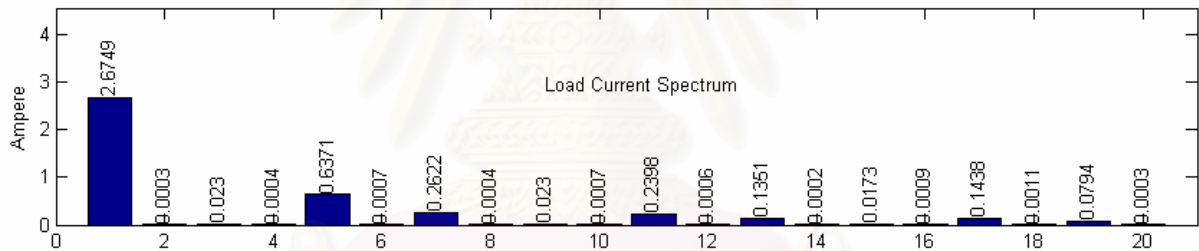


5th, 7th and 11th Harmonic Cancellation

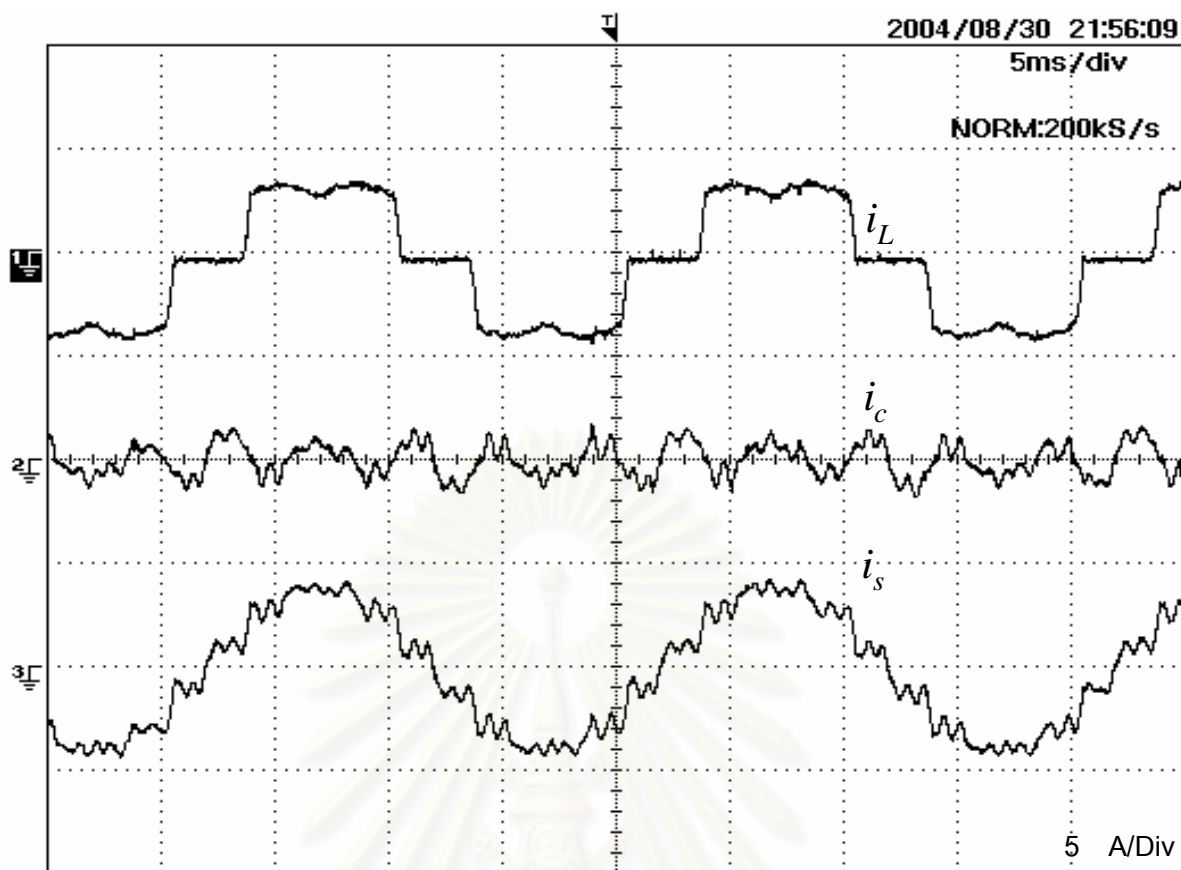
รูปที่ 5.25 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th, 7th และอันดับที่ 11th



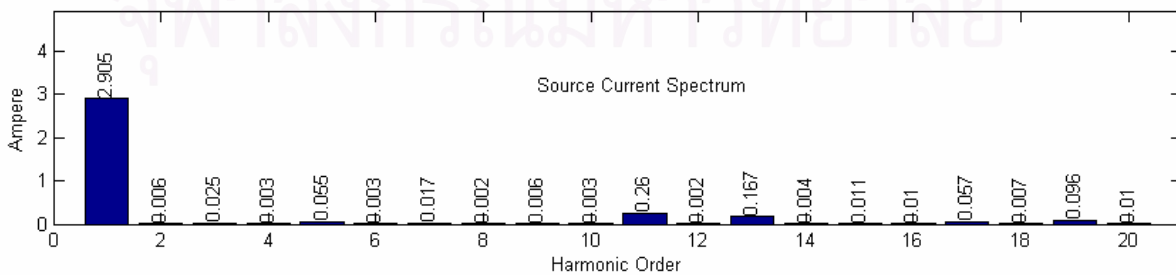
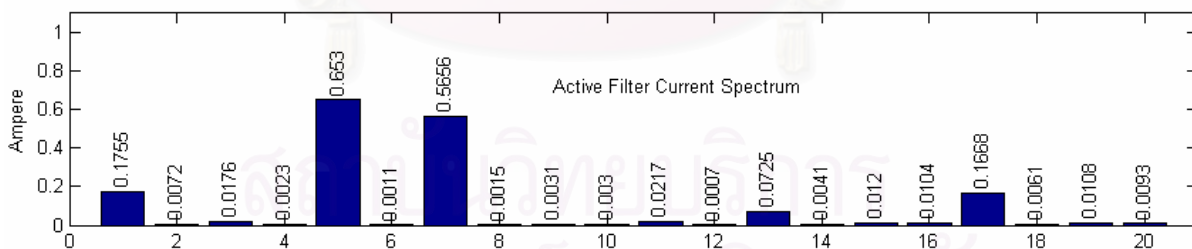
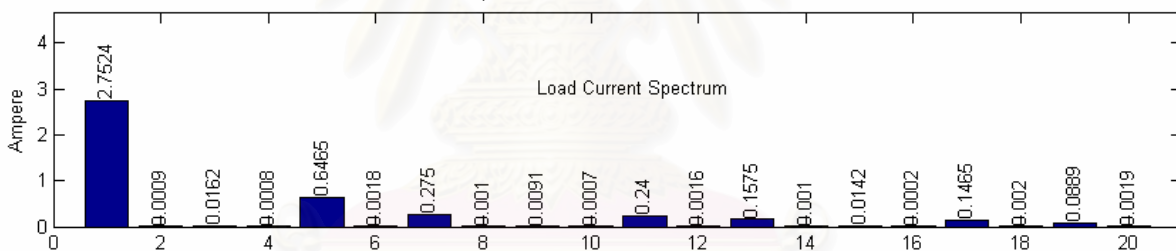
5 th, 7th and 13th Harmonic Cancellation



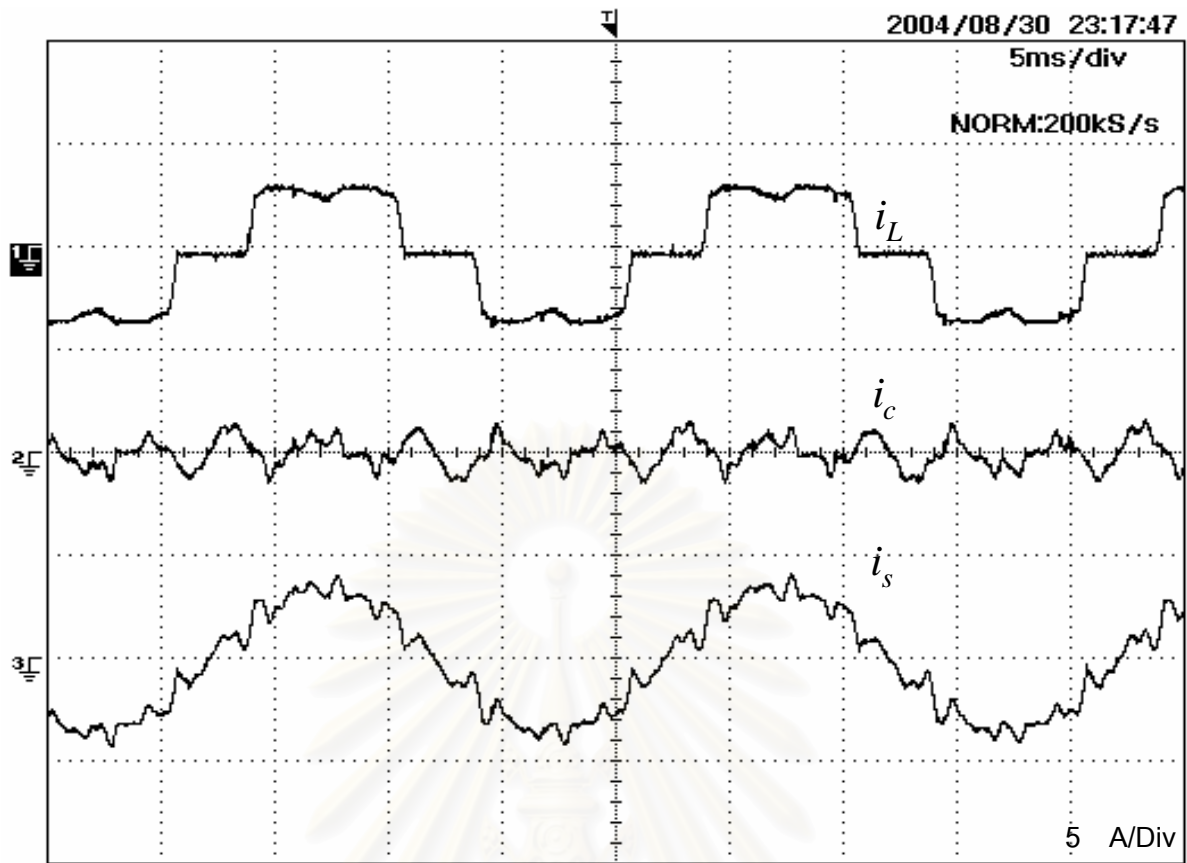
รูปที่ 5.26 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th, 7th และอันดับที่ 13th



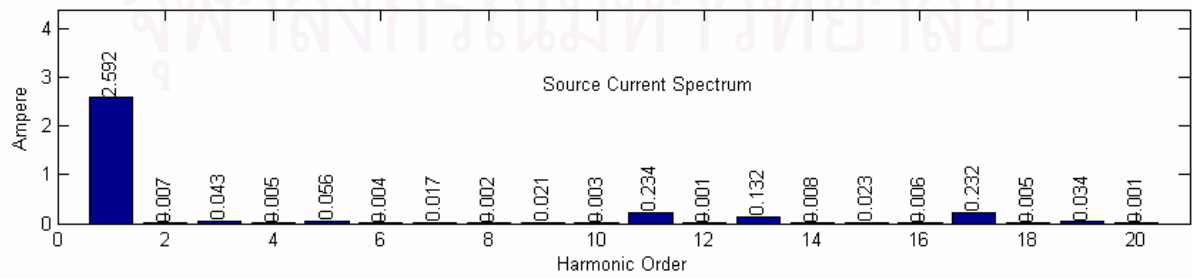
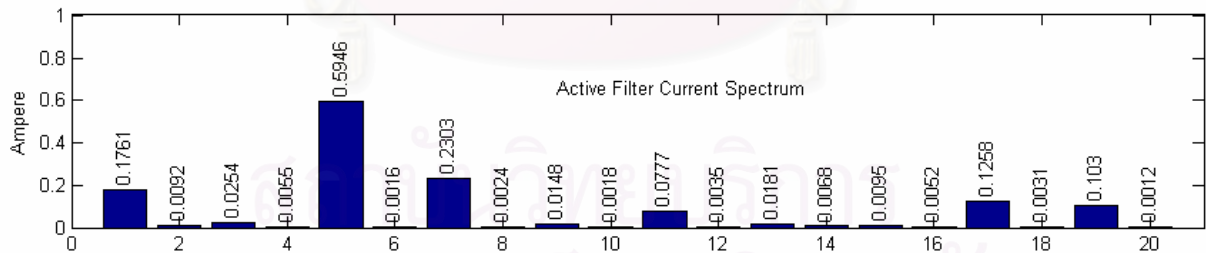
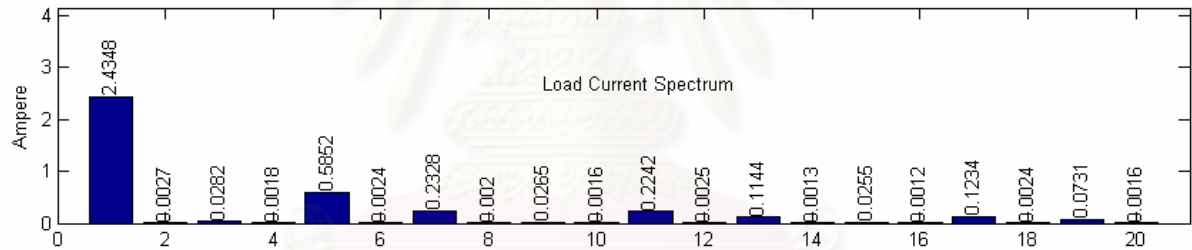
5 th, 7th and 17th Harmonic Cancellation



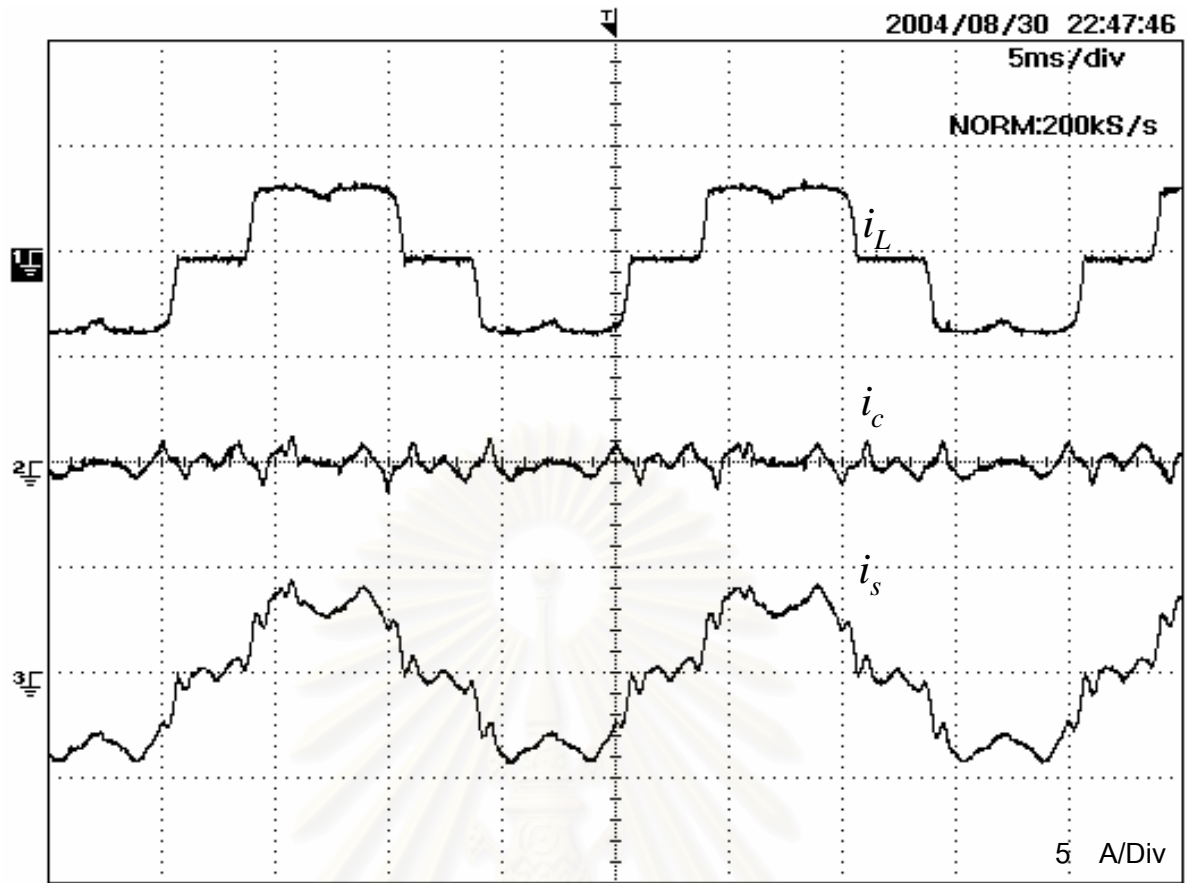
รูปที่ 5.27 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th, 7th และอันดับที่ 17th



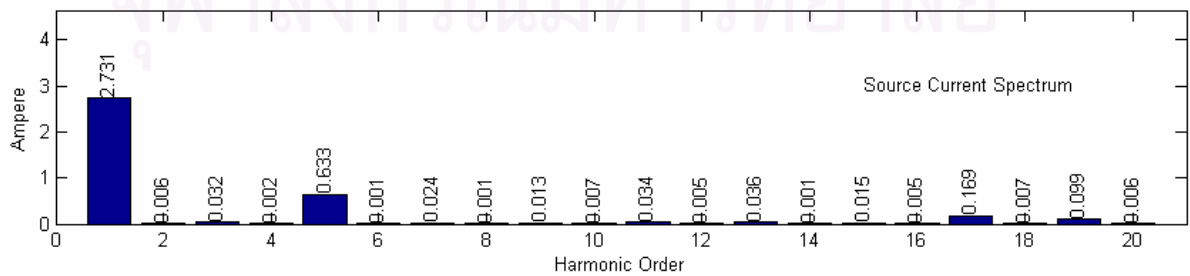
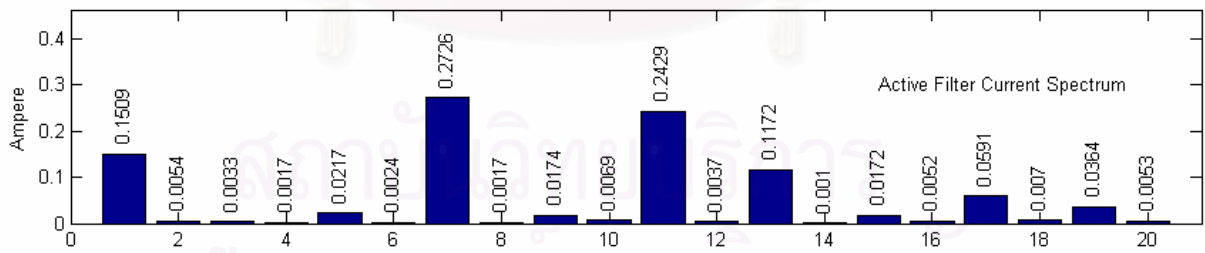
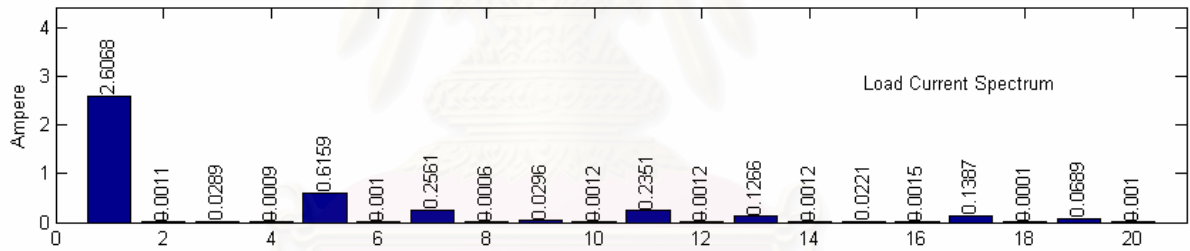
5th, 7th and 19th Harmonic Cancellation



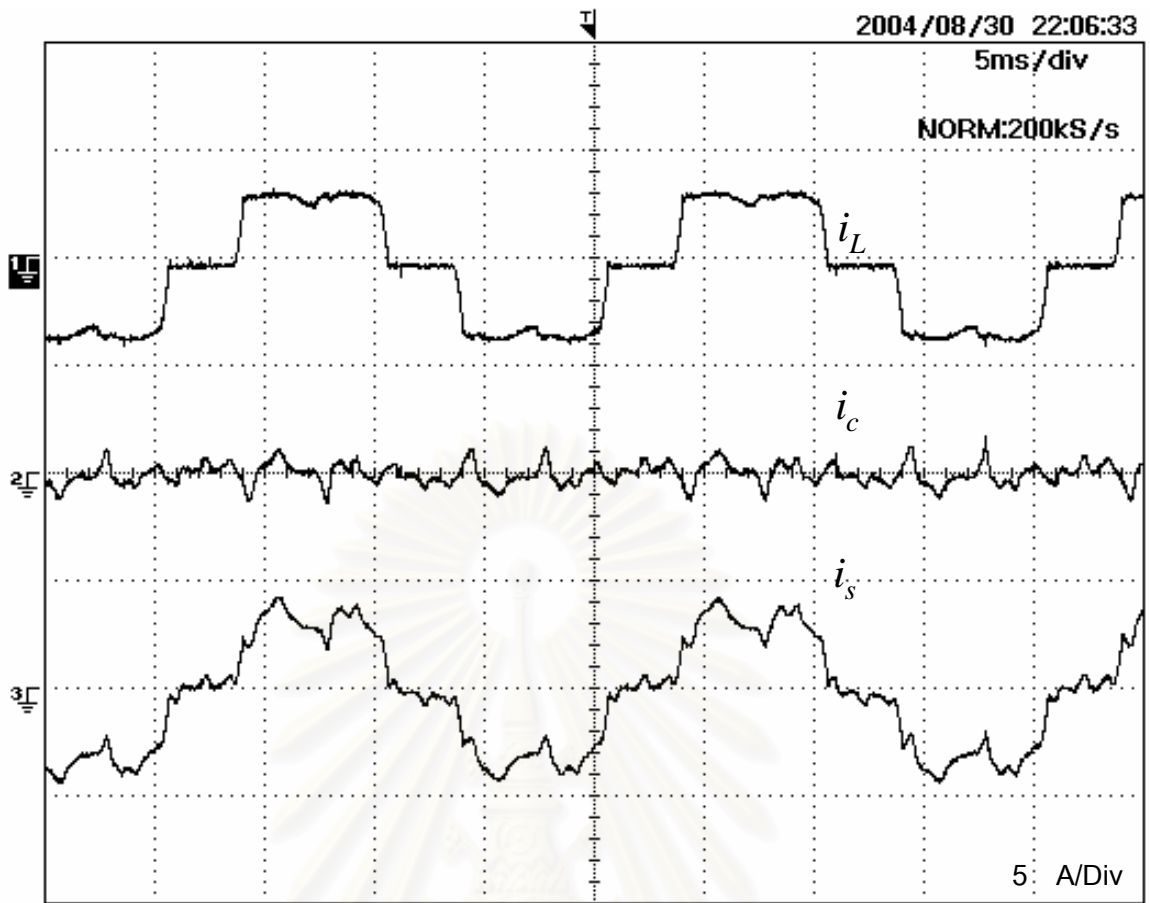
รูปที่ 5.28 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th, 7th และอันดับที่ 19th



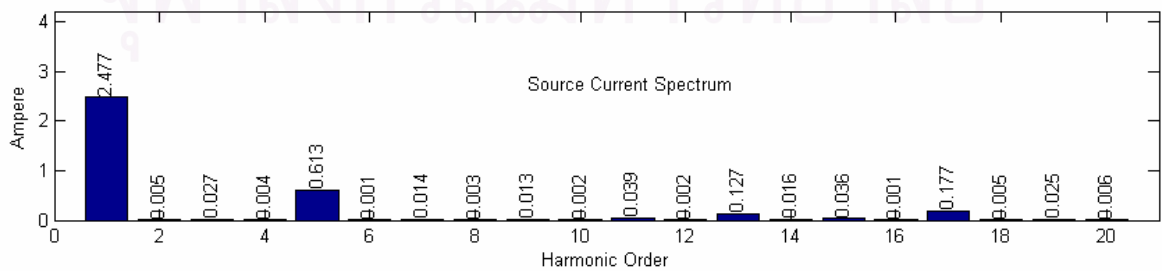
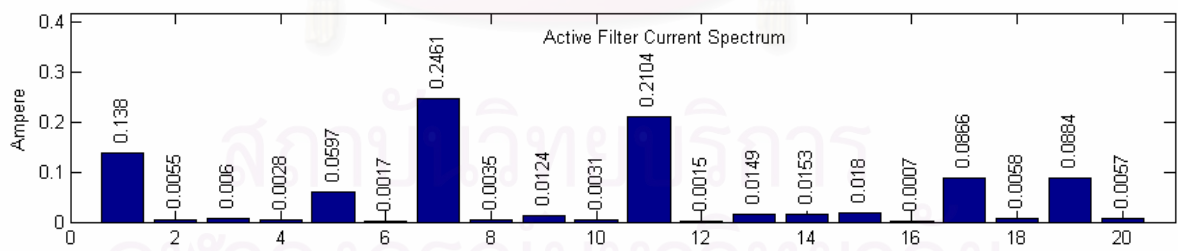
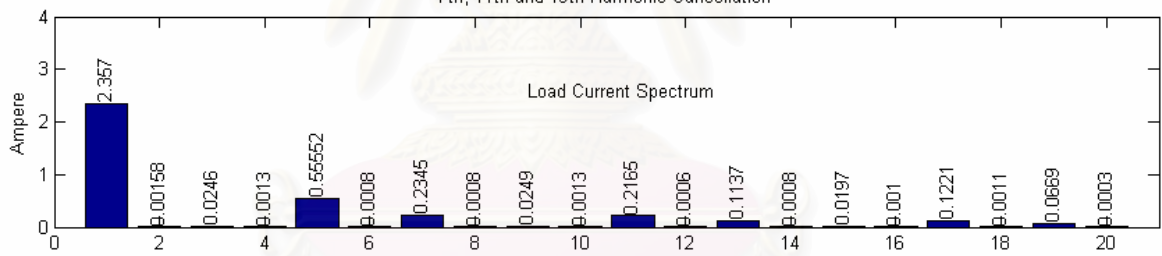
7th, 11th and 13th Harmonic Cancellation



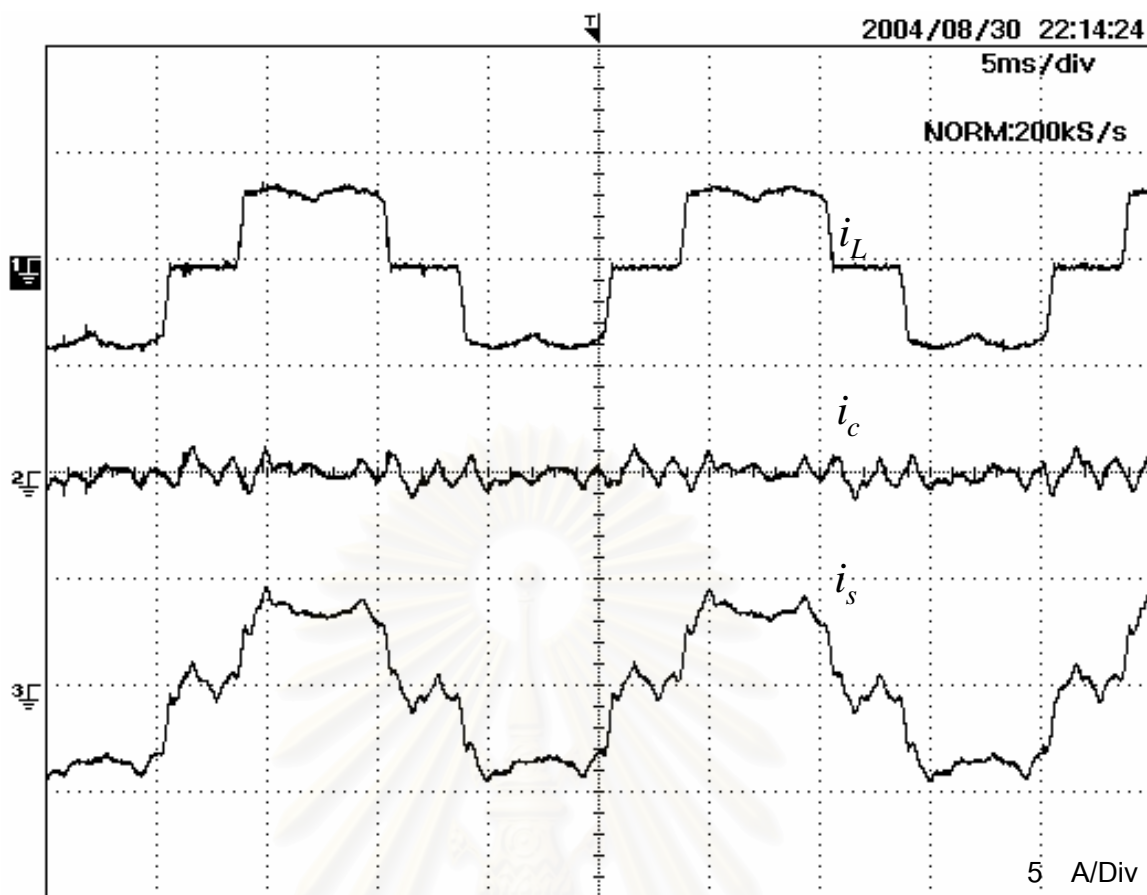
รูปที่ 5.29 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 7th, 11th และอันดับที่ 13th



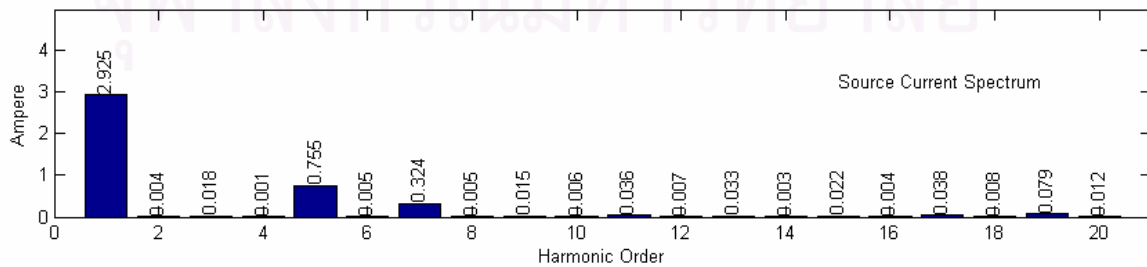
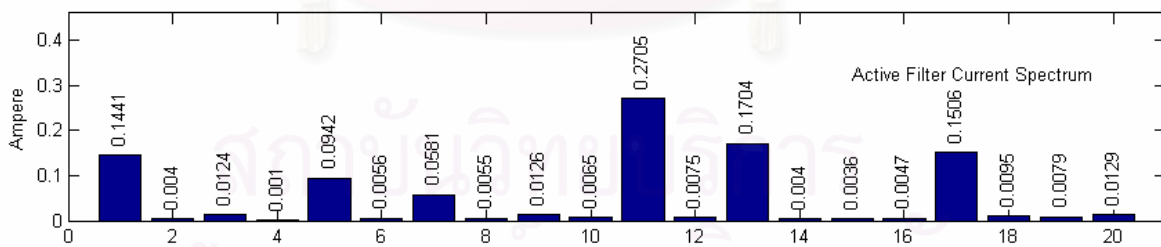
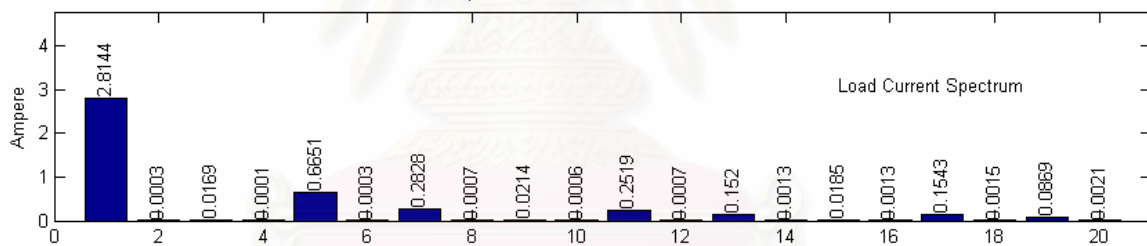
7th, 11th and 19th Harmonic Cancellation



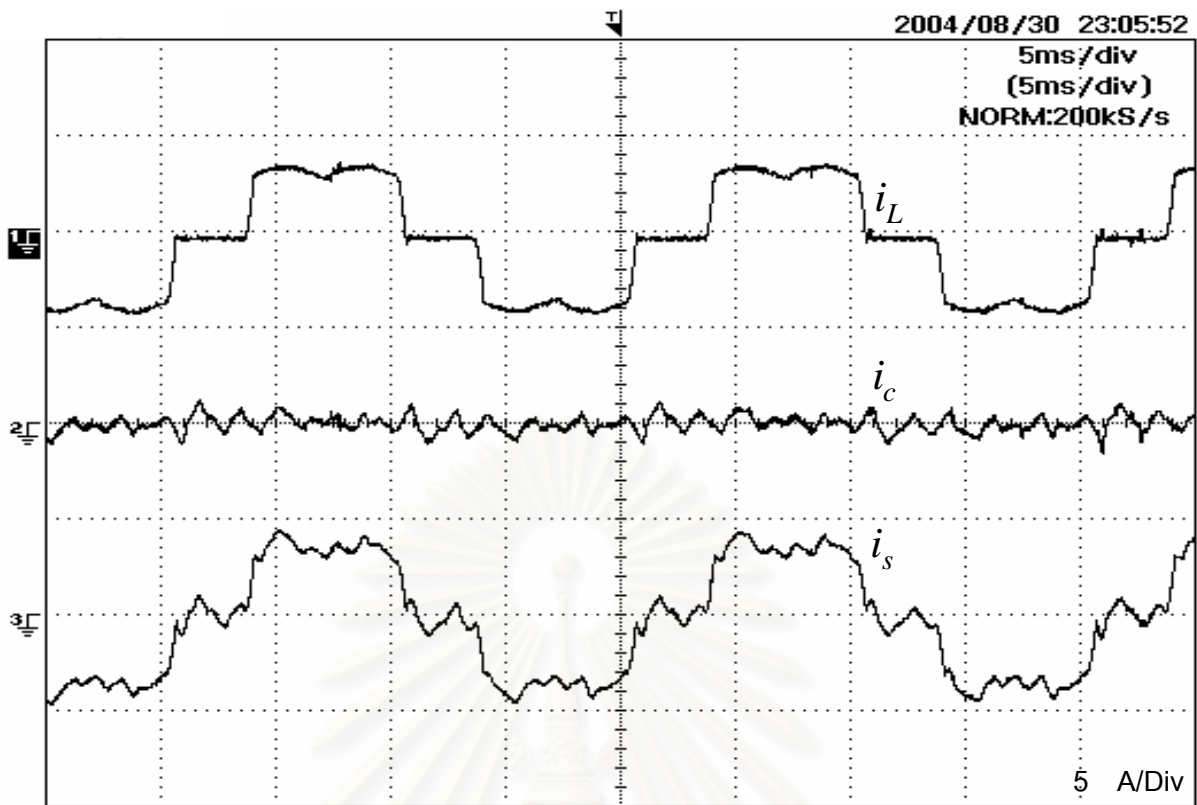
รูปที่ 5.30 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 7th, 11th และอันดับที่ 19th



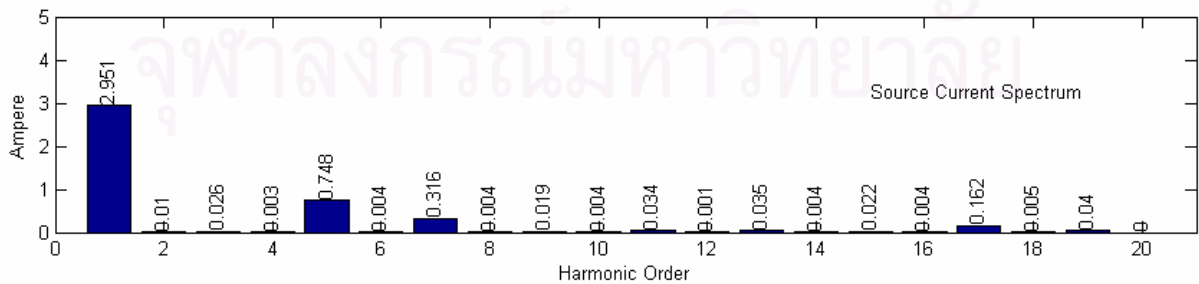
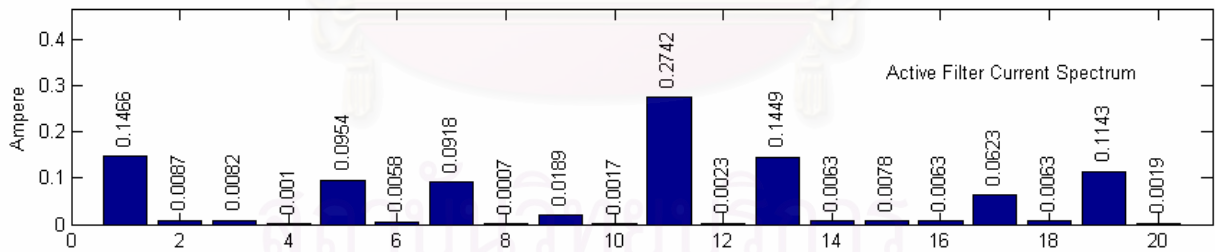
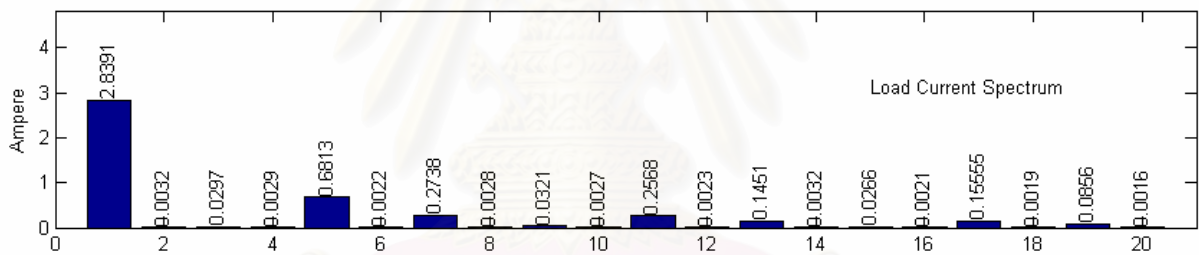
11th, 13th and 17th Harmonic Cancellation



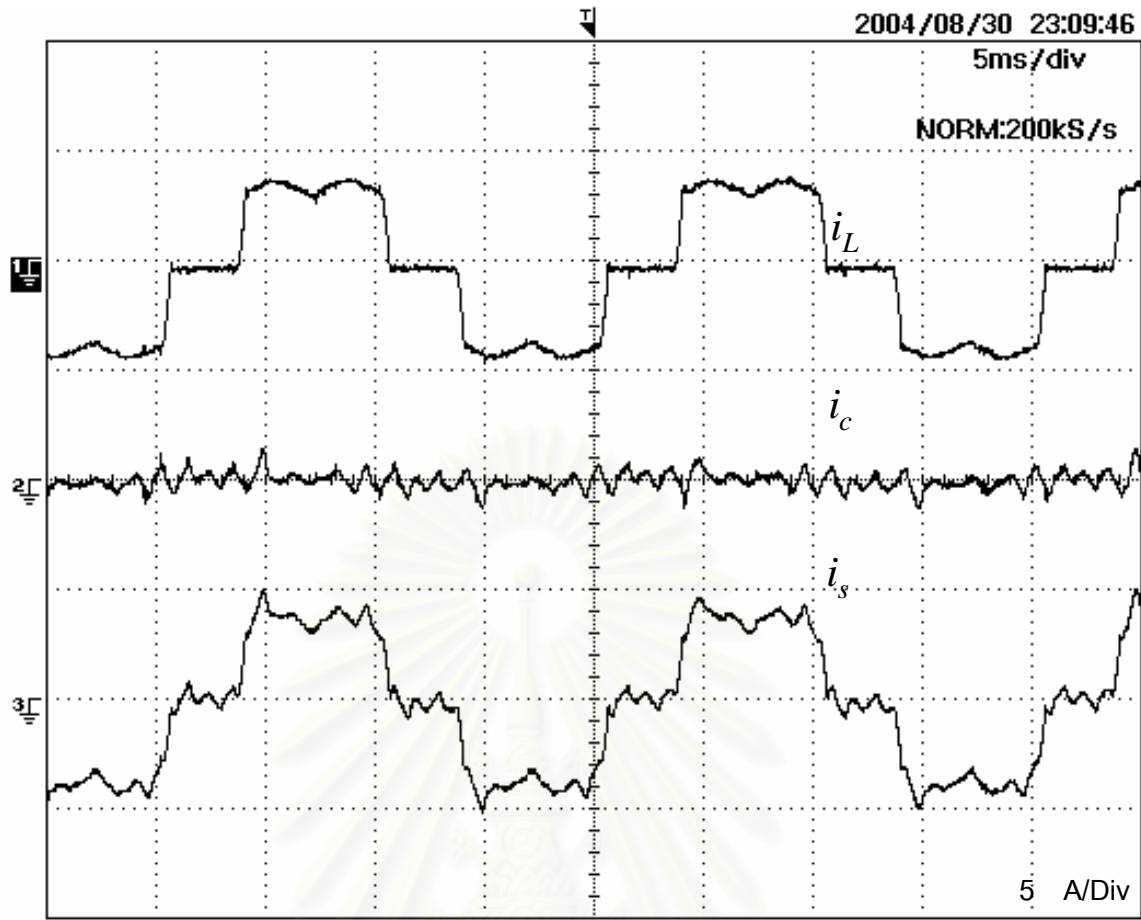
รูปที่ 5.31 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 11th, 13th และอันดับที่ 17th



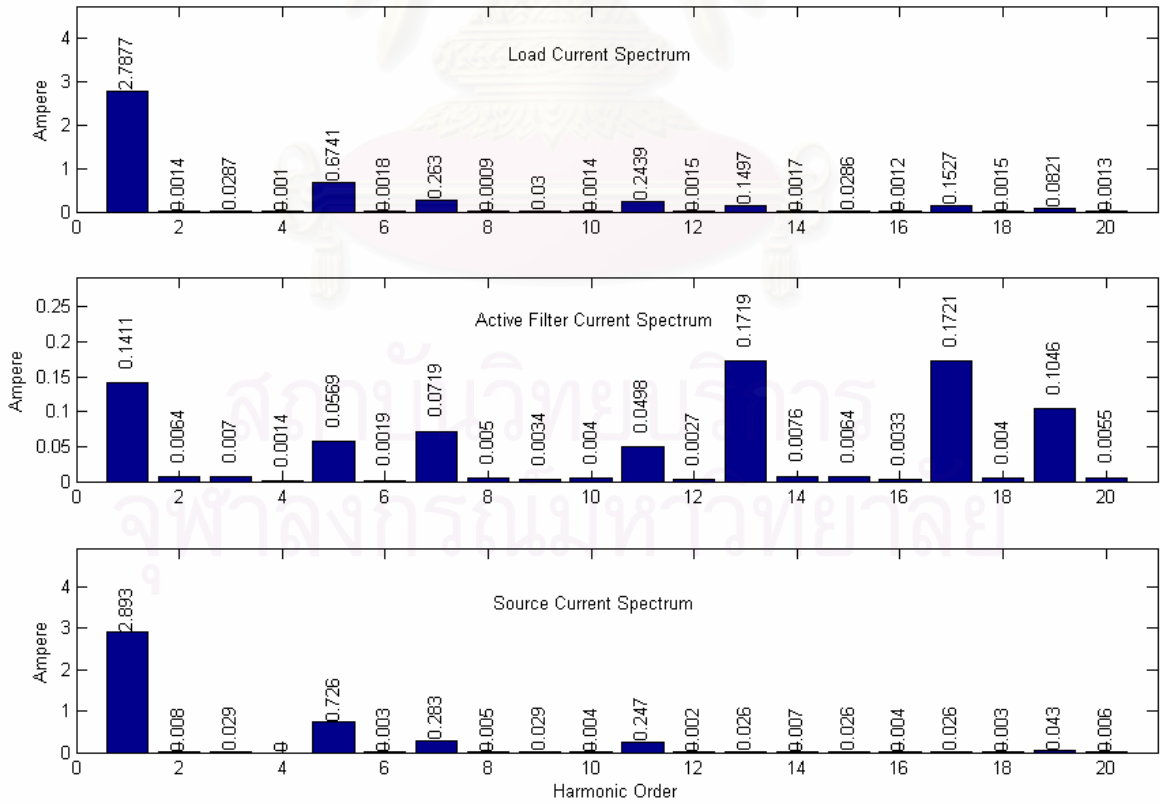
11th, 13th and 19th Harmonic Cancellation



รูปที่ 5.32 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 11th, 13th และอันดับที่ 19th



13th, 17th and 19th Harmonic Cancellation



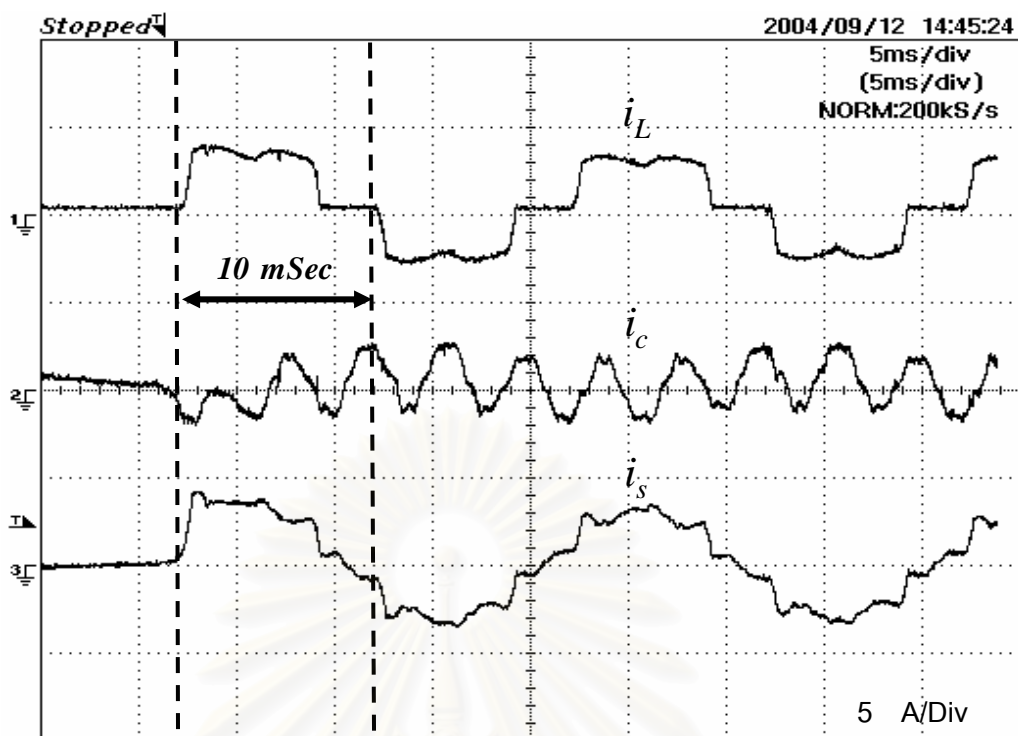
รูปที่ 5.33 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 13th, 17th และอันดับที่ 19th

5.2 ผลตอบสภาวะชั่วคราวของวงจรรองแอกทีฟ

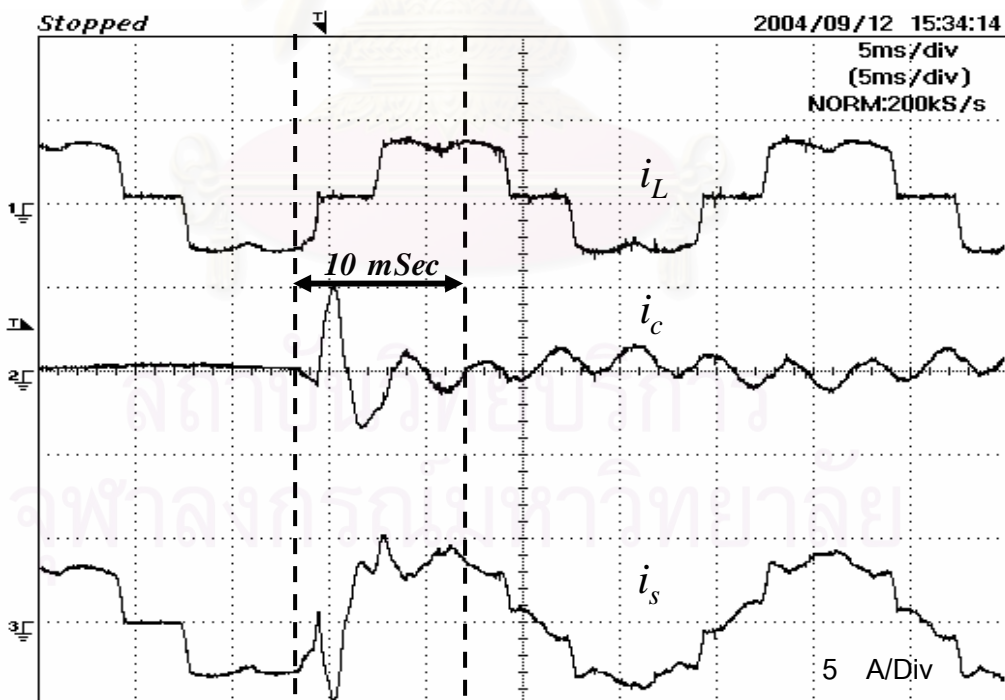
ในที่นี้เราจะทำการทดสอบวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกแบบต่างๆ เพื่อศึกษาผลตอบสภาวะชั่วคราวของการทำงานของวงจรรองแอกทีฟ ซึ่งเราจะดูผลตอบสภาวะชั่วคราวสองกรณีด้วยกันคือ กรณีที่กระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น และกรณีที่วงจรรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแส โดยจะเลือกแสดงผลตอบสภาวะชั่วคราวของฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th สำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ละอันดับ, 5th&7th สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 2 อันดับ และอันดับที่ 5th&7th&11th สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันที่ละ 3 อันดับ ดังแสดงตามรูปที่ 5.34 – รูปที่ 5.39



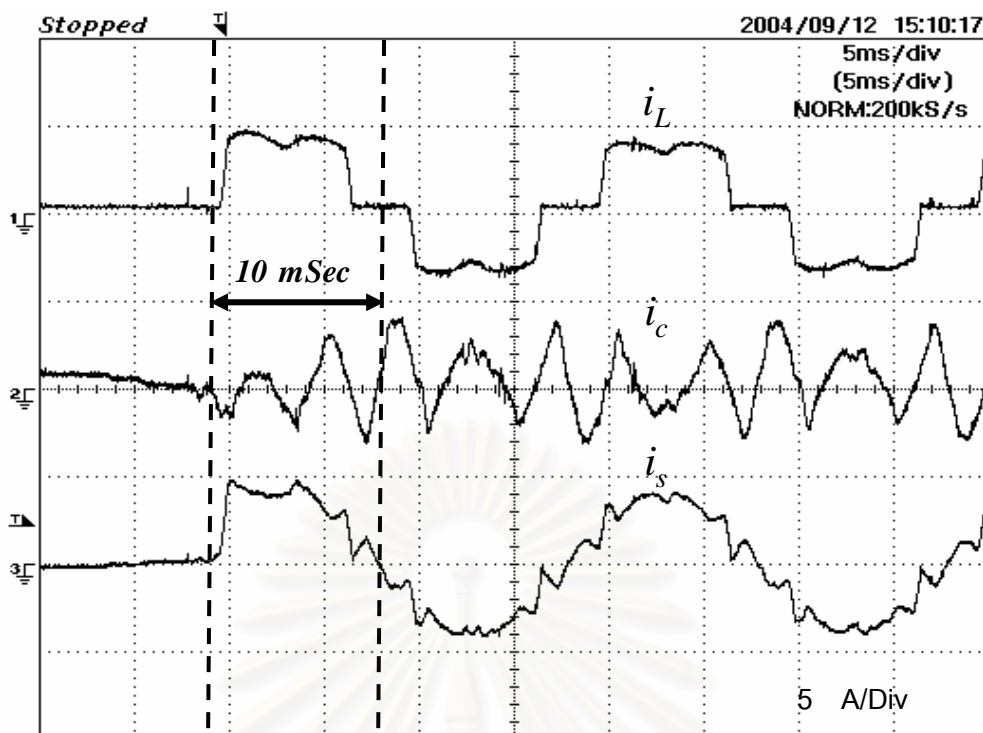
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



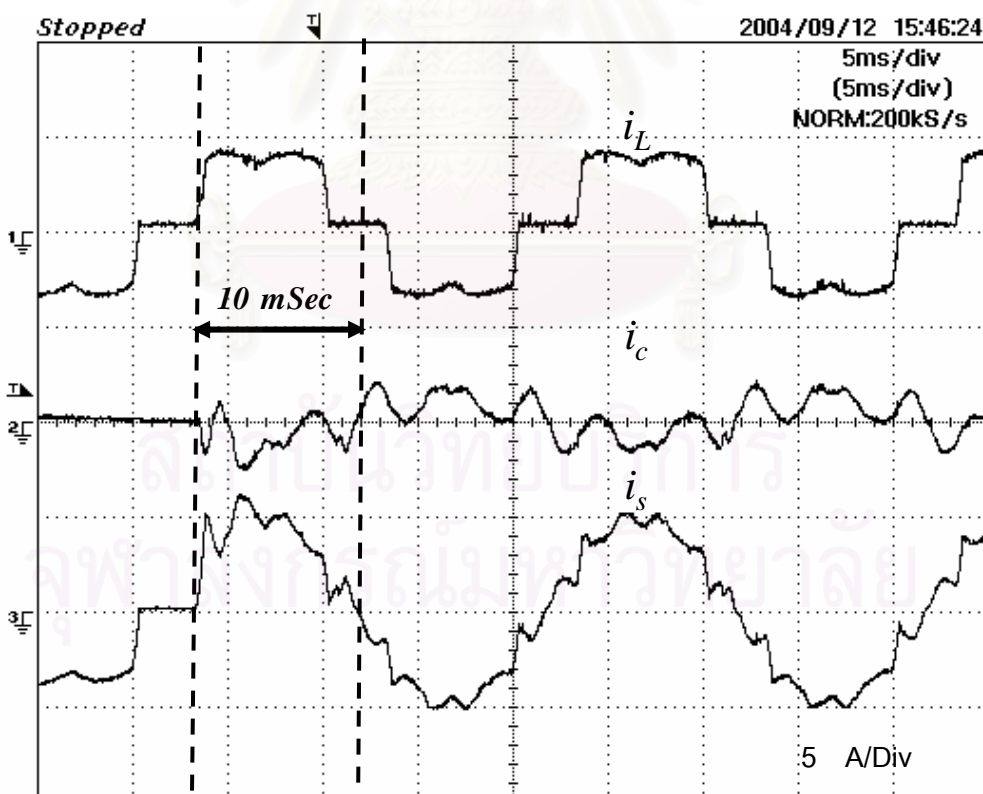
รูปที่ 5.34 ผลตอบสนองภาวะชั่วคราวสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิก อันดับที่ 5th
เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบขึ้น



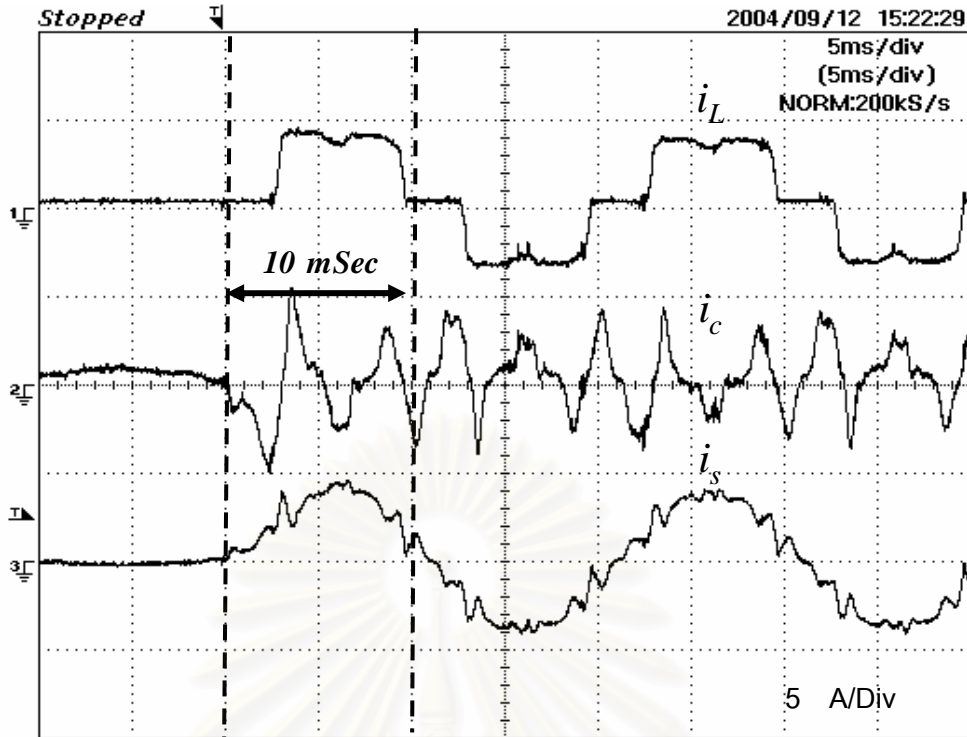
รูปที่ 5.35 ผลตอบสนองภาวะชั่วคราวสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิก อันดับที่ 5th
เมื่อวงจรรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแส



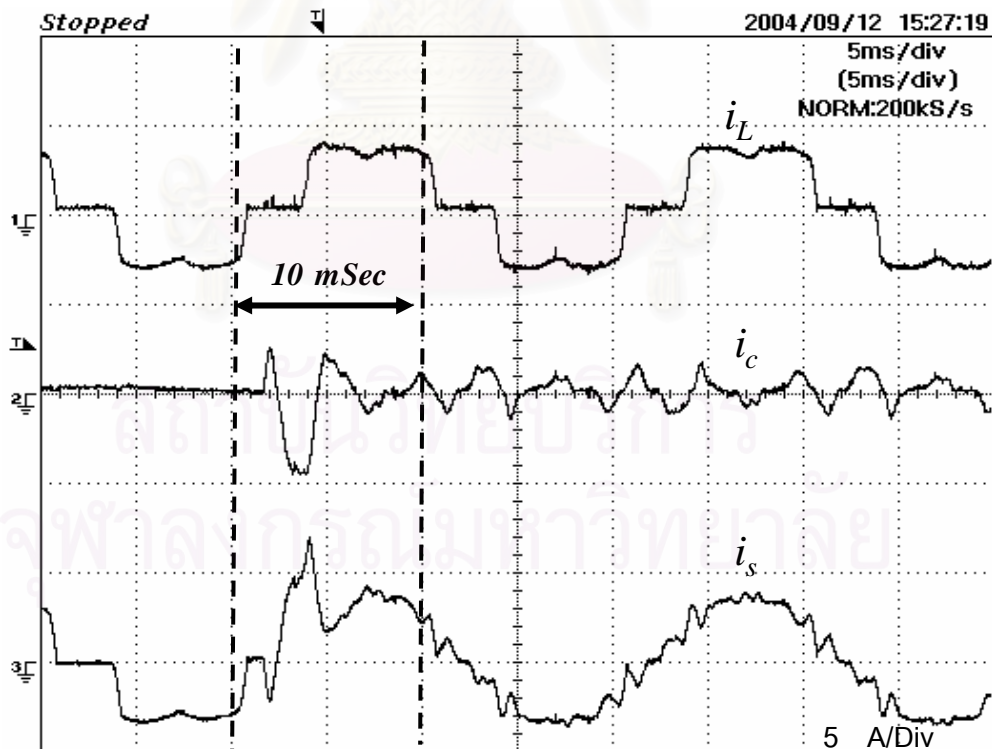
รูปที่ 5.36 ผลตอบสภาวะชั่วคราวสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันทีละ 2 อันดับ (อันดับที่ 5th & 7th)
เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบขึ้น



รูปที่ 5.37 ผลตอบสภาวะชั่วคราวสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันทีละ 2 อันดับ (อันดับที่ 5th & 7th)
เมื่อวงจรรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแส



รูปที่ 5.38 ผลตอบสภาวะชั่วคราวสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันทีละ 3 อันดับ (อันดับที่ 5th&7th&11th) เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบขึ้น



รูปที่ 5.39 ผลตอบสภาวะชั่วคราวสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกันทีละ 3 อันดับ (อันดับที่ 5th&7th&11th) เมื่อวงจรรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแส

5.3 สรุปผลการทดสอบ

วงจรรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่ายที่คิดมาจากการตรวจจับกระแสด้านโหลด ที่เลือกใช้ตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอพีทีและตัวตรวจจับกระแสแบบวิธีทำซ้ำที่สามารถลดรูปได้เป็นตัวอินทิเกรตได้ เมื่อมีการออกแบบวงจรรองแอกทีฟให้มีเสถียรภาพแล้ว ผลตอบสภาวะชั่วคราวให้ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวภายในหนึ่งคาบของความถี่หลักมูล ผลการทดลองแสดงให้เห็นวงจรรองสามารถให้ผลการทำงานที่ดีมาก สอดคล้องกับทฤษฎีคือ ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้อย่างแม่นยำ จึงทำให้วงจรรองแอกทีฟสามารถกำจัดฮาร์มิกได้ดี สามารถกำจัดเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ต้องการได้โดยไม่ทำให้ฮาร์มอนิกอันดับอื่นมีการเปลี่ยนแปลง และมีผลตอบสภาวะชั่วคราวที่รวดเร็ว



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่ายที่นำเสนอ ซึ่งพัฒนามาจากวงจรกรองที่ตรวจจับกระแสด้านโหลดที่มีความสมมูลกัน มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้าง และโดยการเลือกตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอพีที่และตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำทำให้ฟังก์ชันโอนย้ายของตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบรีเคอร์ซีฟดีเอพีที่และตัวควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำนั้นสามารถลดรูปเหลือเพียงตัวอินทิเกรตเพียงตัวเดียว ซึ่งเพิ่มความง่ายอย่างมากในการนำไปสร้างจริง ทั้งนี้ยังได้ออกแบบวงรอบการกำจัดฮาร์มอนิกโดยคำนึงถึงเสถียรภาพและสมรรถนะของระบบ ซึ่งหลังจากมีการวิเคราะห์เสถียรภาพแล้วพบว่าวงจรกรองแอกทีฟมีสมรรถนะที่ดี

ผลการทดลองได้ยืนยันถึงสมรรถนะของวงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย สามารถเลือกกำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ต้องการได้อย่างดี โดยจากผลการทดลองได้ทดลองกำจัดฮาร์มอนิกในอันดับที่สูงถึงอันดับที่ 19th เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกที่เหลือในระบบในกรณีที่กำลังที่ละ 1 อันดับ กับมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ได้ดังนี้

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกกรณีกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ

อันดับฮาร์มอนิก	ค่ากระแสแหล่งจ่าย (Arms)	ค่าตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ที่ 16 Arms (Arms)	กระแสฮาร์มอนิกเหลือที่แหล่งจ่าย (Arms)	กระแสฮาร์มอนิกเหลือที่แหล่งจ่ายเปรียบเทียบมาตรฐาน (Arms)
5 th	3.53	1.14	0.042	0.1903
7 th	3.52	0.77	0.026	0.118
11 th	3.44	0.33	0.05	0.23
13 th	3.48	0.21	0.026	0.119
17 th	3.44	0.13	0.045	0.21*
19 th	3.44	0.12	0.023	0.106

จากตารางที่ 6.1 เป็นการเปรียบเทียบค่าของฮาร์มอนิกที่เหลืองที่คำนวณได้เมื่อเปรียบเทียบเป็นสัดส่วนกับค่ากระแส 16 Arms ของมาตรฐาน IEC 61000-3-2 แล้วพบว่า ค่ากระแสฮาร์มอนิกเหลืองที่แหล่งจ่ายมีค่าไม่เกินมาตรฐาน แต่ยังมีฮาร์มอนิกอันดับสูงบางอันดับที่ยังมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน(อันดับที่ 17th) ทั้งนี้เนื่องจากขีดจำกัดทางด้านฮาร์ดแวร์ของตัวตรวจจับกระแส นั่นก็คือรับกระแสได้สูงสุด 5 A(peak) ทำให้ได้แรงดันก่อนเข้าบอร์ดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 10 บิต สูงสุด 2.25 Volt ซึ่งเมื่อแปลงสัญญาณ 2.25 Volt เป็นค่าทางดิจิทัลแล้วจะได้เป็นตัวเลขเท่ากับ 460 แต่ที่ค่ากระแสน้อยๆ ที่ประมาณ 40 mA จะได้ค่าทางดิจิทัลเท่ากับ 8.18 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นค่าตัวเลขอยู่ที่บิตที่ 3 ของทั้งหมด 10 บิต จึงทำให้ตัวประมวลผลมองเห็นค่าที่น้อยมาก ซึ่งเปรียบเสมือนขนาดสัญญาณผิดพลาดก่อนเข้าตัวอินทิเกรตเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้ตัวอินทิเกรตหยุดทำงานจึงไม่สร้างแรงดันฮาร์มอนิกคำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์นั่นเอง

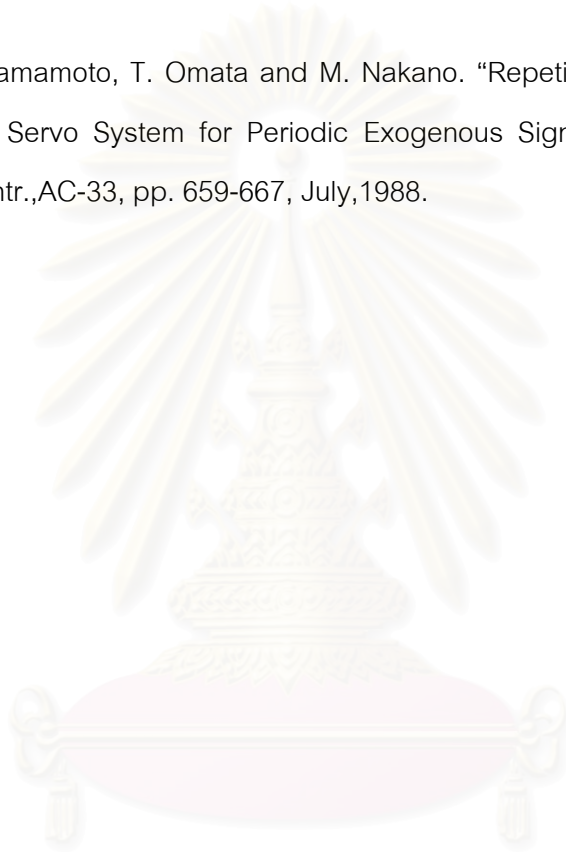
6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อจำกัดในการกำจัดฮาร์มอนิกของวิธีนี้จะเกิดจาก ข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของตัวประมวลผล โดยในวิทยานิพนธ์นี้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้พร้อมกันสูงสุด 3 อันดับเนื่องจาก ข้อจำกัดในการคำนวณของตัวประมวลผลเชิงดิจิทัล TMS320F243 ที่มีความเร็วของสัญญาณนาฬิกาเพียง 20 MHz โดยเลือกความถี่ในการสุ่มค่าสัญญาณที่ 10 kHz ซึ่งเป็นย่านความถี่การสุ่มค่าเพื่อที่จะคำนวณในการพิจารณากำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 19th และข้อจำกัดอีกอย่างหนึ่งของตัวประมวลผลนี้คือ ความละเอียดของตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความละเอียดเพียง 10 บิต ดังนั้นในปริมาณที่กระแสฮาร์มอนิกค่าน้อยๆ วงจรกรองแอกทีฟไม่สามารถจะตรวจจับฮาร์มอนิกได้เนื่องจากเมื่อแปลงเป็นเลขดิจิทัลแล้วจะเป็นเป็นค่าน้อยมาก ซึ่งทำให้ตัวควบคุมในซอฟต์แวร์มองไม่เห็นจึงไม่เกิดการสร้างกระแสชดเชย ทั้งนี้ข้อจำกัดเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยเลือกการใช้ตัวประมวลที่เร็วขึ้นและจำนวนบิตของตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความละเอียดมากขึ้น และในส่วนของ การควบคุมแบบวิธีนี้ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าสามารถนำไปใช้จริงได้ โดยที่ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้กับวงจรกรองแอกทีฟแบบ 3 เฟส 3 สาย ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรกรองแอกทีฟแบบ 3 เฟส 4 สาย และการกำจัดฮาร์มอนิกแบบกำจัดหมดทุกอันดับต่อไปได้

รายการอ้างอิง

- [1] กิติพจน์ สิทธิเลิศพิศาล. “วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับลดฮาร์มอนิกและรักษาระดับแรงดัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [2] สรรคธิพงษ์ ไชยิตเกษม. “วงจรรองกำลังแอกทีฟขนานแบบไฮบริดสำหรับกำจัดฮาร์มอนิก” วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2539.
- [3] สันต์ ศรีธรรมธำรง. “วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยรีคอร์ซีฟดีเอฟที” วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [4] สกฤตรัตน์ ศิริพันธ์โนน. “วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความเพี้ยนของกระแสด้านเข้าต่ำสำหรับแหล่งจ่ายไฟต่อเนื่อง” วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [5] ประจวบ บุญศรีรัมย์. “วงจรรองกำลังแอกทีฟขนานสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้รีคอร์ซีฟดีเอฟทีและการควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ” วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [6] ประจวบ เขียมสำอาง. “การปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบกระตุ้นตัวเองด้วยวงจรรองแอกทีฟ” วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [7] อนุชา หริรักษ์, สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, “วงจรรองแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่าย.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 25, หน้า 158-162, พฤษภาคม 2545
- [8] A. Salem nia and S.Saadate. “Digital Control Active Filter Suppressing Particular Harmonics: Numerical Simulation and Experimentation”. Proc. of ICHQP-Las Vegas , pp.632-36,1996.
- [9] F.Z.Peng , M. Kohata and H. Akagi. “Compensation Characteristic of Shunt Active and Series Active Filters” . Chinese-Japanese Power Electronics Conference , pp. 381-387, 1992.

- [10] H.Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae . “Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits” . Proc. of IPEC-Tokyo, pp.1375-1386, 1983.
- [11] N. Nanaumi, S. Kuramoti and M. Yano. “Comparision of Versatile Harmonics Current Compensation and Specific Harmonics Number Current Compensation” . Conf. Rec. of Japan IAS, pp. 407-410, 1996.
- [12] S. Hara, Y. Yamamoto, T. Omata and M. Nakano. “Repetitive Control System: A new type Servo System for Periodic Exogenous Signals” . IEEE Trans. on Autom. Contr.,AC-33, pp. 659-667, July,1988.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

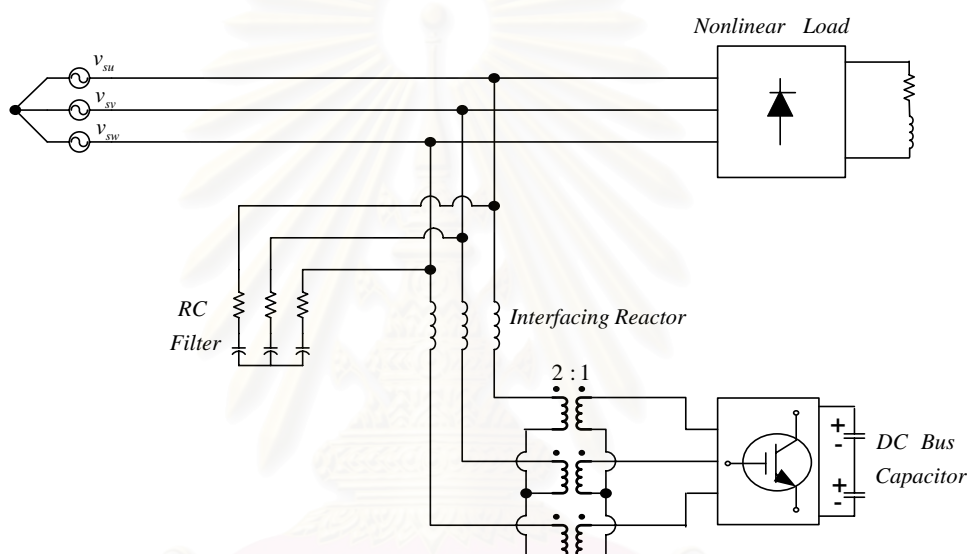


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ

ในภาคผนวก ก นี้จะกล่าวถึงโครงสร้างทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ สำหรับโครงสร้างโดยรวมของระบบสามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ ก.1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟและวงจรกรองพาสซีฟ R-C สำหรับกรองระลอกคลื่นการสวิตช์จะต่อขนานอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด ในส่วนของวงจรกรองแอกทีฟเราจะอาศัยตัวเหนี่ยวนำขนาด 7 mH ร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงแรงดัน(7.8 mH) หนึ่งเฟส 3 ตัว เป็นอิมพีแดนซ์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า



รูปที่ ก.1 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน 3 เฟส 3 สาย

โครงสร้างโดยรวมของระบบจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้คือ

1. ส่วนของระบบกำลัง
2. ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์
3. ส่วนภาคการตรวจจับสัญญาณต่างๆ และส่วนควบคุม

สำหรับรายละเอียดแต่ละส่วนของวงจรมานั้น เราจะทำการพิจารณาแยกเป็น 2 ส่วนคือส่วนของฮาร์ดแวร์และส่วนของซอฟต์แวร์ ดังจะได้อธิบายถึงในหัวข้อต่อไป

ก.1 ฮาร์ดแวร์ของระบบ

ก.1.1 ส่วนของระบบกำลัง

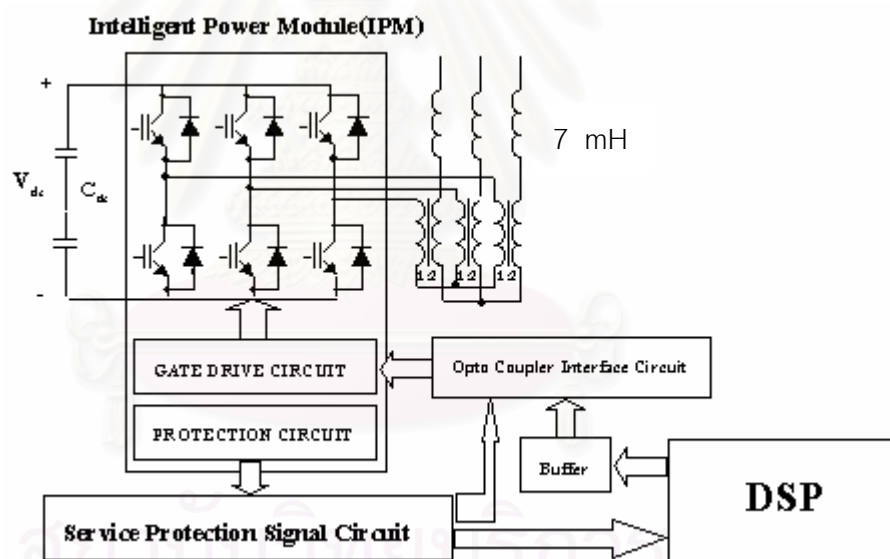
- วงจรกรองพาสซีฟ R-C สำหรับกรองระลอกคลื่นการสวิตช์ประกอบด้วยความต้านทานขนาด 125Ω จำนวน 3 ตัวและตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด $2.7 \mu F$ จำนวน 3 ตัว

- โหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส ขนาด 1.5 kVA 1 ชุด ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน 70Ω และตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 mH

ก.1.2 ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์

รายละเอียดของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ ก.2 โดยมีส่วนต่างๆ ดังนี้คือ

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



รูปที่ ก.2 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์และส่วนวงจรควบคุมของวงจรรองแยกที่ฟ

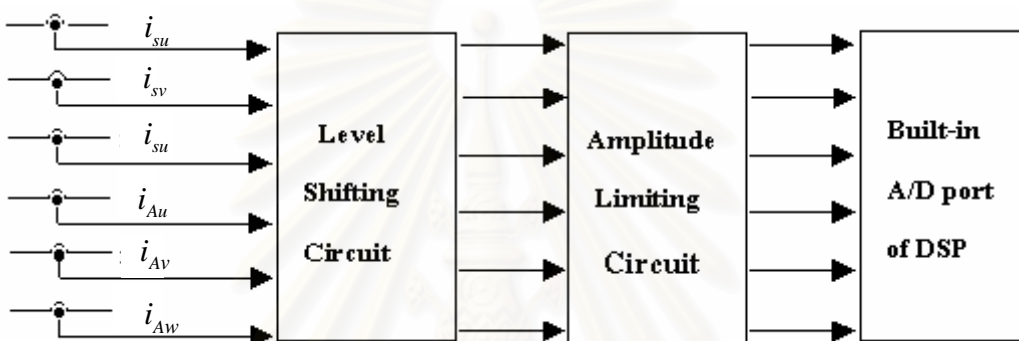
ก.1.3 ส่วนการตรวจจับสัญญาณต่างๆ และส่วนควบคุม

วงจรในส่วนนี้จะแยกเป็น 3 ภาค คือภาคการตรวจจับสัญญาณ ภาคการควบคุมและภาคการป้องกัน

ก.1.3.1 ภาคการตรวจจับสนญาณต่างๆ ประกอบด้วย

ก) ส่วนตรวจจับสนญาณกระแส

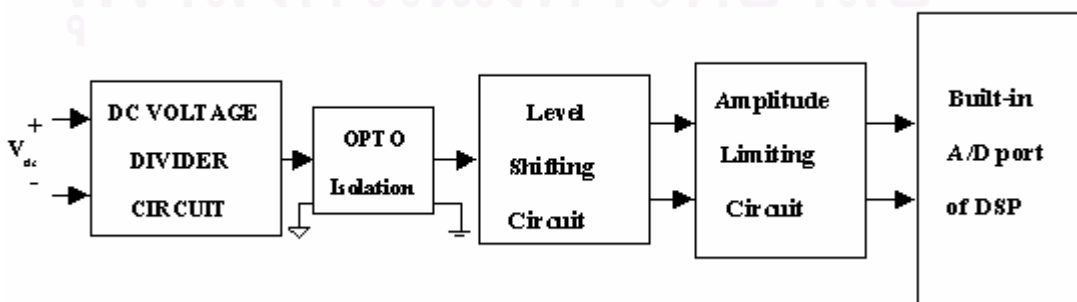
ส่วนนี้ตรวจจับสนญาณกระแสในระบบเพื่อใช้ในการคำนวณหาฮาร์มอนิกและเพื่อใช้ในการควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์ โดยจะทำการตรวจจับสนญาณทั้งหมด 6 จุด ดังแสดงในรูปที่ ก.3 ชุดตรวจจับสนญาณ จะทำการวัดกระแสทางด้านแหล่งจ่ายและกระแสที่จ่ายโดยอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 เฟส โดยใช้ตัวตรวจจับสนญาณตรง (DC-CT) ค่ากระแสที่วัดได้จะถูกนำไปปรับระดับและจำกัดขนาดก่อนจะถูกส่งไปยังพอร์ตของตัวประมวลผลดิจิทัล ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล



รูปที่ ก.3 ส่วนตรวจจับสนญาณกระแส

ข) ส่วนตรวจจับสนญาณแรงดันบัลไฟตรง

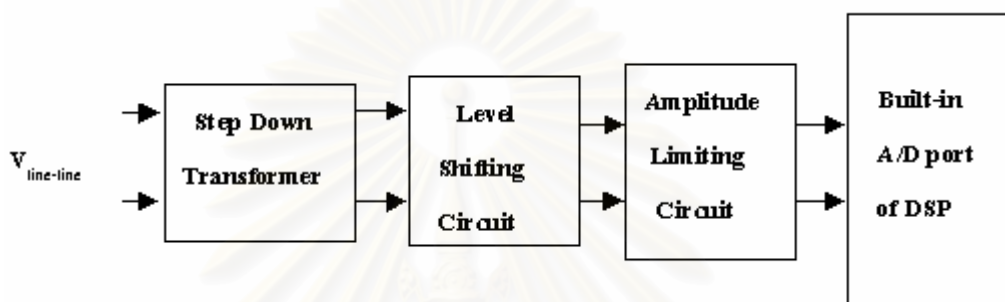
อินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นชนิดที่ไม่ต้องใช้ส่วนป้อนแรงดันบัลไฟตรงและจะมีการตรวจจับสนญาณแรงดันบัลไฟมาใช้ในการควบคุมการสร้างแรงดัน ส่วนการตรวจจับสนญาณแรงดันบัลไฟตรงจะทำโดยการรับค่าแรงดันบัลไฟตรงมาทำการทอนระดับแรงดันให้มีค่าระดับแรงดันที่ต่ำลง จากนั้นทำการแยกโดดทางไฟฟ้าด้วย opto isolator ค่าที่ได้จะนำไปปรับระดับและจำกัดขนาดก่อนจะถูกส่งไปยังพอร์ตของ DSP ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลดังแสดงในรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 วงจรตรวจจับสนญาณแรงดันบัลไฟตรง

ค) ส่วนตรวจจับแรงดันไฟสลับ

เราจะทำการวัดแรงดันไฟสลับระหว่างสาย ($V_{line-line}$) จำนวน 2 จุดคือ แรงดันไฟสลับระหว่างเฟส U-V และแรงดันไฟสลับระหว่างเฟส V-W โดยการวัดแรงดันผ่านหม้อแปลง ซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันให้ต่ำลงแล้วยังเป็นตัวแยกโดดทางไฟฟ้าระหว่างวงจรภาคไฟฟ้ากำลังกับวงจรส่วนตรวจจับสัญญาณ ค่าที่ได้จะถูกนำไปปรับระดับและจำกัดขนาดก่อนจะถูกส่งไปยังพอร์ตของ DSP ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลดังแสดงในรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 วงจรตรวจจับแรงดันไฟสลับ

ก.1.3.2 ภาคการควบคุม

ส่วนนี้ประกอบด้วยบอร์ด DSP TMS320F243 จำนวน 1 บอร์ดซึ่งจะรับค่ากระแสและแรงดันที่ตรวจจับได้แล้วนำไปคำนวณหาค่าแรงดันที่ต้องการแล้วสร้างออกมาเป็นสัญญาณ PWM เพื่อขับนำสวิตช์ของ IPM

ก.1.3.3 ภาคการป้องกัน

ในส่วนของภาคการป้องกันประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ

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

ก.2 ซอฟต์แวร์ของระบบ

ในส่วนซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการคำนวณแรงดันคำสั่งสำหรับอินเวอร์เตอร์เพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกนั้น เราสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมภาพรวมของการตรวจจับและการควบคุมได้ดังรูปที่ ก.6 ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 4 ส่วนหลักๆ ดังนี้

ก.2.1 ส่วนวงรอบกระแสหลักมูล

ส่วนวงรอบกระแสหลักมูลจะเริ่มจากการตรวจจับกระแสของวงจรกรองแอกทีฟ (iA_u, iA_v, iA_w) ทั้งสามเฟสเข้ามาทำการแปลงเป็นกระแสในรูปแบบของสเปซเวกเตอร์ ($i_{A\alpha}, i_{A\beta}$) ซึ่งกระแสสเปซเวกเตอร์จะถูกนำไปใช้สองส่วนต่อไปนี้คือ

- สเปซเวกเตอร์ของกระแสวงจรกรองแอกทีฟที่นำไปคูณกับตัวชดเชย K_c โดยผลคูณที่ได้จะเป็นค่าแรงดัน ซึ่งกำหนดให้เป็น vK_c_a, vK_c_b โดยแรงดันนี้จะถูกนำไปลบกับแรงดันที่คำนวณได้จากส่วนการคำนวณหาแรงดันฮาร์มอนิก

- สเปซเวกเตอร์ของกระแสวงจรกรองแอกทีฟที่นำไปทำการอินทิเกรตบนแกนหมุน โดยเริ่มจากนำกระแส $i_{A\alpha}, i_{A\beta}$ ไปทำการหมุนแกนที่ความถี่หลักมูล (50Hz) โดยการนำไปคูณกับฟังก์ชัน $e^{-j\omega t}$ ผลคูณที่ได้เป็นกระแสสเปซเวกเตอร์บนแกนหมุน (i_{Ad}, i_{Aq}) โดยกระแสบนแกนอ้างอิงหมุน d จะถูกนำไปลบกับค่ากระแสคำสั่ง i_DC^* (ได้จากตัวควบคุมแบบ PI ที่ควบคุมระดับแรงดันของบัสไฟตรงให้คงที่) ผลลบที่ได้กำหนดให้เป็น iA_DC หลังจากนั้นจะนำค่ากระแส iA_DC, i_{Aq} ไปคูณกับอัตราขยาย KI' แล้วนำไปอินทิเกรตจะได้เป็นแรงดันบนแกนหมุน vA_d, vA_q โดยจะมีการจำกัดค่าไม่ให้เกิดการอินทิเกรตมีค่าสูงจนเกินไป จากนั้นนำค่าแรงดันบนแกนหมุน vA_d, vA_q ไปคูณกับฟังก์ชัน $e^{j\omega t}$ จะได้เป็นแรงดันสเปซเวกเตอร์บนแกนอ้างอิงนิ่ง vA_a, vA_b ที่จะนำไปลบกับแรงดันที่คำนวณได้จากส่วนการคำนวณหาแรงดันฮาร์มอนิก

ก.2.2 ส่วนคำนวณหามุม θ

ส่วนคำนวณหามุม θ นั้นทำได้โดยการจับแรงดันสายของแหล่งจ่าย us_uv, us_vw ไปผ่านการคำนวณแบบสเปซเวกเตอร์ซึ่งจะทำให้ได้แรงดัน us_a, us_b นำไปใช้ในการคำนวณแบบเฟสล็อกคูล์ปที่จะได้ค่ามุม θ ไปใช้อ้างอิงการในการหมุนแกนและการจ่ายแรงดันชดเชยที่มีเฟสสอดคล้องกับเฟสของแหล่งจ่าย

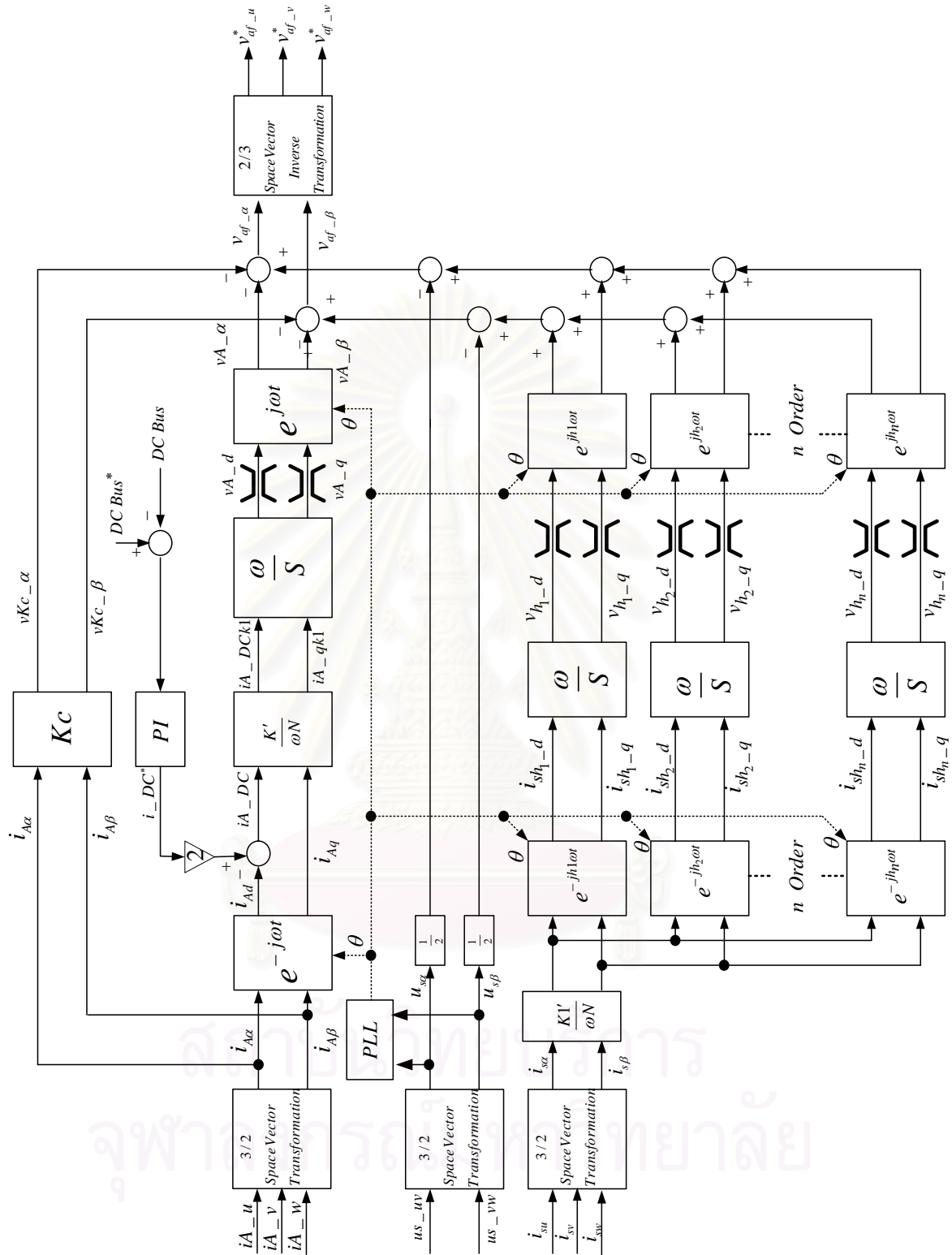
ก.2.3 ส่วนคำนวณหาแรงดันคำสั่งฮาร์มอนิก

ในส่วนการคำนวณหาแรงดันคำสั่งฮาร์มอนิกจะเริ่มจากการตรวจจับค่ากระแสแหล่งจ่าย

i_{su}, i_{sv}, i_{sw} นำไปคำนวณเป็นสเปซเวกเตอร์ได้เป็นกระแส $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ หลังจากนั้นนำไปคูณกับฟังก์ชัน $e^{-j\omega t}$ ซึ่งจะทำให้ได้เป็นกระแสฮาร์มอนิกบนแกนอ้างอิงหมุน i_{sh_n-d}, i_{sh_n-q} ค่ากระแสที่ได้บนแกนหมุนนั้นจะนำไปอินทิเกรตซึ่งจะได้เป็นค่าแรงดันฮาร์มอนิก v_{h_n-d}, v_{h_n-q} ซึ่งหลังจากผ่านตัวจำกัดค่าแล้วค่าแรงดันฮาร์มอนิกจะถูกนำไปคูณกับฟังก์ชัน $e^{j\omega t}$ ซึ่งจะทำให้ได้แรงดันคำสั่งฮาร์มิกบนแกนอ้างอิง α, β ต่อไป โดยฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆ ก็ทำในทำนองเดียวกัน

ก.2.4 ส่วนคำนวณหาแรงดันคำสั่งอินเวอร์เตอร์

การคำนวณหาแรงดันคำสั่งอินเวอร์เตอร์จะนำค่าแรงดันที่คำนวณได้ในข้อ ก.2.1, ก.2.2 และ ก.2.3 มารวมกันซึ่งจะได้เป็นแรงดันคำสั่งฮาร์มอนิกสเปซเวกเตอร์ $v_{af-\alpha}, v_{af-\beta}$ หลังจากนั้นนำไปคำนวณกลับเป็นแรงดัน 3 เฟส $v_{af-u}^*, v_{af-v}^*, v_{af-w}^*$ ซึ่งจะเป็นแรงดันคำสั่งให้อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันจ่ายออกไป



รูปที่ ก.6 แผนภาพแสดงชุดพีแควร์ของระบบ

ภาคผนวก ข
การออกแบบส่วนควบคุมแรงดันไฟตรง

การออกแบบส่วนควบคุมแรงดันไฟตรงจะเริ่มพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

$$P_{charge} - P_{Loss} = V_{dc}(t)i_{dc}(t) = V_{dc}(t)C_{dc}(t)\frac{d(V_{dc}(t)^2)}{dt} = \frac{1}{2}C_{dc}\frac{d(V_{dc}(t)^2)}{dt} \quad (ข.1)$$

โดยที่ P_{charge} คือ กำลังงานที่ไหลเข้าอินเวอร์เตอร์

P_{loss} คือ กำลังสูญเสียต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์

$i_{dc}(t)$ คือ ค่ากระแสที่ไหลเข้าออกอินเวอร์เตอร์

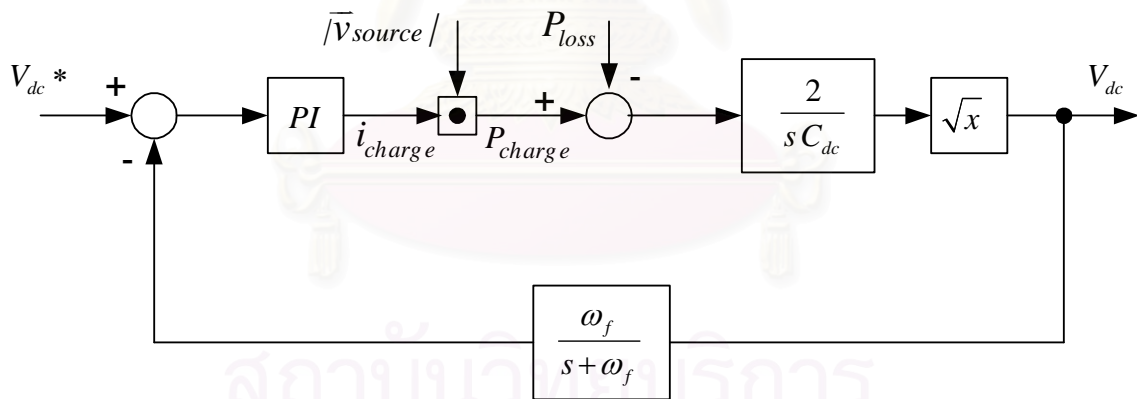
C_{dc} คือ ค่าตัวเก็บประจุไฟตรง

จากสมการที่ (ข.1)

$$P_{charge} - P_{loss} = \frac{1}{2}C_{dc}\frac{d(V_{dc}(t)^2)}{dt}$$

$$V_{dc}(t) = \left[\frac{2}{sC_{dc}}(P_{charge} - P_{loss}) \right]^{0.5} \quad (ข.2)$$

สมการที่ (ข.2) สามารถนำมาเขียนบล็อกไดอะแกรมเมื่อรวมส่วนตัวควบคุมแบบ PI และวงจรรองผ่านความถี่ต่ำเพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกไปจากระบบจะได้ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมแรงดันไฟตรง

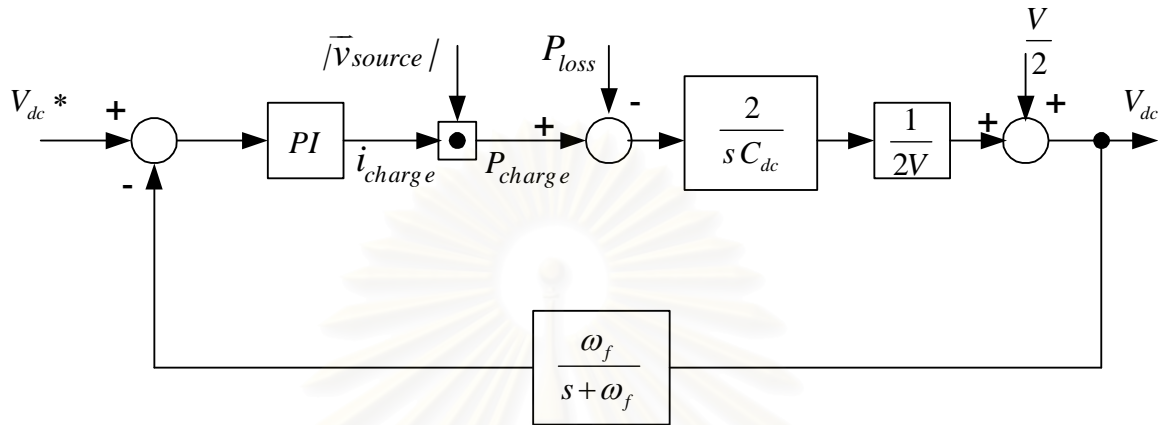
จากส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง จะเห็นได้ว่ามีส่วนของการถอดรากที่สอง ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้การออกแบบส่วนควบคุม PI มีความยุ่งยาก ดังนั้นจึงทำการแปลงส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้ไปอยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้น โดยจะทำการประมาณการถอดรากที่สองเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ณ จุดทำงานที่ $V_{dc} = V$ หรือ $x_0 = V^2$

$$y(x) = \sqrt{x} = \sqrt{x_0 + \Delta x} \approx \sqrt{x_0} + \frac{d\sqrt{x}}{dx} \Big|_{x=x_0} \Delta x$$

$$\square \sqrt{x_0} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} \square \Delta x \square \sqrt{x_0} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} (x - x_0)$$

$$\square V + \frac{1}{2V} (x - V^2) \square \frac{V}{2} + \frac{x}{2V} \quad (ข.3)$$

ดังนั้นเราจะได้บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัลไฟตรง หลังจากการประมาณการให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 แผนภาพของส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรงหลังจาก
ทำการประมาณรากที่สองให้เป็นเชิงเส้น

จากรูปที่ ข.2 สามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดได้ดังสมการที่ 4

$$GH(s) = \left(k_p + \frac{ki}{s}\right) \frac{2}{s C_{dc}} \frac{1}{2V} \frac{\omega_f}{s + \omega_f} |\vec{v}_{source}| \quad (ข.4)$$

โดยที่

$$|\vec{v}_{source}| = 381.05 \quad \text{Volt}$$

$$\omega_f = 314.16 \quad \text{rad/sec}$$

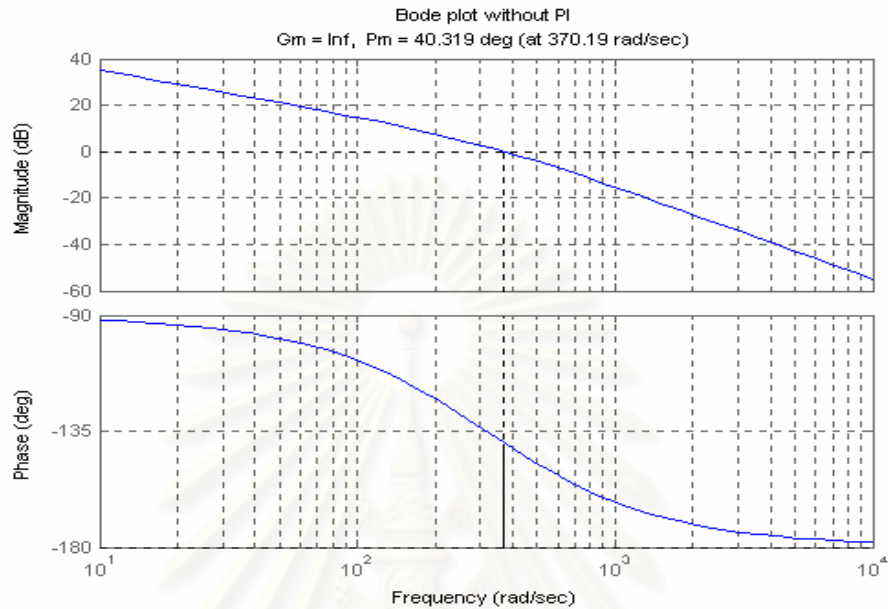
$$C_{dc} = 1900 \quad \mu F$$

$$V_{dc} = 350 \quad \text{Volt}$$

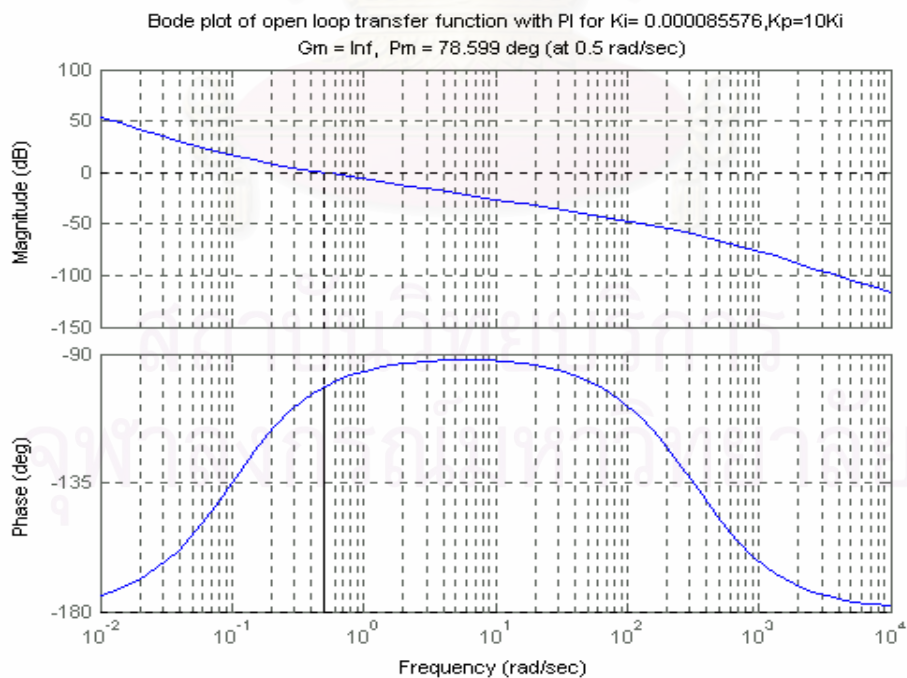
ถ้าพิจารณาในเรื่องของผลตอบสภาวะชั่วคราวแล้ว เราไม่ควรออกแบบให้วงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงมีความเร็วในการตอบสนองถึงย่านความถี่ของฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดเพราะจะทำให้กระแสฮาร์มอนิกนั้นไม่สามารถไหลเข้าไปในวงจรกรองได้ จากเหตุผลดังกล่าวจึงพิจารณาอันดับฮาร์มอนิกต่ำสุดที่ต้องการกำจัด ซึ่งถ้าพิจารณาความถี่หลักมูลซึ่งควมซึบเป็นกระแสฮาร์มอนิกแล้ว ดังนั้นคาบเวลาของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่ำสุดคือ 20 msec ดังนั้นผลตอบสภาวะชั่วคราวของแรงดันไฟตรงควรจะมากกว่า 20 msec โดยเลือกให้มากกว่า 100 เท่า ซึ่งจะทำให้ได้เวลาในการตอบสนอง 2 sec ซึ่งจะสัมพันธ์กับความถี่ตัดข้าม (Cross Over Frequency) $\omega_0 = 0.5 \text{ rad/sec}$ เมื่อนำไปวาดโบเดพล็อตจะได้ดังรูปที่ ข.3 ในการออกแบบค่าความถี่หัก

มุมของ PI ให้น้อยกว่าความถี่ตัดข้ามประมาณ 5 เท่า ดังนั้นจะได้ $\frac{k_i}{k_p} = 0.1$

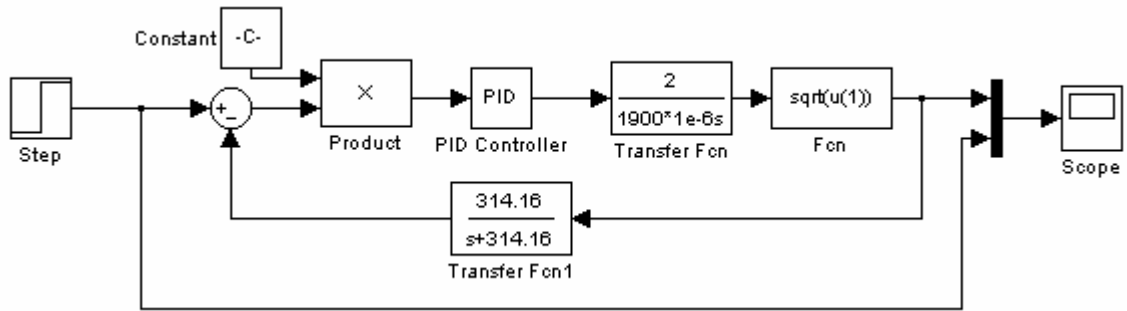
เพื่อให้ระบบมีช่วงปลอดภัยเชิงเฟสเพียงพอสำหรับเงื่อนไขเสถียรภาพในการควบคุมดังนั้นเราจะได้ว่า $k_p = 10k_i$ และ ณ จุดความถี่ตัดข้าม ω_0 จะได้ความสัมพันธ์ $|GH(j\omega_0)|=1$ แทนค่า $k_p = 10k_i$ ลงในสมการที่ (ข.4) จะได้ $k_i = 85.5 \times 10^{-6}$, $k_p = 0.0085576$ และเมื่อนำมาวาดโบเดพล็อตจะได้ดังรูปที่ ข.4 และเมื่อนำไปจำลองการทำงานจะได้ดังรูปที่ ข.5 และ ข.6



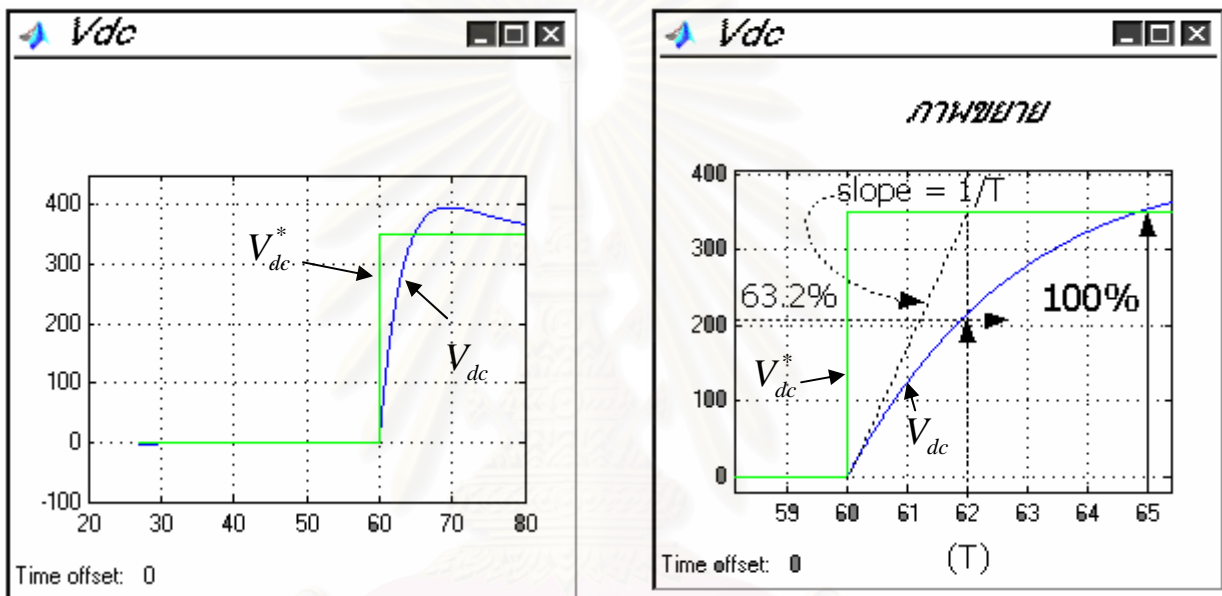
รูปที่ ข.3 โบเดพล็อตของระบบเมื่อยังไม่ได้ตัวชดเชยแบบ PI



รูปที่ ข.4 โบเดพล็อตของระบบหลังจากใส่ตัวชดเชยแบบ PI เมื่อ $k_i = 85.5 \times 10^{-6}$, $k_p = 0.0085576$



รูปที่ ข.5 แผนภาพการจำลองการทำงานโดย MATHLAB/SIMULINK



รูปที่ ข.6 ผลการจำลองการทำงาน เมื่อ $k_i = 85.5 \times 10^{-6}$, $k_p = 0.0085576$

จากรูปที่ ข.4 พบว่าส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรงมีช่วงความปลอดภัยเชิงเฟสที่เพียงพอ นั่นคือ มีค่าเท่ากับ 78.6° และเมื่อนำมาจำลองการทำงานจะทำให้มีผลตอบสนองต่อสภาวะชั่วคราวที่ 2 Sec เท่ากับ 63.2 % ของค่าแรงดันที่ออกแบบไว้ที่ 350 Volt จึงสามารถสรุปได้ว่าผลตอบสนองชั่วคราวของส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสอดคล้องกับค่าที่ได้ออกแบบไว้และมีเสถียรภาพ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อนุชา หริรัักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2543 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า(อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2544

ผลงานวิจัย

อนุชา หริรัักษ์ และ สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ "วงจรรองแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่าย" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25, หน้า 158-162, พฤศจิกายน 2545

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย