

รหัสโครงการวิจัย SUT-711-50-12-61



รายงานการวิจัย

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังไฮบริด  
(Harmonic Identification for Hybrid Power Filter)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังไฮบริด  
(Harmonic Identification for Hybrid Power Filter)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร. สราวุฒิ สุจิตจร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายชินพัฒน์ ชนะถาวรลักษณ์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2550

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการสนับสนุนงบประมาณการเข้าร่วมประชุมวิชาการนานาชาติ และขอบคุณคุณชินพัฒน์ ชนะถาวรลักษณ์ เป็นอย่างยิ่งในความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ มากมาย ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อำนวยความสะดวก ในการใช้ห้องปฏิบัติการ

ผู้วิจัย

กรกฎาคม 2552



## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีใหม่สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกใช้งานกับวงจรรอกกำลังไฮบริด เป็นการดำเนินงานวิจัยขยายผลจากงานวิจัยเดิมที่เป็นการพัฒนาวิธี DQF สำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในระบบสามเฟส งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีประยุกต์ SWFA บนองค์ประกอบ  $\alpha, \beta, 0$  หรือวิธี SVF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกให้กับวงจรรอกกำลังไฮบริดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้ทำการทดสอบการทำงานของอัลกอริทึมด้วยการจำลองผลและด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการ ระบบทดสอบมีโหลดเป็นชนิดแหล่งจ่ายกระแสไม่เชิงเส้น (current source nonlinear load, CSNL) ผลการจำลองพบว่าการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี SVF ให้ข้อมูลฮาร์มอนิกที่ถูกต้อง การชดเชยฮาร์มอนิกทำได้ดีเกือบสมบูรณ์แบบ ในผลการทดสอบพบว่าสามารถลดทอนฮาร์มอนิกในกระแสได้มากกว่าร้อยละ 80 ค่าเฉลี่ยของ %THDi รวมทั้งสามเฟสเมื่อโหลด CSNL เป็นวงจรเรียงกระแสและตัวต้านทาน หรือตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำเป็น 4.21 % และ 4.85 % ตามลำดับ ภายหลังจากชดเชยด้วยวงจรรอกกำลังไฮบริดที่ใช้วิธี SVF ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ตลอดจนฮาร์มอนิกของกระแสแต่ละอันดับ ถูกกำจัดไว้ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 เป็นอย่างดี

### Abstract

This research project proposes a new method for harmonic identification to be used with a hybrid power filter. The work is an extension of the previous work which originally proposed the DQF harmonic identification method for a 3-phase system. The newly proposed method is the application of the SWFA (sliding – window Fourier analysis) over the  $(\alpha, \beta, 0)$  components called shortly the SVF method for harmonic identification for a hybrid power filter. The algorithm has been tested against simulation and experiments in our laboratory. The load of the tested system is a CSNL. Simulation results indicate that SVF method provides accurate harmonic information, and the corresponding harmonic compensation achieved is almost perfect. Experimental results indicate that current harmonic in the tested system can be reduced to more than 80 % , the average of the %THDi for 3-phases, with the CSNLs having a 3-phase rectifier with Rs and RLs in connection, are 4.21 % and 4.85 % respectively , after compensation based on the SVF harmonic identification method . Additionally, each current harmonic order is limited well below that specified by the IEEE Std.519-1992.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	2
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ประเภทของวงจรกรองกำลัง	3
กล่าวนำ	3
2.1 วงจรกรองกำลังพาสซีฟ	3
2.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ	6
2.3 วงจรกรองกำลังไฮบริด	7
2.5 สรุป	11
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก	12
3.1 กล่าวนำ	12
3.2 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธี DQF	12
3.3 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังไฮบริด ด้วยวิธีประยุกต์SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$	15
3.4 สรุป	19
บทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก	20
4.1 กล่าวนำ	20
4.2 โครงสร้างของระบบทดสอบ	20
4.3 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังพาสซีฟ	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การจำลองสถานการณ์การจัดหาร่มอนิกสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ	25
4.5 การจำลองสถานการณ์การจัดหาร่มอนิกสำหรับวงจรรอกกำลังไฮบริดแบบที่ 1	26
4.6 การจำลองสถานการณ์การจัดหาร่มอนิกสำหรับวงจรรอกกำลังไฮบริดแบบที่ 2	27
4.7 อภิปรายผล	58
บทที่ 5 ผลการทดลองและการจัดหาร่มอนิก	60
5.1 กล่าวนำ	60
5.2 ผลทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว	60
5.3 ผลทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทาน ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ	64
5.4 สรุป	68
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	70
6.1 สรุป	70
6.2 ข้อเสนอแนะ	71
บรรณานุกรม	72
ประวัติผู้วิจัย	73

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 4.1 สรุปผลการจำลองสถานการณ์ทั้งก่อนและหลังการกำจัดฮาร์มอนิก โดยผลที่นำ เสนอเป็นค่า %THD <sub>i</sub> ในแต่ละเฟส และค่า %THD <sub>i</sub> เฉลี่ย (%THD <sub>i,ave</sub> )	55
ตาราง 4.2 สรุปผลการจำลองสถานการณ์ทั้งก่อนและหลังการกำจัดฮาร์มอนิก โดยแสดงค่า กระแส (I rms) และพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ (VA) ณ จุดต่างๆ	56
ตาราง 4.3 สรุปผลการจำลองสถานการณ์ทั้งก่อนและหลังการกำจัดฮาร์มอนิก โดยแสดงค่า %THD <sub>i</sub> ในแต่ละเฟส และค่า %THD <sub>i</sub> เฉลี่ย (%THD <sub>i,ave</sub> ) ค่ากระแส (I rms) และ พิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ (VA) ณ จุดต่างๆ	57
ตาราง 5.1 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแส สามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว	64
ตาราง 5.2 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแส สามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ	68





## สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงการกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริด	1
รูปที่ 2.1 (ก) วงจรกรองปรับคลื่นเดี่ยว, (ข) ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์กับความถี่	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างวงจรกรองผ่านสูงชนิดต่างๆ	5
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์กับความถี่ของวงจรกรองผ่านสูงอันดับสอง	6
รูปที่ 2.4 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนาน	7
รูปที่ 2.5 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบอนุกรม	7
รูปที่ 2.6 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนานผสมกับวงจรกำลังแยกที่ฟแบบขนานสำหรับการใช้งานกับโหลดชนิดแหล่งจ่ายกระแสอินเป็นต้นกำเนิดฮาร์โมนิก (CSNL)	7
รูปที่ 2.7 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรมผสมกับวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบอนุกรมสำหรับการใช้งานกับ โหลดชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่เป็นต้นกำเนิดฮาร์โมนิก(VSNL)	8
รูปที่ 2.8 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรมผสมกับวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนาน ใช้งานกับ โหลด CSNL	8
รูปที่ 2.9 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานผสมกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรม ใช้งานกับ โหลด VSNL	8
รูปที่ 2.10 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบอนุกรมผสมกับแบบขนาน ใช้งานกับ โหลด CSNL	8
รูปที่ 2.11 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานผสมกับแบบอนุกรม ใช้งานกับ โหลด VSNL	8
รูปที่ 2.12 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรมผสมกับแบบขนาน ใช้งานกับ โหลด CSNL	9
รูปที่ 2.13 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนานผสมกับแบบอนุกรม ใช้งานกับ โหลด VSNL	9
รูปที่ 2.14 การใช้วงจรกรองกำลังแยกที่ฟและพาสซีฟ ต่ออนุกรมกัน เพื่อใช้เป็นวงจรกรองกำลังไฮบริดแบบขนานสำหรับ โหลด CSNL	9
รูปที่ 2.15 การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟต่อขนานกับแยกที่ฟเพื่อใช้เป็นวงจรกรองไฮบริดแบบอนุกรมสำหรับ โหลด VSNL	9

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.15 รูปแบบที่ 1 สำหรับช่วยลดขนาดแรงดันมูลฐานของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	9
รูปที่ 2.17 รูปแบบที่ 1 สำหรับช่วยลดขนาดกระแสมูลฐานของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม	9
รูปที่ 2.18 รูปแบบที่ 2 สำหรับช่วยลดขนาดแรงดันมูลฐานของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	10
รูปที่ 2.19 รูปแบบที่ 2 สำหรับช่วยลดขนาดกระแสมูลฐานของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม	10
รูปที่ 2.20 รูปแบบที่ 3 สำหรับช่วยลดขนาดแรงดันมูลฐานของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	10
รูปที่ 2.21 รูปแบบที่ 3 สำหรับช่วยลดขนาดกระแสมูลฐานของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม	10
รูปที่ 2.22 รูปแบบที่ 4 สำหรับช่วยลดขนาดแรงดันมูลฐานของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	10
รูปที่ 2.23 รูปแบบที่ 4 สำหรับช่วยลดขนาดกระแสมูลฐานของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม	10
รูปที่ 3.1 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF	13
รูปที่ 3.2 แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_{0d}$ และ $A_{0q}$	14
รูปที่ 3.3 แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_h$ และ $B_h$	16
รูปที่ 3.4 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$	17
รูปที่ 3.5 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$	18
รูปที่ 3.6 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกนเลือกกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5	18
รูปที่ 3.7 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$ เลือกกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5 และ 7	18
รูปที่ 3.8 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$ เลือกกำจัดฮาร์มอนิกทุกอันดับที่ยกเว้นอันดับที่ 5	19

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบทดสอบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์	20
รูปที่ 4.2 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์ดดิสก์ สำหรับวงจรรอกกำลังพาสซีฟแบบขนานชนิดปรับคลื่น	23
รูปที่ 4.3 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์ดดิสก์ สำหรับวงจรรอกกำลังพาสซีฟแบบอนุกรม	24
รูปที่ 4.4 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์ดดิสก์ สำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ	26
รูปที่ 4.5 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์ดดิสก์ สำหรับวงจรรอกกำลังไฮบริดแบบที่ 1	27
รูปที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย	28
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังพาสซีฟที่กำจัดฮาร์ดดิสก์ เฉพาะอันดับที่ 5	29
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังพาสซีฟที่กำจัดฮาร์ดดิสก์ เฉพาะอันดับที่ 7	30
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังพาสซีฟที่กำจัดฮาร์ดดิสก์ เฉพาะอันดับที่ 5&7	31
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (DQF)	32
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$ )	33
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังไฮบริดกรณี 4.5.1	34
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังไฮบริดกรณี 4.5.2	35
รูปที่ 4.14 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังไฮบริดกรณี 4.5.3	36
รูปที่ 4.15 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังไฮบริดกรณี 4.5.4	37
รูปที่ 4.16 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังไฮบริดกรณี 4.5.5	38
รูปที่ 4.17 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังไฮบริดกรณี 4.5.6	39
รูปที่ 4.18 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังไฮบริดกรณี 4.5.7	40
รูปที่ 4.19 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรอกกำลังไฮบริดกรณี 4.5.8	41
รูปที่ 4.20 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์ดดิสก์ สำหรับวงจรรอกกำลังไฮบริดแบบที่ 2	42
รูปที่ 4.21 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรองกำลังพาสซีฟกรณีที่ 1	44
รูปที่ 4.23 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรองกำลังพาสซีฟกรณีที่ 2	45
รูปที่ 4.24 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรองกำลังพาสซีฟกรณีที่ 3	46
รูปที่ 4.25 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรองกำลังแอกทีฟ (DQF)	47
รูปที่ 4.26 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรองกำลังแอกทีฟ (SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$ )	48
รูปที่ 4.27 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรองกำลังไฮบริดโดยใช้วงจรรอง กำลังพาสซีฟกรณีที่ 1	49
รูปที่ 4.28 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรองกำลังไฮบริดโดยใช้วงจรรอง กำลังพาสซีฟกรณีที่ 2	50
รูปที่ 4.29 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรองกำลังไฮบริดโดยใช้วงจรรอง กำลังพาสซีฟกรณีที่ 3	51
รูปที่ 4.30 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรองกำลังไฮบริดโดยใช้วงจรรอง กำลังพาสซีฟกรณีที่ 1	52
รูปที่ 4.31 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรองกำลังไฮบริดโดยใช้วงจรรอง กำลังพาสซีฟกรณีที่ 2	53
รูปที่ 4.32 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรองกำลังไฮบริดโดยใช้วงจรรอง กำลังพาสซีฟกรณีที่ 3	54
รูปที่ 5.1 ระบบที่ใช้ทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกของงานวิจัย	60
รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว	61
รูปที่ 5.3 รูปสัญญาณกระแสชดเชยที่ได้จากวงจรรองกำลังแอกทีฟ กรณีโหลดเป็น วงจรเรียงกระแสต่อกับโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว	62
รูปที่ 5.4 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเฟส $u$ ก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดของวงจร เรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว	62
รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทาน ค่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ	65
รูปที่ 5.6 รูปสัญญาณกระแสชดเชยที่ได้จากวงจรรองกำลังแอกทีฟ กรณีโหลด เป็นวงจรเรียงกระแสต่อกับโหลดความต้านทานค่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ	66

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.7 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเฟส $n$ ก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดของวงจร เรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ	66

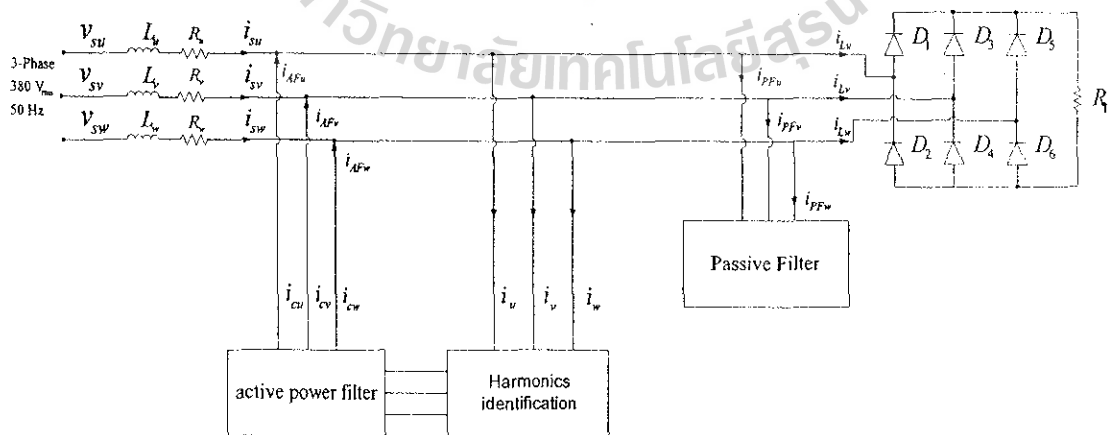


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ได้นำเทคโนโลยีคอนเวอร์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย ดังเช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ การหลอมโลหะ อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น คอนเวอร์เตอร์มีบทบาทสำคัญในการแปลงพลังงานเนื่องจากคอนเวอร์เตอร์ทำงานโดยใช้อุปกรณ์สวิตชิงกำลัง จึงก่อให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า ฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือได้ว่าเป็น “มลพิษ” ในระบบไฟฟ้า และทำให้เกิดผลเสียหลายประการ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยส่วนหนึ่งทางด้านไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน จึงมุ่งเน้นการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก ดังเช่น การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ และการใช้วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ประกอบด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟและแอกทีฟ ส่วนใหญ่มีโครงสร้างทางระบบดังรูปที่ 1.1 วงจรกรองกำลังไฮบริดได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากวงจรกรองกำลังดังกล่าวเป็นการผสมผสานข้อดีระหว่างวงจรกรองกำลังพาสซีฟ และวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยต้นทุนของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพียงอย่างเดียวนั้นมีต้นทุนสูง แต่เนื่องจากนำวงจรกรองกำลังพาสซีฟเข้ามาช่วยทำให้พิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอกทีฟลดลง ทำให้ต้นทุนในการผลิตจึงลดลงด้วย ส่วนปัญหาในเรื่องของการเกิดเรโซแนนซ์ของวงจรกรองกำลังพาสซีฟก็ได้วงจรกรองกำลังแอกทีฟเข้ามาช่วยแก้ไข จึงทำให้วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ผสมวงจรทั้งสองนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกมากยิ่งขึ้น ในด้านการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกได้ใช้หลักงานวิจัยเรื่องวงจรกรองกำลังแบบแอกทีฟแบบใหม่ที่ใช้การตรวจวัดฮาร์มอนิกในเวลาจริง โดยนำการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี DQ axis with Fourier, DQF[1] มาพัฒนาให้ดีขึ้น โดยชุดกรองกำลังในการทดสอบภาคปฏิบัติยังคงเป็นระบบเดิมที่ใช้กับงานวิจัย DQF ข้างต้น



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อศึกษาค้น และพัฒนาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแบบไฮบริด
- เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการกำจัด “มลพิษ” ทางด้านฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า
- เพื่อสร้างต้นแบบวงจรกรองกำลังแบบไฮบริดที่กำจัดฮาร์มอนิกได้ตามมาตรฐาน IEEE Std519 - 1992

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- การวิเคราะห์ และแก้ปัญหาฮาร์มอนิก มุ่งเน้นที่การปรับแก้กระแสฮาร์มอนิก
- วงจรกรองกำลังแบบไฮบริดต้องกำจัดฮาร์มอนิกได้ตามมาตรฐาน IEEE Std519-1992
- การทดสอบวงจรกรองกำลังแบบไฮบริด ในการกำจัดฮาร์มอนิก ที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ตามวิธีการที่พัฒนา จะทดสอบกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว และโหลดที่มีความต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน ทั้งคอนเวอร์เตอร์และโหลดจัดเป็นกลุ่มโหลดแหล่งจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (Current Source Nonlinear Loads, CSNLs)

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

- สืบค้นข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแบบไฮบริด
- ศึกษาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF
- จำลองสถานการณ์การกำจัด ฮาร์มอนิกโดยใช้วิธี DQF สำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกโดยวงจรกรองกำลังแบบไฮบริดเป็นแบบอุดมคติ
- พัฒนาวงจรกรองพาสซีฟซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวงจรกรองกำลังแบบไฮบริด
- คัดแปลงวิธีการ DQF ให้เป็นแบบที่เหมาะสมกับการใช้ในวงจรกรองกำลังแบบไฮบริด
- สร้าง และทดสอบวงจรกรองกำลังแบบไฮบริดเพื่อให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้องค์ความรู้ใหม่ ด้านการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพ เพื่อใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแบบไฮบริด สำหรับกำจัดฮาร์มอนิกให้ได้ตามมาตรฐาน IEEE Std519-1992
- ได้ต้นแบบวงจรกรองกำลังไฮบริด เพื่อใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า โดยวงจรกรองดังกล่าวที่สร้างขึ้น ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกตามที่คณะวิจัยได้พัฒนาขึ้น โดยต้นแบบวงจรกรองกำลังแบบไฮบริดที่ได้ สามารถเป็นรากฐานการผลิตเชิงพาณิชย์ในอนาคตต่อไปได้
- บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ

- ผลที่ได้จากการวิจัย จะนำไปสอนนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า เพื่อให้เป็นแนวคิดสำหรับการวิจัยต่อไปในอนาคต นอกจากนี้ทางคณะวิจัยได้เตรียมการจัดอบรม สำหรับวิศวกรหรือบุคลากร ตามโรงงานอุตสาหกรรมที่ประสบปัญหาเรื่องฮาร์โมนิก





## บทที่ 2

### ประเภทของวงจรกรองกำลัง

#### 2.1 กล่าวนำ

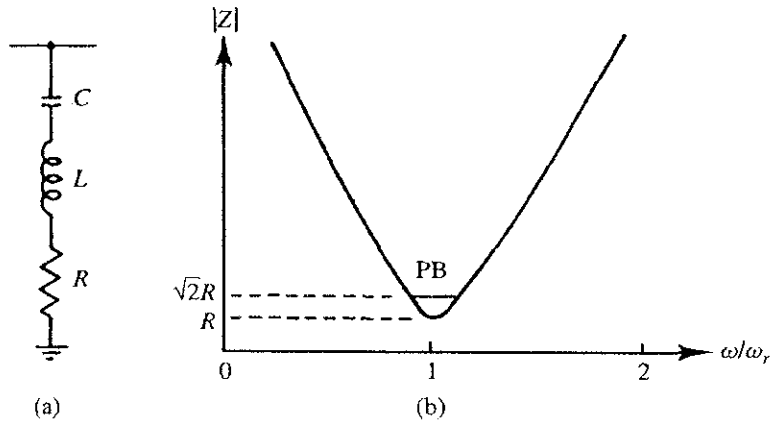
เทคโนโลยีอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้มีการพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านั้นมีการใช้อุปกรณ์เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ (power converters) อย่างหลากหลาย การทำงานของอุปกรณ์สวิตซิงภายในคอนเวอร์เตอร์ ก่อให้เกิดปัญหาทางฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ส่งผลให้ระบบเกิดกำลังสูญเสียมากขึ้นและตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำลง ตลอดจนการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆเกิดผิดพลาดได้ง่ายและอายุการใช้งานสั้นลง การควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นให้มีค่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานเป็นสิ่งจำเป็น แนวทางหนึ่งของการดำเนินงานเป็นการติดตั้งวงจรกรองกำลังซึ่งอาจใช้ วงจรกรองกำลังพาสซีฟ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ และวงจรกรองกำลังไฮบริด โดยวงจรกรองดังกล่าวมีโครงสร้าง หน้าที่ และสมรรถนะที่แตกต่างกันไปดังคำอธิบายรายละเอียดที่ปรากฏในบทนี้

#### 2.2 วงจรกรองกำลังพาสซีฟ[2]

การแก้ปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกตามปกติเริ่มต้นที่การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ เนื่องจากวงจรกรองกำลังดังกล่าวง่ายต่อการออกแบบและต้นทุนต่ำ แต่ข้อเสียของวงจรกรองกำลังพาสซีฟมีอยู่หลายประการด้วยกันได้แก่ ประสิทธิภาพของวงจรกรองขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะจะทำให้ฮาร์มอนิกเปลี่ยนไปด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกลดลง และอาจเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ในระบบได้ เนื่องจากวงจรกรองกำลังดังกล่าวใช้ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมาต่อร่วมกัน วงจรกรองกำลังพาสซีฟสามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

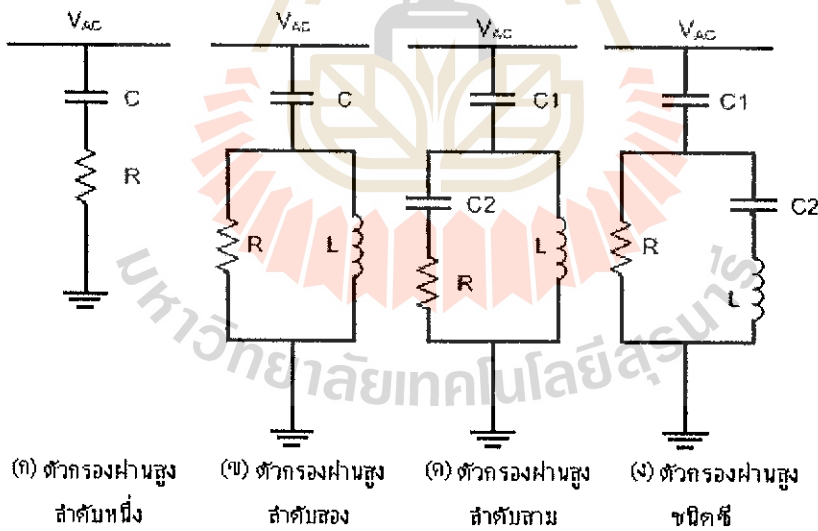
- วงจรกรองปรับคลื่นเดียว (single tuned filter) วงจรกรองชนิดนี้จะตั้งความถี่ปรับคลื่นหรือความถี่เรโซแนนซ์ที่จะใช้กรองฮาร์มอนิกไว้ค่าเดียว โดยวงจรกรองประกอบด้วย RLC ต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.1 (ก) วงจรกรองปรับคลื่นเดียว, (ข) ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์กับความถี่

- วงจรกรองผ่านสูงอันดับหนึ่ง (first order high pass filter) โดยปกติแล้ววงจรกรองชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เพราะมีข้อเสียคือ ตัวเก็บประจุที่ใช้จะมีค่ามากและกำลังงานสูญเสียที่ความถี่มูลฐานจะมีค่าสูง คูโครงสร้างวงจรกรองผ่านสูงอันดับหนึ่งได้จากรูปที่ 2.2(ก)

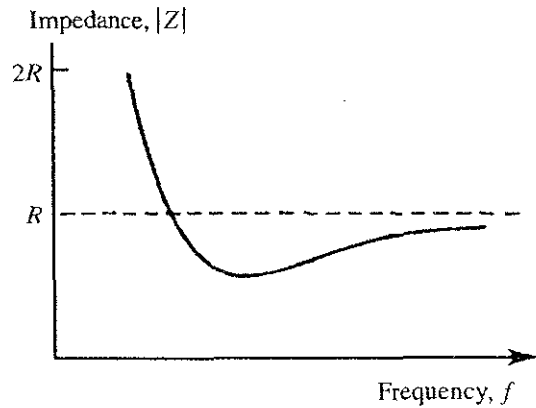


รูปที่ 2.1 (ก) วงจรกรองปรับคลื่นเดียว, (ข) ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์กับความถี่

- วงจรกรองผ่านสูงอันดับสอง (second order high pass filter) วงจรกรองผ่านสูงอันดับสองมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2(ข) ประกอบด้วยตัวต้านทานขนานกับตัวเหนี่ยวนำ และมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมอยู่ด้วย หลักการทำงานคล้ายกับวงจรกรองปรับคลื่นเดียว เพียงแต่วงจรกรองผ่านสูงลำดับสองจะทำการกรองฮาร์มอนิกที่ความถี่สูงกว่าความถี่ตัดทั้งหมด โดยมีลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์สัมพันธ์กับความถี่แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 โครงสร้างวงจรกรองผ่านสูงชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์กับความถี่ของวงจรกรองผ่านสูงอันดับสอง

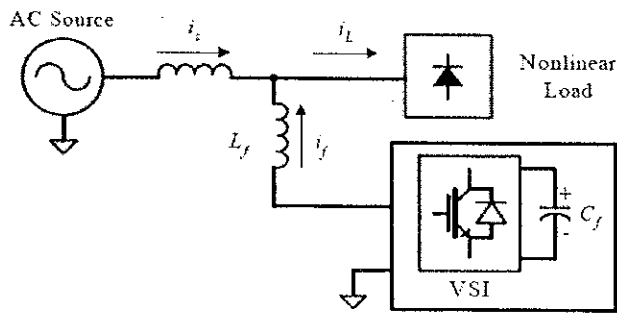
- วงจรกรองผ่านสูงอันดับสาม (third order high pass filter) แสดงโครงสร้างของวงจรกรองผ่านสูงอันดับสามดังรูปที่ 2.2(ค) มีกำลังงานสูญเสียน้อยกว่าวงจรกรองผ่านสูงอันดับสอง รวมถึงมีประสิทธิภาพการกรองที่ดีกว่า

- วงจรกรองผ่านสูงชนิดซี (C-type filter) แสดงโครงสร้างของวงจรกรองผ่านสูงชนิดซีดังรูปที่ 2.2(ง) มีกำลังงานสูญเสียน้อยกว่าวงจรกรองผ่านสูงลำดับสอง รวมถึงมีประสิทธิภาพการกรองที่ดีกว่าเช่นกัน

### 2.3 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ[3]

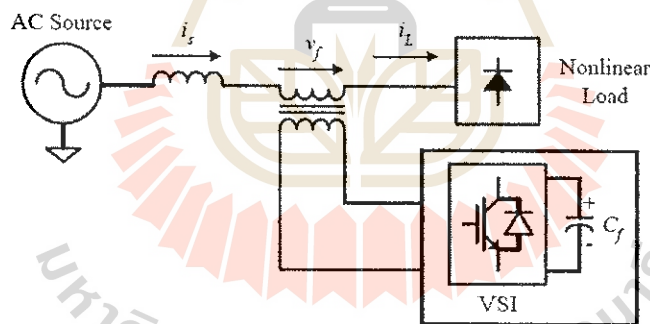
วงจรกรองกำลังแอกทีฟ ได้เข้ามามีบทบาทแทนที่วงจรกรองกำลังพาสซีฟ เนื่องจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายอีกทั้งวงจรกรองกำลังดังกล่าว ยังไม่มีผลทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ของระบบ แต่ข้อเสียของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ คือ มีราคาแพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีพิกัดสูง รวมถึงความยุ่งยากในการสร้างก็เป็นอุปสรรคที่สำคัญ วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

- วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (shunt active power filter) รูปแบบโครงสร้างของวงจรโดยทั่วไปประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์กำเนิดแรงดัน(voltage source inverter, VSI) ตัวเก็บประจุทำหน้าที่เป็นดีซีบัส ( $C_f$ ) อุปกรณ์สวิตช์ที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และตัวเหนี่ยวนำ ( $L_f$ ) ทำหน้าที่ฉุดกระแสชดเชยให้กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานดังรูปที่ 2.4 ทำหน้าที่กำจัดกระแสฮาร์มอนิกเป็นหลักโดยทำการฉุดกระแสชดเชยให้กับระบบ



รูปที่ 2.4 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

- วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม (series active power filter) รูปแบบโครงสร้างของวงจรโดยทั่วไปประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์กำเนิดแรงดัน (voltage source inverter, VSI) ตัวเก็บประจุทำหน้าที่เป็นดีซีบัค ( $C_f$ ) และอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็คทรอนิกส์กำลัง คล้ายกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานแต่ต่างกันตรงส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นตัวคู่ควมแรงดันที่จะนำไปชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกเป็นสำคัญ จากโครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมดังรูปที่ 2.5 แรงดันชดเชยฮาร์มอนิกจะเข้าไปเสริมหรือหักล้างให้แรงดันก่อนเข้าสู่โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นให้ได้รูปคลื่นสัญญาณเป็นขายนั่นเอง

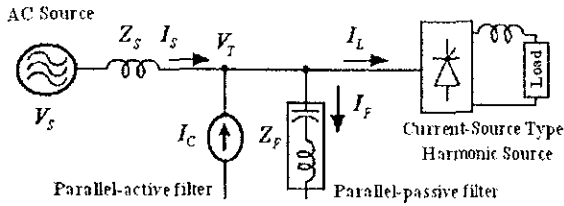


รูปที่ 2.5 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

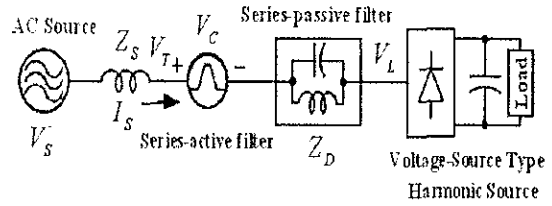
#### 2.4 วงจรกรองกำลังไฮบริด[4]

วงจรกรองกำลังไฮบริดเป็นวงจรกรองที่ผสมผสานวงจรกรองกำลังทั้งพาสซีฟและแอกทีฟเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกหรือประโยชน์ในด้านอื่นๆ โดยสามารถจัดแบ่งประเภทวงจรกรองกำลังไฮบริดตามลักษณะหน้าที่และโครงสร้างของวงจรได้ดังนี้

- โครงสร้างวงจรกรองกำลังไฮบริดที่ประกอบด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟและพาสซีฟ โดยเลือกที่จะกำจัดกระแสฮาร์มอนิกหรือแรงดันฮาร์มอนิกเพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง (รูปที่ 2.6 และ 2.7)

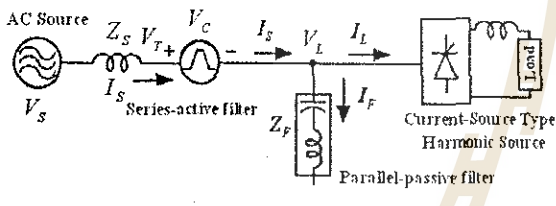


รูปที่ 2.6 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนานผสมกับวงจรกำลังแอคทีฟแบบขนานสำหรับการใช้งานกับโหลดชนิดแหล่งจ่ายกระแสเป็นต้นกำเนิดฮาร์โมนิก (CSNL)

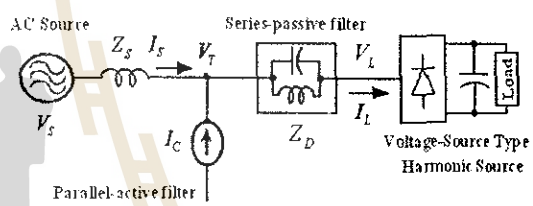


รูปที่ 2.7 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรมผสมกับวงจรกำลังแอคทีฟแบบอนุกรมสำหรับการใช้งานกับโหลดชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่เป็นต้นกำเนิดฮาร์โมนิก(VSNL)

- โครงสร้างวงจรกรองกำลังไฮบริดที่ประกอบด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟและพาสซีฟ โดยจะกำจัดฮาร์โมนิกทั้งกระแสและแรงดันฮาร์โมนิก (รูปที่ 2.8 และ 2.9)

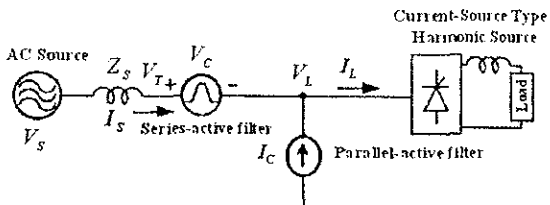


รูปที่ 2.8 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรมผสมกับวงจรกำลังแอคทีฟแบบขนานใช้งานกับโหลด CSNL

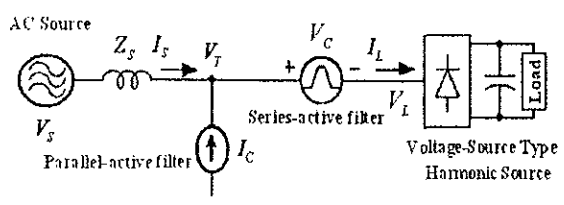


รูปที่ 2.9 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานผสมกับวงจรกำลังพาสซีฟแบบอนุกรมใช้งานกับโหลด VSNL

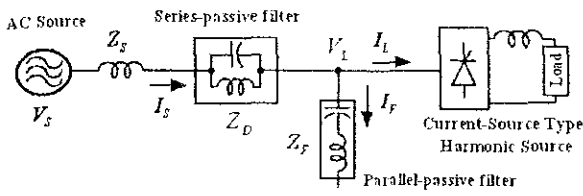
- โครงสร้างวงจรกรองกำลังไฮบริดที่ประกอบด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟหรือพาสซีฟเพียงอย่างเดียวโดยจะกำจัดฮาร์โมนิกทั้งกระแสและแรงดันฮาร์โมนิก (รูปที่ 2.10, 2.11, 2.12 และ 2.13)



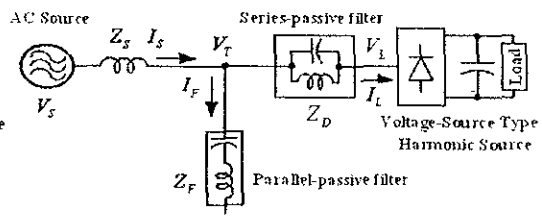
รูปที่ 2.10 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบอนุกรมผสมกับแบบขนานใช้งานกับโหลด CSNL



รูปที่ 2.11 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานผสมกับแบบอนุกรมใช้งานกับโหลด VSNL

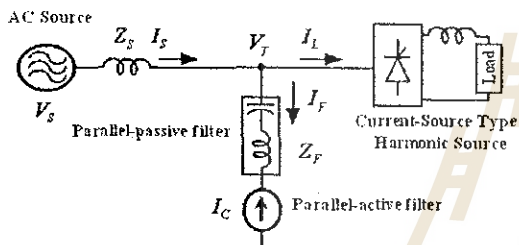


รูปที่ 2.12 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรมผสมกับแบบขนานใช้งานกับโหลด CSNL

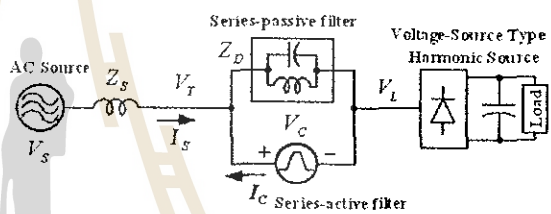


รูปที่ 2.13 วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนานผสมกับแบบอนุกรมใช้งานกับโหลด VSNL

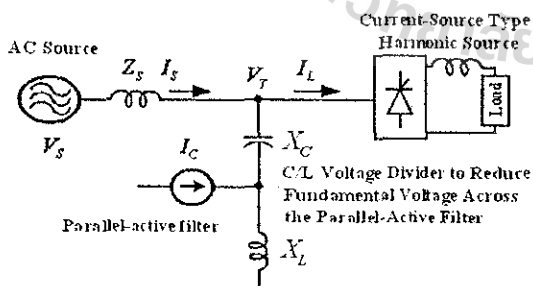
- โครงสร้างวงจรกรองกำลังไฮบริดที่ประกอบด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบต่างๆ เพื่อทำหน้าที่ลดแรงดันหรือกระแสที่มีความถี่มูลฐานให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟมีพิกัดกำลังไฟฟ้าลดลง (รูปที่ 2.14 – 2.23)



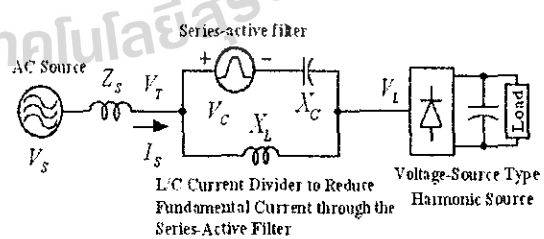
รูปที่ 2.14 การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟและพาสซีฟ ต่ออนุกรมกัน เพื่อใช้เป็นวงจรกรองกำลังไฮบริดแบบขนานสำหรับโหลด CSNL



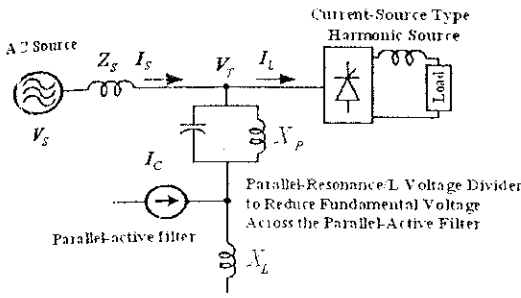
รูปที่ 2.15 การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟต่อขนานกับแอกทีฟเพื่อใช้เป็นวงจรกรองไฮบริดแบบอนุกรมสำหรับโหลด VSNL



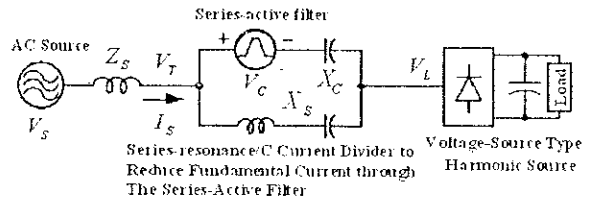
รูปที่ 2.16 รูปแบบที่ 1 สำหรับช่วยลดขนาดแรงดันมูลฐานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน



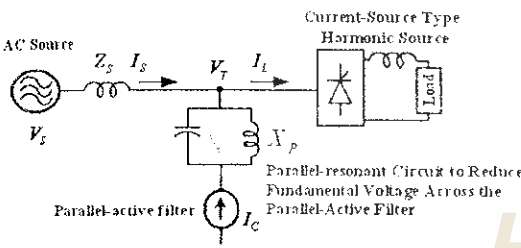
รูปที่ 2.17 รูปแบบที่ 1 สำหรับช่วยลดขนาดกระแสมูลฐานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม



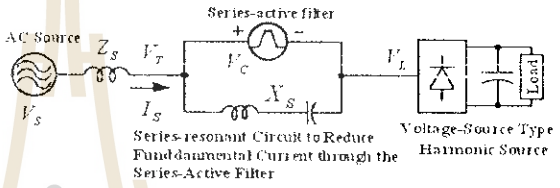
รูปที่ 2.18 รูปแบบที่ 2 สำหรับช่วยลดขนาดแรงดัน  
มูลฐานของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน



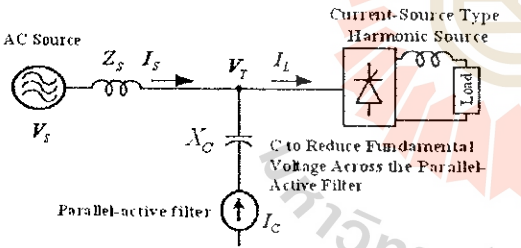
รูปที่ 2.19 รูปแบบที่ 2 สำหรับช่วยลดขนาด  
กระแสมูลฐานของวงจรรอกำลังแอกทีฟ  
แบบอนุกรม



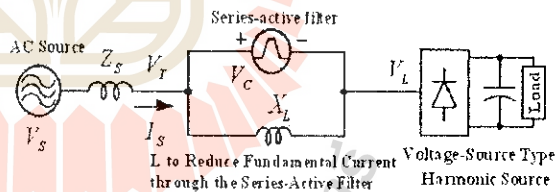
รูปที่ 2.20 รูปแบบที่ 3 สำหรับช่วยลดขนาดแรงดัน  
มูลฐานของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน



รูปที่ 2.21 รูปแบบที่ 3 สำหรับช่วยลดขนาด  
กระแสมูลฐานของวงจรรอกำลังแอกทีฟ  
แบบอนุกรม



รูปที่ 2.22 รูปแบบที่ 4 สำหรับช่วยลดขนาดแรงดัน  
มูลฐานของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน



รูปที่ 2.23 รูปแบบที่ 4 สำหรับช่วยลดขนาด  
กระแสมูลฐานของวงจรรอกำลังแอกทีฟ  
แบบอนุกรม

## สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการทบทวนโครงสร้างวงจรกรองกำลังชนิดต่างๆ และอธิบายหลักการ  
ทำงานของวงจรกรองกำลังชนิดต่างๆพอสังเขป ในกรณีของวงจรกรองกำลังไฮบริดที่อาศัย  
หลักการทำงานผสมผสานระหว่างวงจรกรองกำลังพาสซีฟและแอคทีฟ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพใน  
การชดเชยฮาร์มอนิก มีการใช้วงจรกำลังพาสซีฟแบบต่างๆช่วยลดขนาดของกระแสและแรงดันที่  
ความถี่มูลฐานเพื่อลดพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอคทีฟ และเพื่อให้ได้สมรรถนะการ  
ชดเชยฮาร์มอนิกที่ดีขึ้น โดยการอาศัยหลักการชดเชยฮาร์มอนิกทั้งแรงดันและกระแสไปพร้อมๆกัน





### บทที่ 3

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

### 3.1 กล่าวนำ

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก สำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า และจากการศึกษาวิจัยในอดีต พบว่า การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มด้วยกัน ได้แก่ การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ และการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกบางอันดับ เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยที่ปรากฏมาก่อนแล้ว เนื้อหาในบทนี้จึงเป็นการทบทวนอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธีการหมุนแกนประกอบกับวิธีฟูริเยร์ [5] ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วิธี DQF ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวใช้สำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ นอกจากนี้ บทนี้นำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ที่พัฒนาขึ้นที่เรียกว่า การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกำลังไฮบริดด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$

### 3.2 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟด้วยวิธี DQF

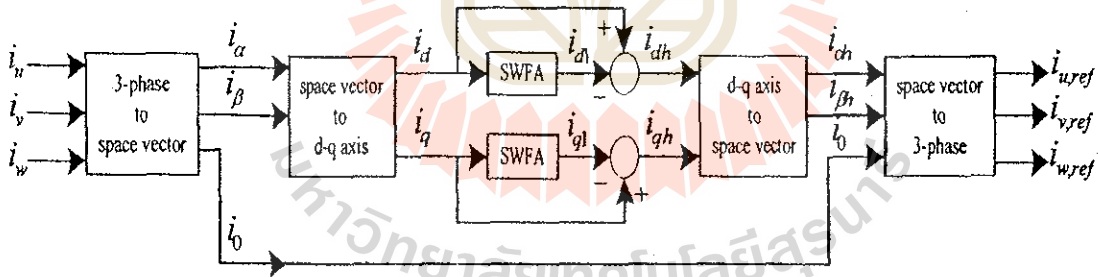
การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ในขั้นตอนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส คือ  $i_u, i_v$  และ  $i_w$  เป็นกระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์ ( $i_\alpha, i_\beta$  และ  $i_0$ ) ดังสมการที่ (3-1) ต่อจากนั้นแปลงค่ากระแสบนแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ( $i_\alpha$  และ  $i_\beta$ ) ไปอยู่บนแกนหมุน d-q ( $i_d$  และ  $i_q$ ) ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-2)

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

ในสมการดังกล่าว  $\omega$  เป็น ความถี่เชิงมุม (เรเดียน/วินาที) การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเพื่อต้องการทราบฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ จะกำหนดให้  $\omega$  เท่ากับความถี่มูลฐานของระบบ ด้วยวิธีนี้

เวกเตอร์กระแสไฟฟ้า  $i_d$  และ  $i_q$  จึงหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วที่มุมฐาน การคำนวณตามกระบวนการดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นของวิธี DQF ในช่วงแรกนี้จะเหมือนวิธี DQ [6] ทุกประการ และถ้าพิจารณาบนแกนหมุน d-q กระแสที่ความเร็วมุมฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรงในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสสลับ การแยกองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง ซึ่งเป็นกระแสที่ความเร็วมุมฐานออกจากองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับจะแตกต่างกันวิธี DQ ที่ใช้วงจรกรองผ่านสูง โดยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF จะแยกองค์ประกอบดังกล่าวโดยใช้หลักการของวิธี SWFA ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ซึ่งค่ากระแสความถี่มุมฐานที่ได้ มีความถูกต้องแม่นยำกว่าการใช้วงจรกรองผ่านสูง การใช้วิธี SWFA ในที่นี้เริ่มต้นจากการพิจารณาความสัมพันธ์ออยเลอร์-ฟูริเยร์ (Euler-Fourier formulas) ดังสมการที่ (3-3) ซึ่งมีองค์ประกอบสองเทอมคือ เทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง ( $A_0$ ) และเทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ ( $A_h$  และ  $B_h$ ) เมื่อกระแสที่ความเร็วมุมฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรง การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF จึงคำนวณเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์  $A_0$  เท่านั้น ซึ่งการคำนวณค่า  $A_0$  คำนวณได้จากการแทนค่า  $h=0$  ในสมการที่ (3-4) เพราะฉะนั้นจากรูปที่ 3.1 อาจสังเกตได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าหลักที่ความเร็วมุมฐานบนแกน d ( $i_{d1}$ ) และค่ากระแสไฟฟ้าที่ความเร็วมุมฐานบนแกน q ( $i_{q1}$ ) คำนวณได้จากสมการที่ (3-5) และ (3-6) ตามลำดับ ค่า  $A_{0d}$  และ  $A_{0q}$  โดยรับข้อมูลกระแส  $i_d$  และ  $i_q$  มาหนึ่งคาบ ซึ่งมีทั้งหมด  $N$  ข้อมูล มาคำนวณตามสมการที่ (3-7) และ (3-8)



รูปที่ 3.1 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF

$$i(kT) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega kT) + B_h \sin(h\omega kT)] \quad (3-3)$$

$$A_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(nT) \cos(nh\omega T) \quad (3-4)$$

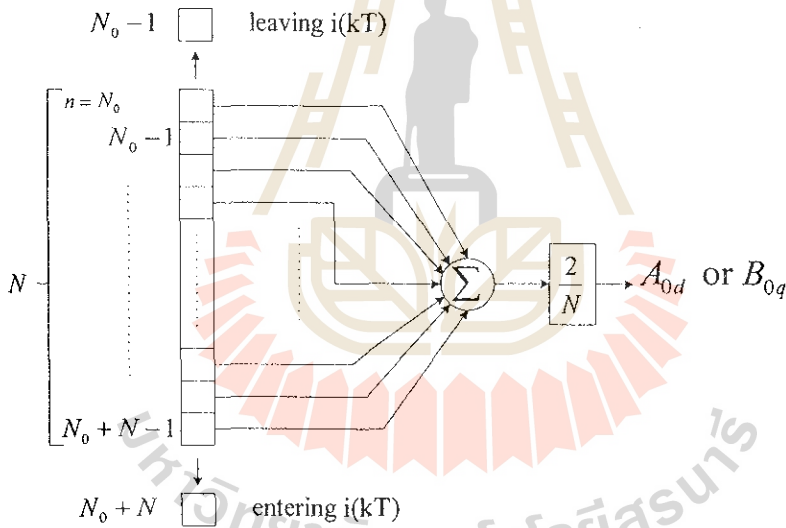
$$i_{d1}(kT) = \frac{A_{0d}}{2} \quad (3-5)$$

$$i_{q1}(kT) = \frac{A_{0q}}{2} \quad (3-6)$$

$$A_{0d} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_d(nT) \quad (3-7)$$

$$A_{0q} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_q(nT) \quad (3-8)$$

$$\begin{bmatrix} A_{0d}^{(new)} \\ A_{0q}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{0d}^{(old)} \\ A_{0q}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_d[(N_0-1)T] \\ i_q[(N_0-1)T] \end{bmatrix} + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_d[(N_0+N)T] \\ i_q[(N_0+N)T] \end{bmatrix} \quad (3-9)$$



รูปที่ 3.2 แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_{0d}$  และ  $A_{0q}$

หลังจากนั้นเก็บค่าดังกล่าวในรูปแบบของแถวลำดับดังรูปที่ 3.2 ส่วนในรอบการทำงานถัดไป เริ่มต้นจากการรับข้อมูลกระแส  $i_d$  และ  $i_q$  ค่าใหม่ ( $i_d(N_0+N)$ ) และ ( $i_q(N_0+N)$ ) และลบข้อมูลกระแส  $i_d$  และ  $i_q$  ค่าเก่า ( $i_d(N_0-1)$ ) และ ( $i_q(N_0-1)$ ) เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_{0d}$  ค่าใหม่ ( $A_{0d}^{(new)}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์  $A_{0q}$  ค่าใหม่ ( $A_{0q}^{(new)}$ ) ดังสมการที่ (3-9) โดยที่ ( $A_{0d}^{(old)}$ ) คือค่าสัมประสิทธิ์  $A_{0d}$  ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้า และ ( $A_{0q}^{(old)}$ ) คือค่าสัมประสิทธิ์  $A_{0q}$  ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้าเช่นกัน ซึ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_{0d}^{(new)}$  และ  $A_{0q}^{(new)}$  ใน

ทศรอบของการรับข้อมูลกระแส  $i_d$  และ  $i_q$  ค่าใหม่ทำให้ได้ค่ากระแส  $i_{d1}$  และ  $i_{q1}$  ในทศรอบของการคำนวณ โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับ  $T$  วินาที หลังจากทีคำนวณค่ากระแส  $i_{d1}$  และ  $i_{q1}$  ในแต่ละรอบแล้วนำค่าดังกล่าวไปหักลบกับค่ากระแส  $i_d$  และ  $i_q$  ดังสมการที่ (3-10) และ (3-11) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบบนแกนหมุน d-q ( $i_{dh}$  และ  $i_{qh}$ ) หลังจากนั้นแปลงค่ากระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d-q กลับไปเป็นกระแสฮาร์มอนิกบนแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ( $i_{ah}$  และ  $i_{bh}$ ) ดังสมการที่ (3-12) นำกระแส  $i_0$  กลับมาคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามเฟส ( $i_{u,ref}$ ,  $i_{v,ref}$  และ  $i_{w,ref}$ ) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (3-13)

$$i_{dh} = i_d - i_{d1} \quad (3-10)$$

$$i_{qh} = i_q - i_{q1} \quad (3-11)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

$$\begin{bmatrix} i_{u,ref} \\ i_{v,ref} \\ i_{w,ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

### 3.3 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังไฮบริดด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$

เมื่อต้องการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมด จากวิธี SWFA ดังเดิม [7] มีขั้นตอนที่สำคัญเป็นการคำนวณหากระแสที่ความถี่มูลฐานเพื่อนำไปหักลบออกจากค่ากระแสที่วัดได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก เพื่อจะได้กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ แต่ถ้าเป็นกรณีต้องการเลือกกำจัดกระแสฮาร์มอนิกเป็นบางอันดับหรือเฉพาะกลุ่ม จึงประยุกต์การคำนวณกระแสที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆ โดยสามารถดำเนินการดังนี้

ขั้นที่ 1 แปลงค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส คือ  $i_u$ ,  $i_v$  และ  $i_w$  เป็นกระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์ ( $i_\alpha, i_\beta$  และ  $i_0$ ) ดังสมการที่ (3.1)

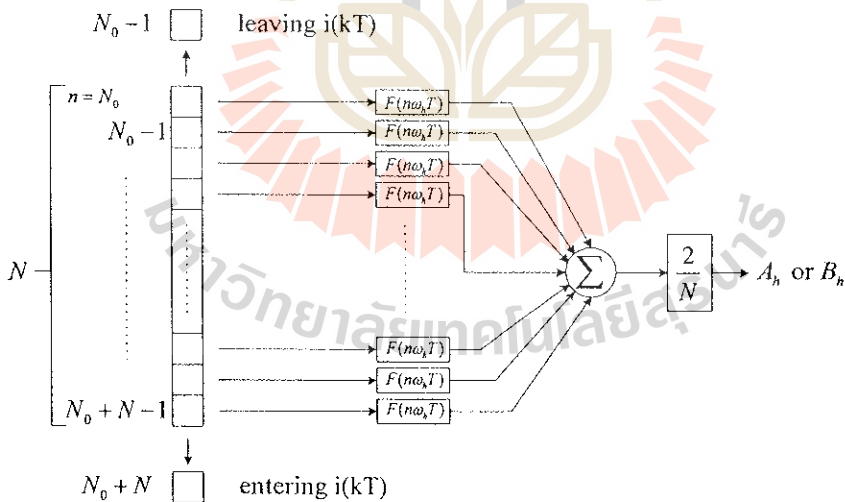
ขั้นที่ 2 นำเฉพาะกระแส  $i_\alpha, i_\beta$  คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์  $A_h$  กับ  $B_h$  ตามสมการที่ (3-15) และ (3-16) ตามลำดับ จึงสามารถคำนวณกระแสฮาร์มอนิกจากสมการที่ (3-14) แต่เปลี่ยนจากการพิจารณาที่ความถี่มูลฐานมาเป็นพิจารณาที่ความถี่ที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิก  $\omega \rightarrow \omega_h$

$$i_h(kT) = A_h \cos(\omega_h kT) + B_h \sin(\omega_h kT) \quad (3-14)$$

$$A_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(nT) \cos(n\omega_h T) \quad (3-15)$$

$$B_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(nT) \sin(n\omega_h T) \quad (3-16)$$

ค่าสัมประสิทธิ์  $A_h$  และ  $B_h$  ที่ได้จากการคำนวณในช่วงแรกนี้จะถูกเก็บเป็นข้อมูลในรูปแบบแถวลำดับดังรูปที่ 3.3 เพื่อกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA



รูปที่ 3.3 แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_h$  และ  $B_h$

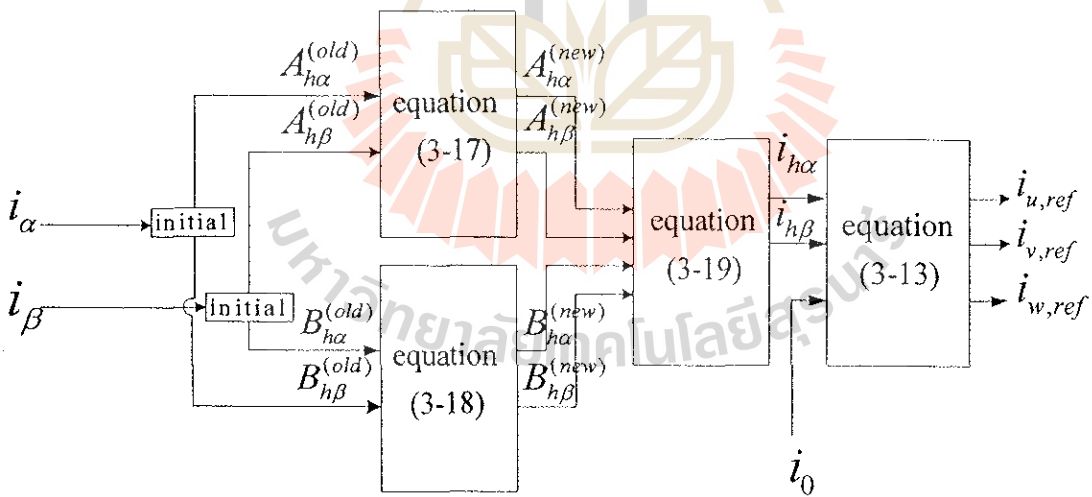
ขั้นที่ 3 เนื่องจากพิจารณาเฉพาะ  $i_\alpha, i_\beta$  จึงมีเพียงสองแกนที่ต้องคำนึงถึง การคำนวณดำเนินการตามสมการที่ (3-17) ถึง (3-19) แสดงเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ 3.4

$$\begin{bmatrix} A_{ha}^{(new)} \\ A_{h\beta}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ha}^{(old)} \\ A_{h\beta}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_\alpha [(N_0 - 1)T] \\ i_\beta [(N_0 - 1)T] \end{bmatrix} \cos[(N_0 - 1)\omega_h T] \\ + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_\alpha [(N_0 + N)T] \\ i_\beta [(N_0 + N)T] \end{bmatrix} \cos[(N_0 + N)\omega_h T] \quad (3-17)$$

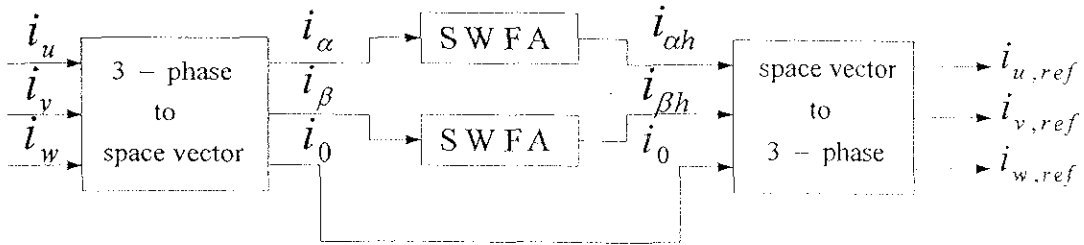
$$\begin{bmatrix} B_{ha}^{(new)} \\ B_{h\beta}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{ha}^{(old)} \\ B_{h\beta}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_\alpha [(N_0 - 1)T] \\ i_\beta [(N_0 - 1)T] \end{bmatrix} \sin[(N_0 - 1)\omega_h T] \\ + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_\alpha [(N_0 + N)T] \\ i_\beta [(N_0 + N)T] \end{bmatrix} \sin[(N_0 + N)\omega_h T] \quad (3-18)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ha}(kT) \\ i_{h\beta}(kT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ha} & B_{ha} \\ A_{h\beta} & B_{h\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega_h kT) \\ \sin(\omega_h kT) \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

ขั้นที่ 4 นำกระแส  $i_0$  กลับมาคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสให้กับวงจรรองกำลัง แยกที่ฟสามเฟส ( $i_{u,ref}$ ,  $i_{v,ref}$  และ  $i_{w,ref}$ ) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (3-13)



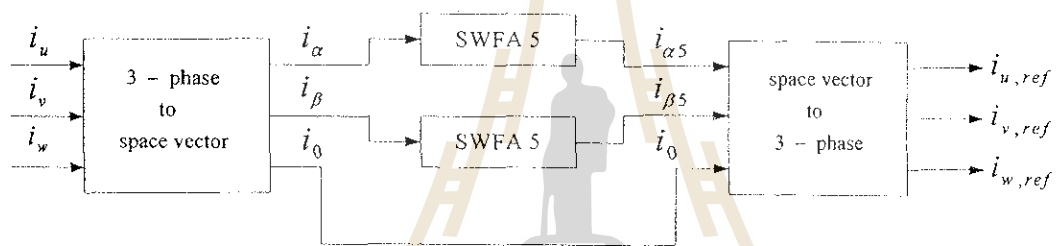
รูปที่ 3.4 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$



รูปที่ 3.5 แผนภาพบล็อกการระบุแอมพลิจูดฮาร์มอนิกด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$

เราสามารถนำการระบุแอมพลิจูดฮาร์มอนิกด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  มาคิดแปลงใช้งานกับกรณีต่างๆได้อย่างหลากหลาย โดยใช้แนวคิดดังแสดงไว้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.6 – 3.8

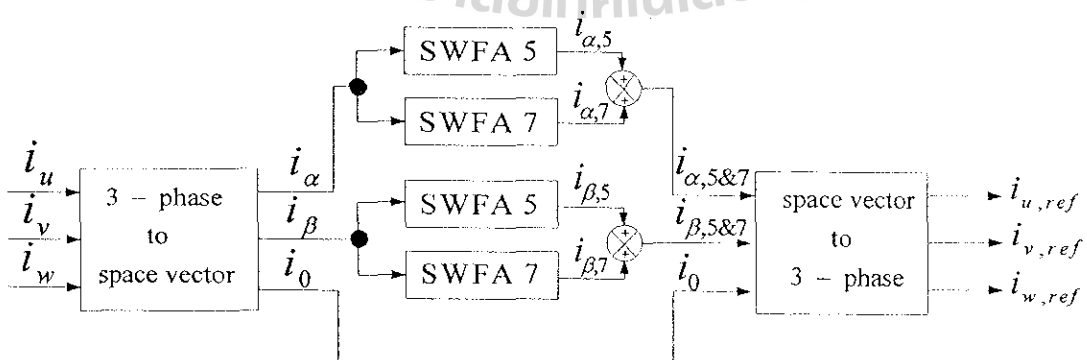
กรณีที่ 1. เลือกกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 การดำเนินงานเป็นไปตามกระบวนการที่แทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพบล็อกการระบุแอมพลิจูดฮาร์มอนิกด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$

เลือกกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5

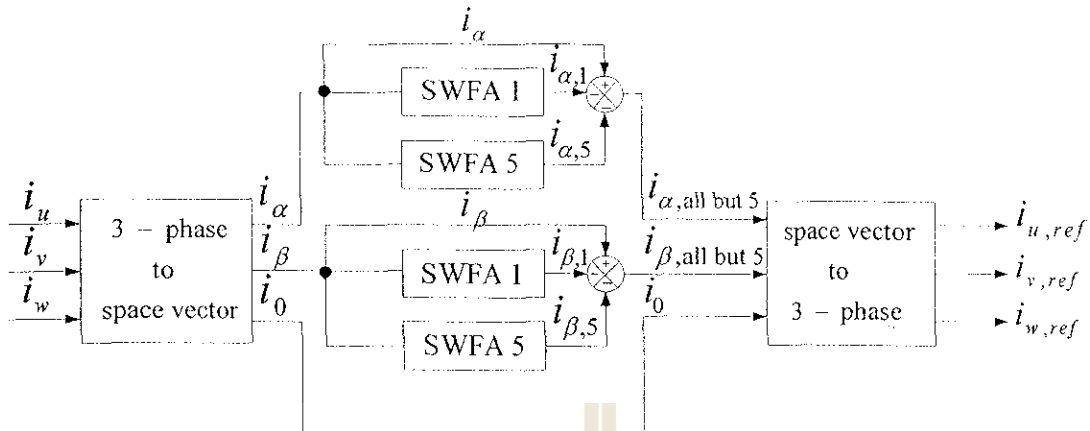
กรณีที่ 2. เลือกกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 การดำเนินงานเป็นไปตามกระบวนการที่แทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพบล็อกการระบุแอมพลิจูดฮาร์มอนิกด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$

เลือกกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5 และ 7

กรณีที 3. เลือกกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดยกเว้นฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 การดำเนินงานเป็นไปตามกระบวนการที่แทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  เลือกกำจัดฮาร์มอนิกทุกอันดับที่ยกเว้นอันดับที่ 5

### 3.4 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการทบทวนอัลกอริทึม DQF ที่ใช้เพื่อการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับการใช้งานกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธี DQF เป็นรากฐานของการพัฒนาต่อยอด ไปเป็นอัลกอริทึมใหม่ที่มีโครงสร้างหลักเป็นการวิเคราะห์ฟูริเยร์ SWFA กระทำกับกระแสไฟฟ้าสเปกเตอร์  $(\alpha, \beta, 0)$  แนวทางใหม่นี้มีหนทางการคำนวณสั้นกว่า DQF มีความซับซ้อนน้อยกว่า และมีความอ่อนตัวในการปรับใช้เพื่อการกำจัดฮาร์มอนิกแบบกลุ่มหรือแบบเจาะจงอันดับ ดังตัวอย่างที่เสนอเป็นกรณีศึกษา 3 ตัวอย่าง แต่มิได้หมายความว่าความเป็นไปได้ในการปรับใช้จะจำกัดแต่เพียงเท่านั้น



## บทที่ 4

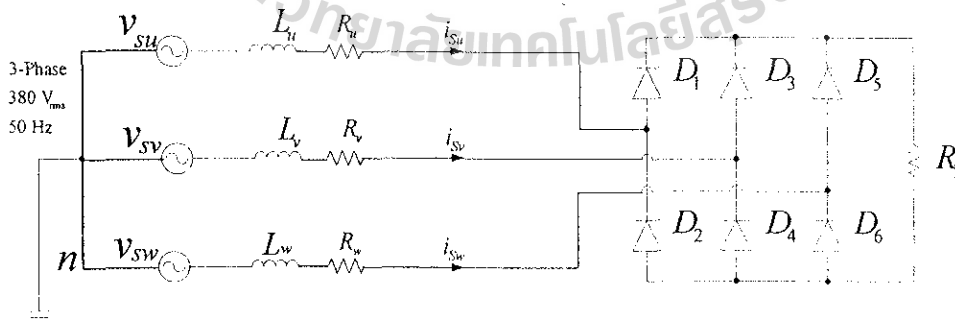
### ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิก

#### 4.1 กล่าวนำ

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกที่นำเสนอในบทนี้ แบ่งเป็นการจำลองสถานการณ์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยพิจารณาแบบจำลองของวงจรกรองเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ที่กำจัดฮาร์โมนิกได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก อัลกอริทึมเหล่านี้ได้แก่ วิธี DQF และ วิธี ประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  การจำลองสถานการณ์สำหรับวงจรกรองกำลังพาสซีฟ และการจำลองสถานการณ์สำหรับวงจรกรองกำลังไฮบริด โดยการจำลองสถานการณ์ของวงจรกรอดังกล่าวได้พิจารณาระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในที่นี้คือวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว ซึ่งโหลดดังกล่าวเมื่อไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุในการปรับเรียบแรงดันสามารถพิจารณาเป็นโหลดในกลุ่มแหล่งจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (current-source nonlinear load, CSNL) ตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์โมนิกที่ใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกแต่ละวิธี ใช้ค่า %THD, ภายหลังการชดเชยเป็นสำคัญ บทนี้จึงนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และอภิปรายผลไปพร้อมกัน

#### 4.2 โครงสร้างของระบบทดสอบ

การจำลองสถานการณ์ได้พิจารณาระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในที่นี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 โดยค่า  $R_u, R_v$  และ  $R_w$  ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์มีค่าเท่ากับ  $0.001 \Omega$  ค่า  $L_u, L_v$  และ  $L_w$  มีค่าเท่ากับ  $100 \mu H$  [8] ส่วนค่าโหลดความต้านทาน  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$  (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.7)



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบทดสอบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

#### 4.3 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกกำลังพาสซีฟ

โครงสร้างของวงจรรอกกำลังพาสซีฟได้นำเสนอ 2 วงจรได้แก่ วงจรรอกกำลังพาสซีฟแบบขนานชนิดปรับความถี่ และ วงจรรอกกำลังพาสซีฟแบบอนุกรม [9, 10]

##### 4.3.1 การออกแบบและคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรรอกกำลังพาสซีฟแบบขนานชนิดปรับความถี่

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรรอกกำลังนั้นจะต้องทราบค่ากำลังงานรีแอกทีฟชดเชยที่วงจรรอกกำลังจะต้องจ่ายให้กับระบบ ค่าความถี่ที่ต้องการกรอง ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) และค่าการทำงานต่างๆ ของระบบไฟฟ้าเช่น ระดับแรงดันความถี่ของระบบ เป็นต้น

ขั้นตอนการออกแบบวงจรรอกกำลังพาสซีฟแบบขนานชนิดปรับความถี่ มีดังนี้

1. กำหนดค่าแรงดันระบบ ( $V_{sys}$ ) ที่จะทำการติดตั้งวงจรรอกกระแสฮาร์มอนิกและความถี่มูลฐานที่ใช้ในการกรอง
2. กำหนดค่ากำลังงานรีแอกทีฟ ( $Q_{com}$ ) ที่ระบบต้องการจากวงจรรอกกำลังเพื่อใช้ในการปรับค่าตัวประกอบกำลังของระบบให้ได้ตามที่ต้องการ โดยค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการหาได้ดังนี้

$$Q_{com} = kW (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (4-1)$$

โดยที่  $Q_{com}$  คือ กำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ (kVar)

•  $kW$  คือ กำลังงานจริงของโหลดรวมทั้งหมด

$\theta_1$  คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเดิม

$\theta_2$  คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใหม่ที่ต้องการ

3. กำหนดจำนวนชุดวงจรรอกกำลังในระบบว่าต้องการติดตั้งอันดับใดบ้างเช่นตัวกรองอันดับที่ 5 และ 7 เป็นต้น

4. ทำการแบ่งค่า  $Q_{com}$  ออกเป็นส่วนๆตามจำนวนชุดของตัวกรองกำลังที่กำหนดไว้โดยใช้สัดส่วนของปริมาณกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ

5. กำหนดจุดปรับความถี่ (Tuning point :  $n_s$ ) ของตัวกรองแต่ละอันดับ โดยกำหนดให้จุดปรับความถี่ มีค่าต่ำกว่าอันดับของฮาร์มอนิกที่ต้องการกรองเล็กน้อย

6. กำหนดขนาดพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุที่ความถี่มูลฐานดังนี้

$$V_{cr} \geq \left( \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \right) V_{Sys} \quad (4-2)$$

โดยที่  $V_{Sys}$  คือ แรงดันระบบที่ตัวกรองต่ออยู่ (V)

$n_h$  คือ ค่าจุดปรับความถี่ ของตัวกรอง

$V_{cr}$  คือ แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ (V)

7. กำหนดขนาดกำลังรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ ( $Q_{Cr}$ ) ที่ต้องใช้ในตัวกรองแต่ละอันดับ การหาขนาดของตัวเก็บประจุทำได้โดยใช้สมการ

$$Q_{Cr} = \frac{Q_{Com}}{\left( \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \right) \left( \frac{V_{Sys}}{V_{Cr}} \right)^2} \quad (4-3)$$

8. กำหนดค่าตัวประกอบคุณภาพ ( $Q_F$ ) ของตัวกรอง

9. กำหนดค่าตัวเก็บประจุ (C) ค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทาน ดังสมการต่อไปนี้

$$C = \frac{Q_{Cr} \times 10^6}{2\pi f n_h V_{Cr}^2} \quad (\mu F) \quad (4-4)$$

$$L = \frac{10^3}{(2\pi f n_h)^2 C} \quad (mH) \quad (4-5)$$

$$R = \frac{X_L \text{ at } n_h}{Q_F} \quad (\Omega) \quad (4-6)$$

โดยที่  $V_{Cr}$  คือ แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ (V)

$Q_{Cr}$  คือ กำลังรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ (VAR)

$n_h$  คือ ค่าจุดปรับความถี่ ของตัวกรอง

$Q_F$  คือ ค่าตัวประกอบคุณภาพของตัวกรอง

10. วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบไฟฟ้าใหม่ที่ทำให้การติดตั้งวงจรรองกำลังเข้าไปในระบบ

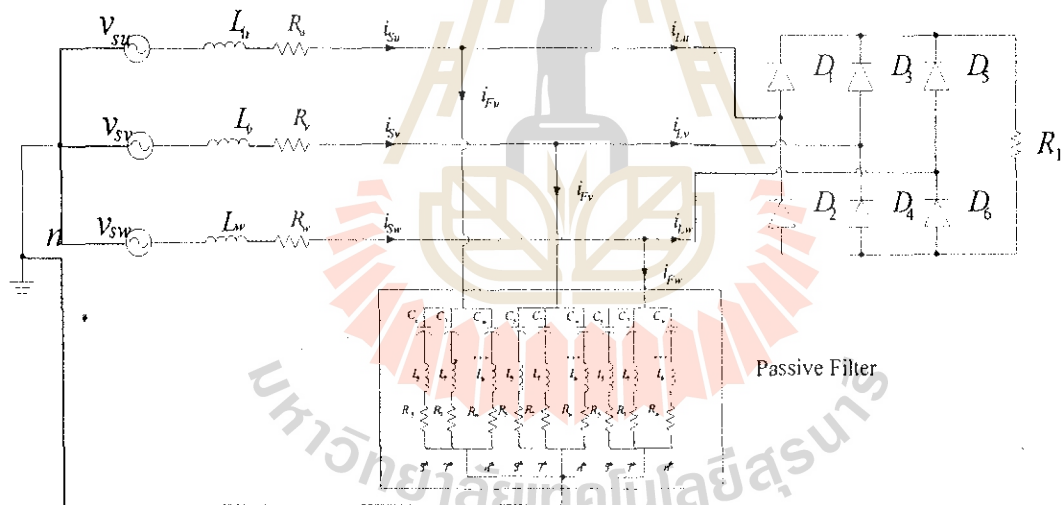
11. ตรวจสอบตัวเก็บประจุว่าทำงานเกินพิกัดหรือไม่ หากผลการตรวจสอบพบว่าตัวเก็บประจุทำงานเกินพิกัดที่กำหนด จะต้องเลือกขนาดของตัวเก็บประจุใหม่โดยกลับไปขั้นตอนที่ 7. ใหม่

12. กำหนดขนาดกระแสพิกัดของตัวเหนี่ยวนำ (L) โดยปกติแล้วกระแสพิกัดของตัวเหนี่ยวนำจะเผื่อขนาดกระแสที่ความถี่มูลฐานไว้ 10% เพื่อเป็นการป้องกันตัวเหนี่ยวนำ

$$I_L = 1.3I_{Cr} \quad (4-7)$$

เมื่อ  $I_{Cr}$  คือขนาดกระแสพิกัดอาร์เอ็มเอส ของตัวเก็บประจุหาได้ดังสมการที่ (4.8)

$$I_{Cr} = \frac{Q_{Cr}}{V_{Cr}} \quad (4-8)$$



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก สำหรับวงจรรองกำลังพาสซีฟแบบขนานชนิดปรับคลื่น

โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์กรณีของการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนานแทนได้ด้วยแผนภาพดังรูปที่ 4.2 โดยที่โหลดที่ใช้  $50\Omega$  และค่าตัวแปรต่างๆ เหมือนกับกรณีที่ 4.2 ซึ่งการจำลองสถานการณ์ในที่นี่แบ่งออกเป็นกรอกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟดังนี้

- ติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5 โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้  $C_5 = 3.0822\ \mu F$ ,  $L_5 = 0.1315\ H$ ,  $R_5 = 1.0327\ \Omega$  (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.8)

- ติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 7 โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้  $C_7 = 2.2465\ \mu F$ ,  $L_7 = 0.0920\ H$ ,  $R_7 = 1.0121\ \Omega$  (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.9)

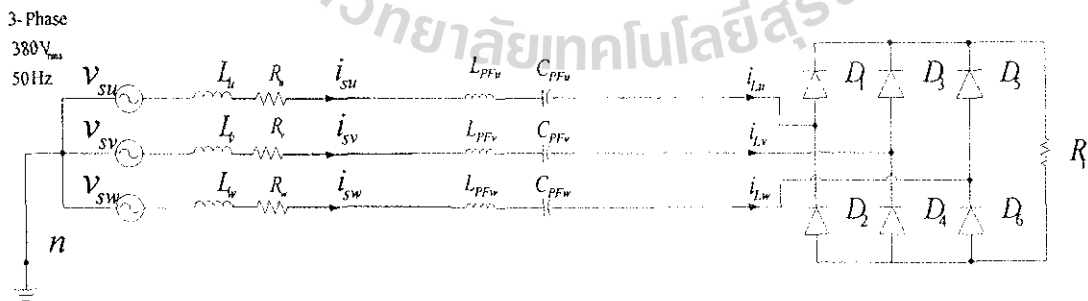
- ติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5, 7 โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้  $C_5 = 2.4497\ \mu F$ ,  $L_5 = 0.1654\ H$ ,  $R_5 = 1.2994\ \Omega$ ,  $C_7 = 0.46017\ \mu F$ ,  $L_7 = 0.4493\ H$ ,  $R_7 = 0.9882\ \Omega$  (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.10)

4.3.2 การออกแบบและคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรม [11] ในที่นี่เป็นชนิดความถี่ต่ำผ่าน ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ โดยใช้หลักการ รีโซแนนซ์ในการออกแบบดังสมการที่ (4-9, 4-10)

$$X_L = X_C \quad (4-9)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4-10)$$

โดยที่  $\omega_n$  คือความถี่ที่ต้องการจูนซึ่งมีหน่วยเป็นเรเดียน



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรม

การจำลองสถานการณ์โหลดที่ใช้และค่าตัวแปรต่างๆเหมือนกับกรณีที่ 4.2 ยกเว้นค่าโหลดความต้านทาน  $R_l$  เป็น  $600 \Omega$  เพื่อความเหมาะสมทางกำลังไฟฟ้าและการออกแบบ โครงสร้างของระบบที่จำลองสถานการณ์แสดงดังแผนภาพในรูปที่ 4.3 การจำลองสถานการณ์ในที่นี่แบ่งส่วนการจำลองออกเป็นส่วนๆดังนี้

- ระบบทดสอบเมื่อ  $R_l$  เปลี่ยนค่าเป็น  $600 \Omega$  (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.20)
- วงจรกรองกำลังพาสซีฟอนุกรมแบบที่ 1 ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ  $0.5 \text{ H}$  ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ  $20 \mu\text{F}$  (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.11)
- วงจรกรองกำลังพาสซีฟอนุกรมแบบที่ 2 ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ  $1.0 \text{ H}$  ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ  $10 \mu\text{F}$  (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.12)
- วงจรกรองกำลังพาสซีฟอนุกรมแบบที่ 3 ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ  $2.0 \text{ H}$  ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ  $5 \mu\text{F}$  (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.13)

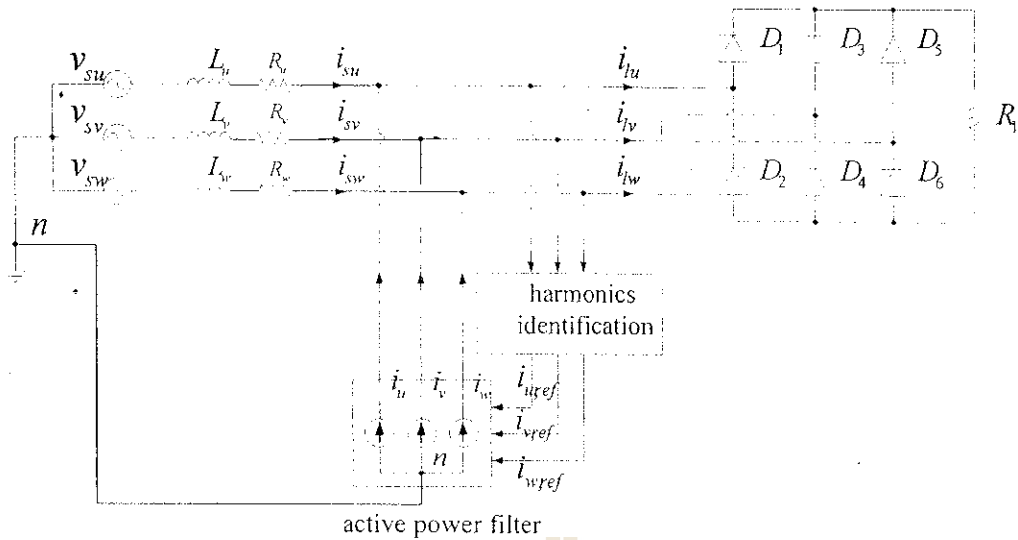
#### 4.4 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์ สามารถแทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 4.4 โดยที่โหลดที่ใช้และค่าตัวแปรต่างๆเหมือนกับกรณีที่ 4.2 ยังสังเกตได้ว่ามีองค์ประกอบหนึ่งเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก (harmonics identification) ซึ่งหมายถึง วิธี DQF และวิธี ประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  ในเบื้องต้น ถ้าพิจารณาว่าไม่มีวงจรกรองกำลังแอกทีฟ กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก ( $i_{su}, i_{sv}$  และ  $i_{sw}$ ) จะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าโหลด ( $i_{lu}, i_{lv}$  และ  $i_{lw}$ ) แต่ถ้าพิจารณาในกรณีที่มีวงจรกรองกำลังแอกทีฟ มีกระแสชดเชย ( $i_{cu}, i_{cv}$  และ  $i_{cw}$ ) เพื่อกำจัดฮาร์มอนิก จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟส โคนอาศัยกฎของเคอร์ชอฟฟ์ ดังสมการที่ (4-1) ในสมการใช้  $i$  เป็นตัวห้อย แสดงเฟส u เฟส v หรือ เฟส w เมื่อพิจารณาเฟส u จะแทน  $i$  ด้วย u ถ้าเป็นเฟส v จะแทน  $i$  ด้วย v และถ้าเฟส w จะแทน  $i$  ด้วย w

$$i_{si} = i_h - i_{ci} \quad (4-11)$$

ซึ่งการจำลองสถานการณ์ในที่นี่แบ่งออกเป็นการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟดังนี้

- วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ โดยใช้การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี DQF (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.14)
- วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ โดยใช้การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.15)



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก  
สำหรับวงจรกรองกำลังแยกทีฟ

#### 4.5 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังไฮบริดแบบที่ 1

โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์ สามารถแทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 4.5 โดยที่โหลดที่ใช้และค่าตัวแปรต่างๆเหมือนกับกรณีที่ 4.2 ซึ่งการจำลองสถานการณ์ในที่นี้วงจรกรองกำลังไฮบริดประกอบด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนานชนิดปรับคลื่น มีลำดับการติดตั้งวงจรกรองกำลังต่างๆดังนี้

4.5.1 Source – Passive Filter order5 – Active Filter(DQF) – Load.

(ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.16)

4.5.2 Source – Passive Filter order5 – Active Filter(SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Load.

(ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.17)

4.5.3 Source – Active Filter(DQF) – Passive Filter order 5 – Load.

(ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.18)

4.5.4 Source – Active Filter(SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Passive Filter order 5 – Load.

(ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.19)

4.5.5 Source – Passive Filter order5&7 – Active Filter(DQF) – Load.

(ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.20)

4.5.6 Source – Passive Filter order5&7 – Active Filter(SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Load.

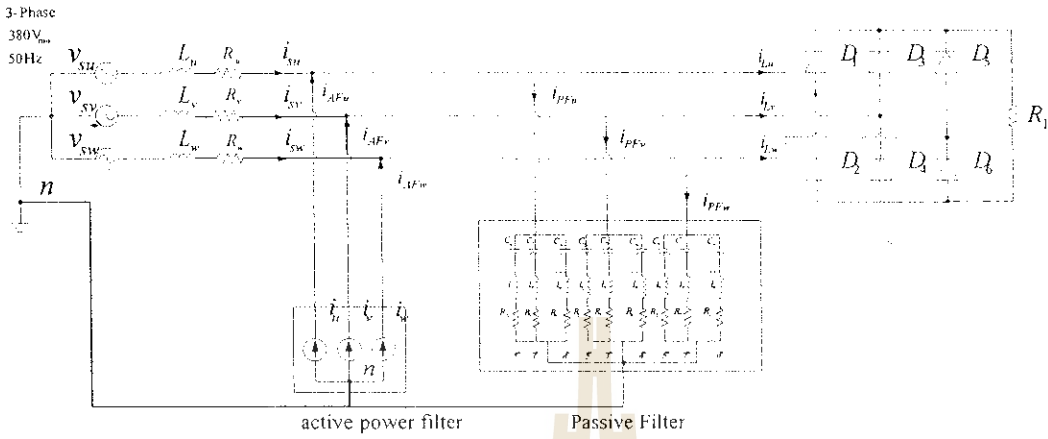
(ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.21)

4.5.7 Source – Active Filter(DQF) – Passive Filter order 5&7 – Load.

(ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.22)

4.5.8 Source – Active Filter (SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Passive Filter order5&7 – Load.

(ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.23)



รูปที่ 4.5 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก สำหรับวงจรกรองกำลังไฮบริดแบบที่ 1

จากตารางที่ 4.1 สรุปผลการจำลองสถานการณ์ทั้งก่อนการกำจัดฮาร์มอนิก การติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรมชนิดปรับคลื่น การติดตั้งวงจรกรองกำลังแอคทีฟ และการติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดตามลำดับ โดยผลที่นำเสนอเป็นค่า %THD<sub>i</sub> ในแต่ละเฟส และค่า %THD<sub>i,ave</sub> เฉลี่ย (%THD<sub>i,ave</sub>) กำหนดได้จากสมการที่ (4-12) และตารางที่ 4.2 แสดงค่ากระแส(Irms) และพิกัดกำลังไฟฟ้า(VA) ณ จุดต่างๆ เช่น ที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก ที่วงจรกรองกำลังพาสซีฟ ที่วงจรกรองกำลังแอคทีฟ ซึ่งในที่นี้พิจารณาเฉพาะเฟส u เนื่องจากเฟส v และ w มีผลคล้ายคลึงกับเฟส u

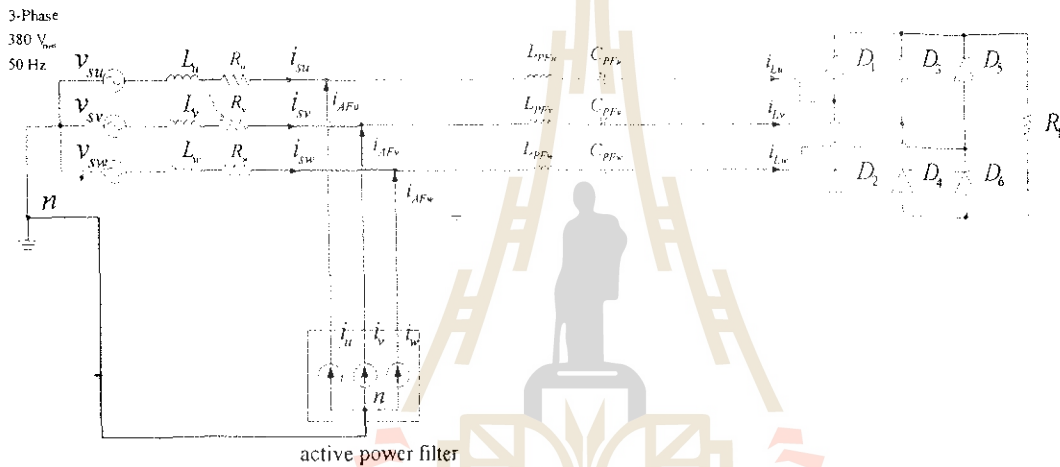
$$\%THD_{i,ave} = \sqrt{\frac{\sum_{k=u,v,w} (\%THD_{i(k)})^2}{3}} \quad (4-12)$$

4.6 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังไฮบริดแบบที่ 2

โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์ต่างจากแบบที่ 1 คือส่วนของวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่เปลี่ยนมาใช้แบบอนุกรม สามารถแทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 4.6 โดยที่โหลดที่ใช้และค่าตัวแปรต่างๆเหมือนกับกรณีที่ 4.3.2 คือ R<sub>1</sub> เปลี่ยนค่าเป็น 600 Ω ซึ่งการจำลองสถานการณ์ในที่นี้แบ่งส่วนการจำลองออกเป็นส่วนๆดังนี้



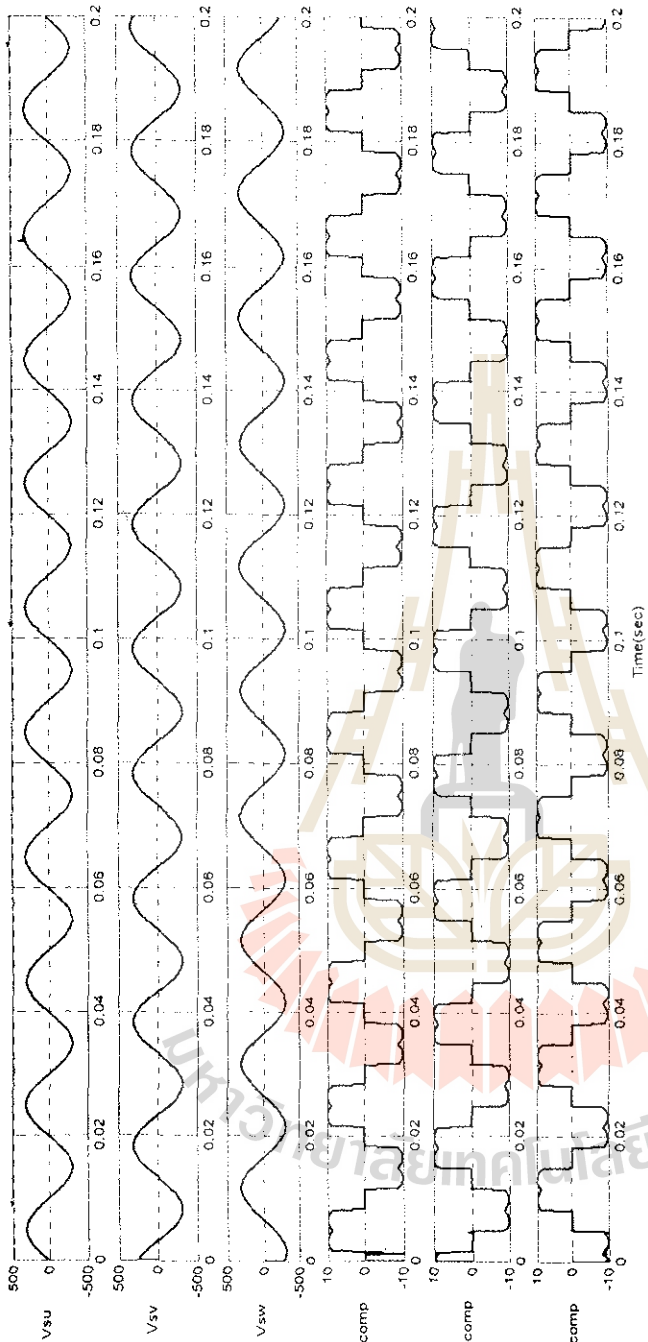
- วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบโดยใช้การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี DQF (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.24)
- วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบโดยใช้การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.25)
- วงจรกรองกำลังไฮบริดประกอบด้วย วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบโดยใช้การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีประยุกต์ DQF และวงจรกรองกำลังพาสซีฟตามกรณีที่ 4.3.2 (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.26-4.28)
- วงจรกรองกำลังไฮบริดประกอบด้วย วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบโดยใช้การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี ประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  และวงจรกรองกำลังพาสซีฟตามกรณีที่ 4.3.2 (ให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.29-4.31)



รูปที่ 4.6 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก  
สำหรับวงจรกรองกำลังไฮบริดแบบที่ 2

จากตารางที่ 4.3 สรุปผลการจำลองสถานการณ์ทั้งก่อนการกำจัดฮาร์มอนิก การติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรม การติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และการติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดตามลำดับ โดยผลที่นำเสนอเป็นค่า %THD<sub>r</sub> ในแต่ละเฟส และค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ย (%THD<sub>i,ave</sub>) ค่ากระแส (I<sub>rms</sub>) และพิกัดกำลังไฟฟ้า (VA) ณ จุดต่างๆ

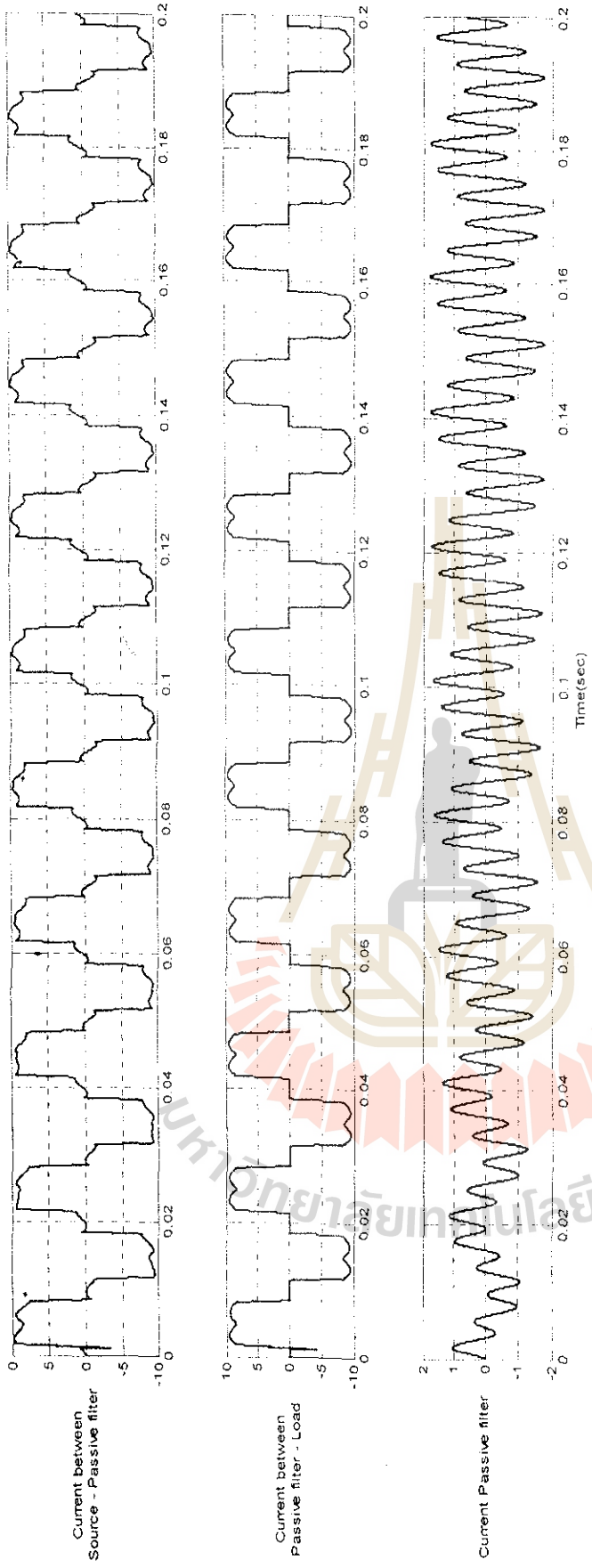
Source – Load.



รูปที่ 4.7 แรงดันไฟและกระแสไฟที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย

จากรูปที่ 4.7 เป็นผลการจำลองสถานการณ์ก่อนการชดเชย รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ( $V_{su}$ ,  $V_{sv}$  และ  $V_{sw}$ ) และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย ( $i_{sv.uncomp}$ ,  $i_{sw.uncomp}$  และ  $i_{sw.uncomp}$ ) เห็นได้ว่ารูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้ายังคงเป็นกรรพลาคลื่นไซน์ ส่วนรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้านั้นรูปคลื่นได้มีการบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นไซน์เนื่องมาจากผลของฮาร์มอนิก

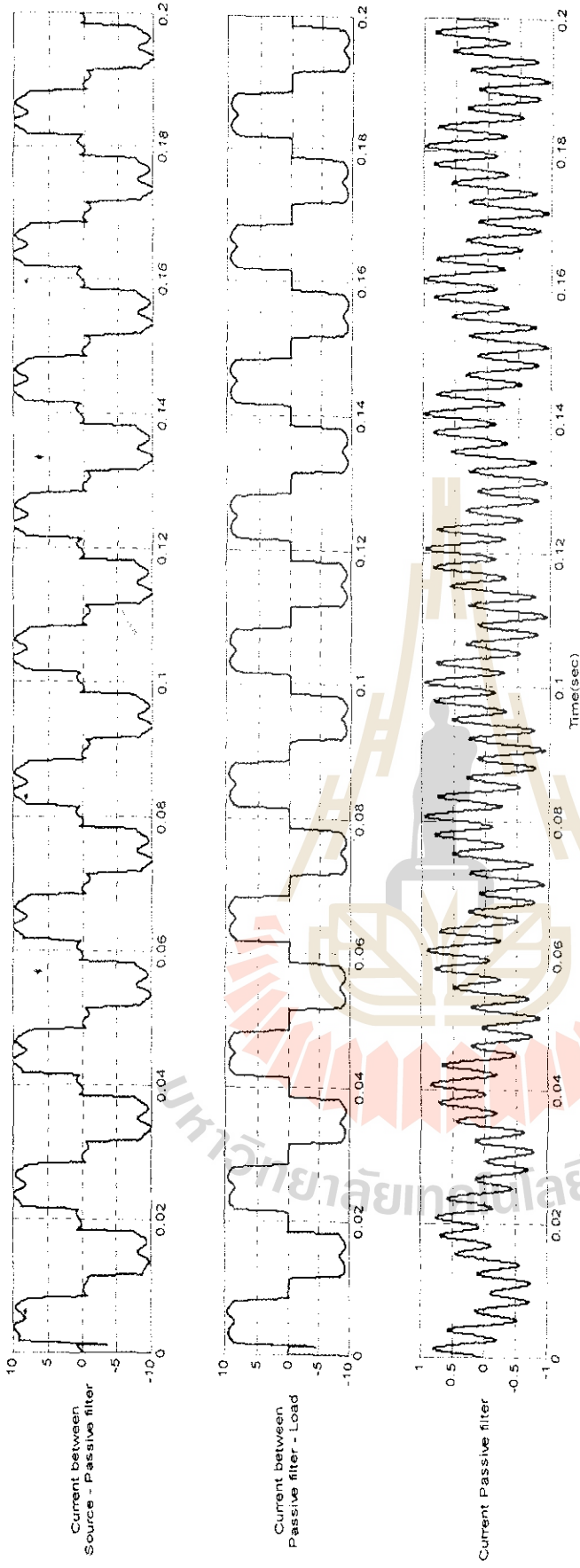
Source – Passive filter order 5 – Load.



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5

จากรูปที่ 4.8 เป็นผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5 รูปคลื่นสัญญาณบนสุดเป็นรูปกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าซึ่งเห็นว่ายังคงมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ เนื่องจากฮาร์มอนิกในระบับไม่ได้อาศัยเพียงฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เท่านั้น รวมถึงความไม่สมบูรณ์ในการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองด้วยเห็นได้จากกระแสที่ใหญ่ผ่านวงจรกรองยังมีกระแสที่ความถี่ฐานและกระแสที่ฮาร์มอนิกอันดับอื่นปะปนอยู่ทำให้การกำจัดฮาร์มอนิกลดลงเพียงเล็กน้อย

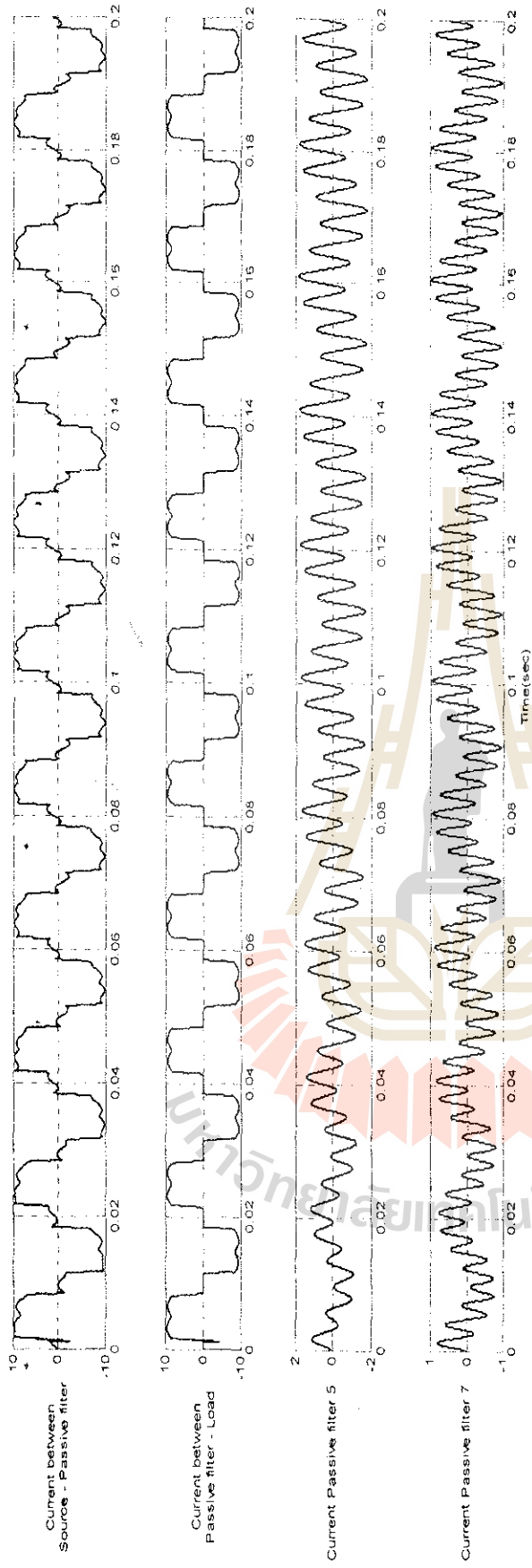
Source – Passive filter order 7 – Load.



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรองค์กำลังพาสซีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 7

จากรูปที่ 4.9 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.7

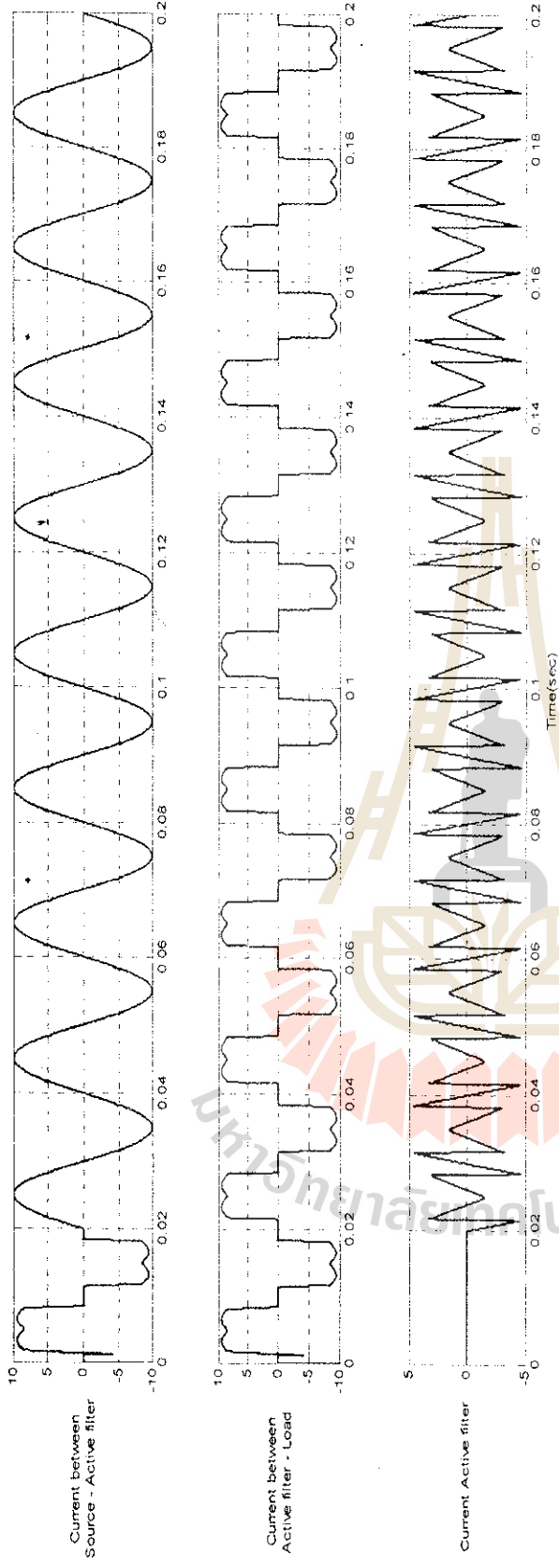
Source – Passive filter order S&amp;7 – Load.



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5&amp;7

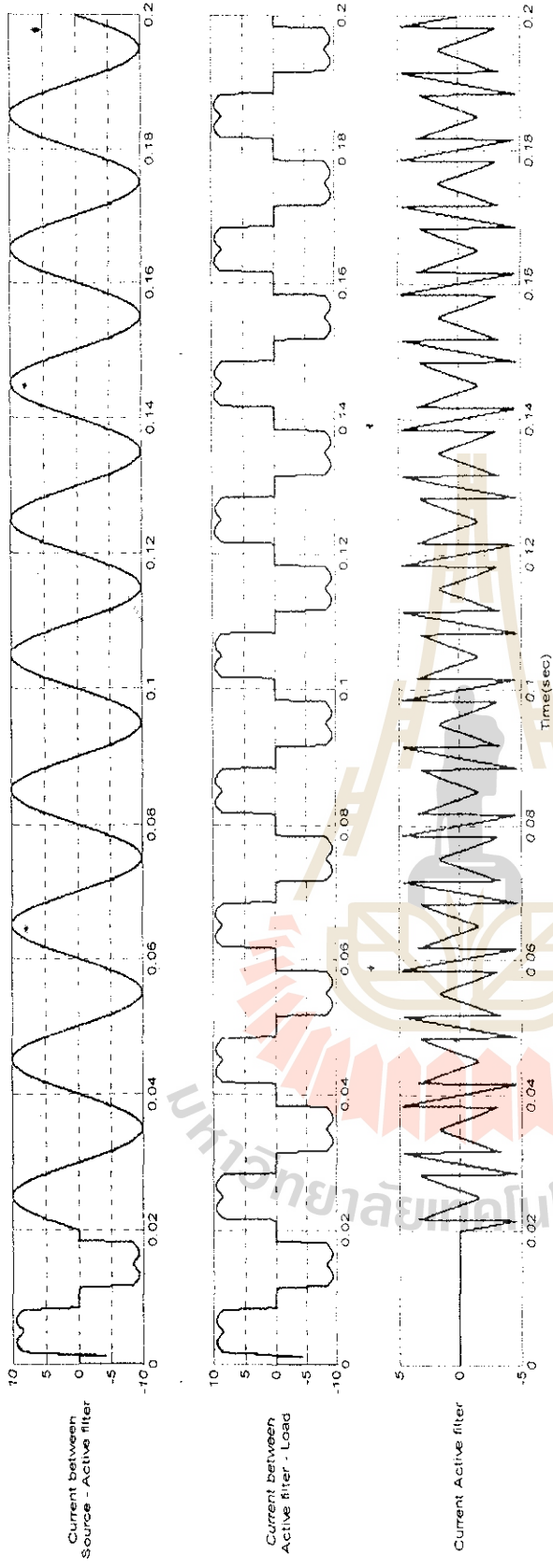
จากรูปที่ 4.10 เป็นผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟกำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5&7 รูปคลื่นสัญญาณบนสุดเป็นรูปกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าซึ่งเห็นว่ายังคงมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ เนื่องจากฮาร์มอนิกในระบบไม่ได้มีเพียงฮาร์มอนิกอันดับที่ 5&7 เท่านั้น รวมถึงความไม่สมบูรณ์ในการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองด้วย เห็นได้จากกระแสที่ไหลผ่านวงจรกรองยังมีกระแสที่ความถี่อื่นปะปนอยู่ทำให้การกำจัดฮาร์มอนิกลดลงเพียงเล็กน้อย

Source – Active filter (DQF) – Load.



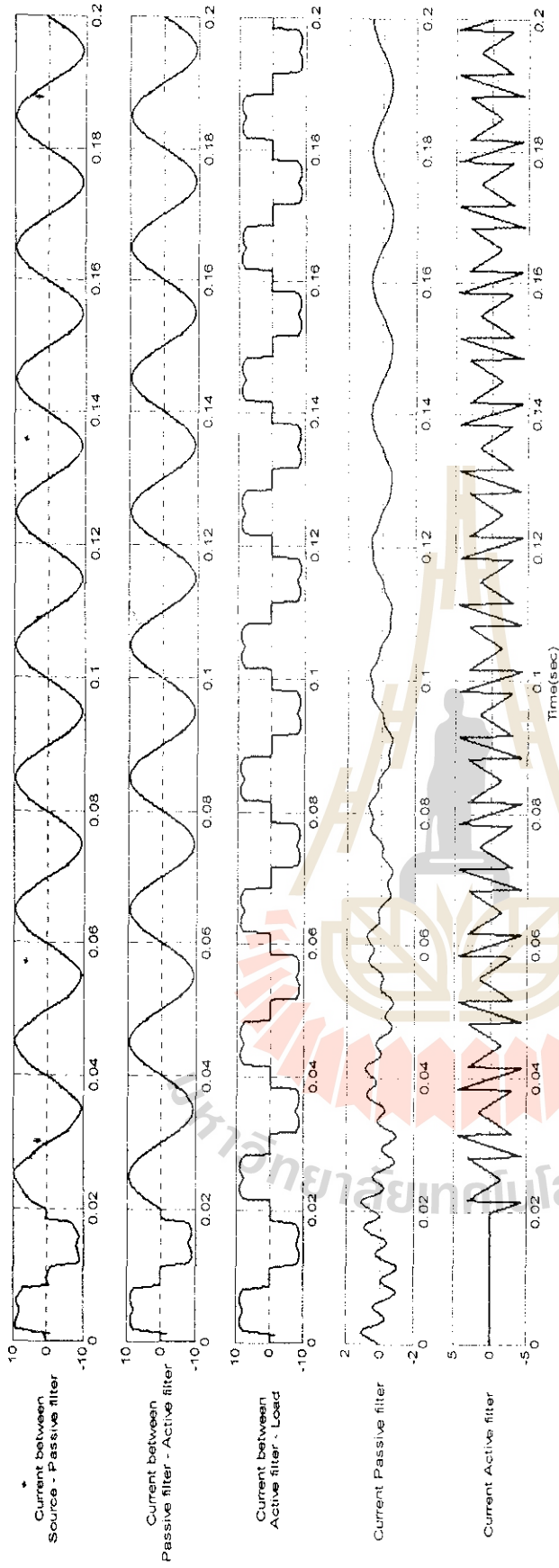
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (DQF)

จากรูปที่ 4.11 เป็นผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยเมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ รูปคลื่นสัญญาณบนสุดเป็นรูปกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าซึ่งเป็นรูปคลื่นซายน์ที่ไม่มีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ วงจรกรองกำลังแอกทีฟได้จัดการกระแสชดเชยเข้าไปที่แหล่ง โดยถ้าสังเกตรูปคลื่นสัญญาณสองรูปล่างเมื่อมีนามากหักล้างกันจะได้รูปคลื่นซายน์รูปคลื่นด้านบนจากการชดเชยเห็นได้ว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF สามารถชดเชยฮาร์มอนิกได้ดีมาก

Source – Active filter (SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Load.รูปที่ 4.12 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังแอคทีฟ (SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$ )

จากรูปที่ 4.12 เป็นผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยเมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังแอคทีฟที่ทำการจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ รูปคลื่นสัญญาณบนสุดเป็นรูปกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าซึ่งเป็นรูปคลื่นซายน์ที่ไม่มีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ วงจรกรองกำลังแอคทีฟได้จัดการกระแสชดเชยเข้าไปหักล้างโคจรต่ำดังกล่าวคลื่นสัญญาณสองรูปล่างเมื่อนำมาหักล้างกันจะได้รูปคลื่นซายน์ตรงรูปคลื่นด้านบนจากการชดเชยเห็นได้ว่าวงจรกรองกำลังแอคทีฟที่มีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  สามารถชดเชยฮาร์มอนิกได้ดีมากเช่นเดียวกับวิธี DQF

Source – Passive filter order 5 - Active filter (DQF) – Load.

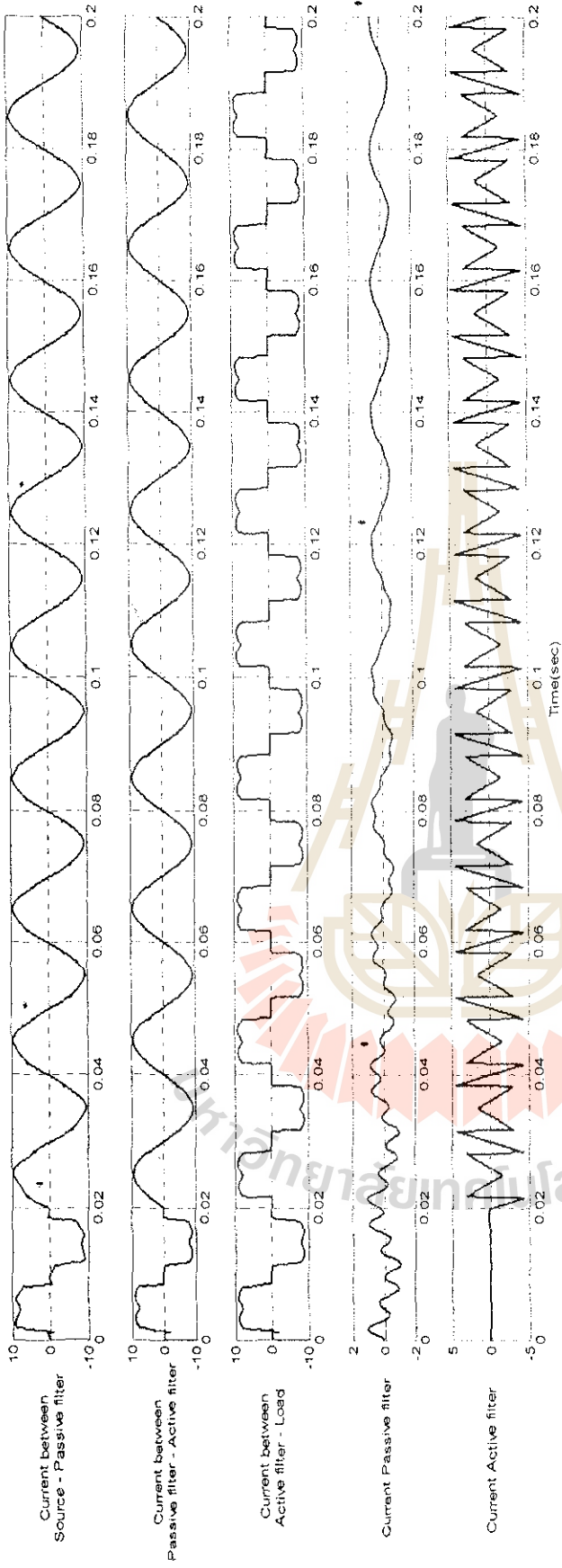


รูปที่ 4.13 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไซบริคทรี 4.5.1

จากรูปที่ 4.13 เป็นผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยเมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไซบริค โดยรูปคลื่นสัญญาณบนสุดเป็นรูปกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นรูปคลื่นซายน์ที่ไม่มีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ เมื่อพิจารณาผลจะเห็นว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้ลดกระแสแอสซเซซีให้แก่วงจรได้อย่างดีพอควรจนทำให้วงจรกรองกำลังกลับไม่ช่วยกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านวงจรกรองนั้น ไม่มีความถี่ที่ต้องการมอดูกลับเป็นกระแสที่ความถี่มูลฐาน ทำให้วงจรกรองกำลังพาสซีฟที่เพิ่มเข้าไปไม่ช่วยในการกำจัดฮาร์มอนิกแต่อย่างใดแต่ช่วยกำจัดแอมอนิกที่ถูกรบกวนบางส่วนวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ติดตั้งไว้ได้อย่างดีนั่นเอง



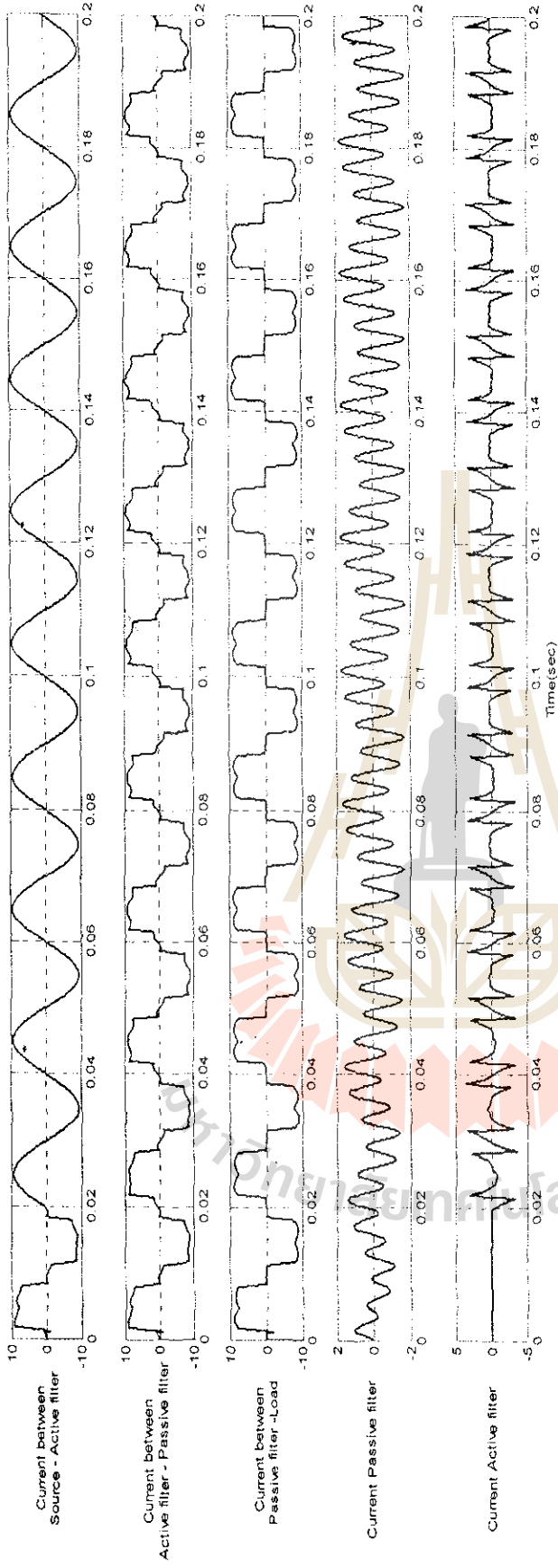
Source – Passive filter order 5 – Active filter (SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Load.



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรของกำลังไฮบริดกรณี 4.5.2

จากรูปที่ 4.14 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.13

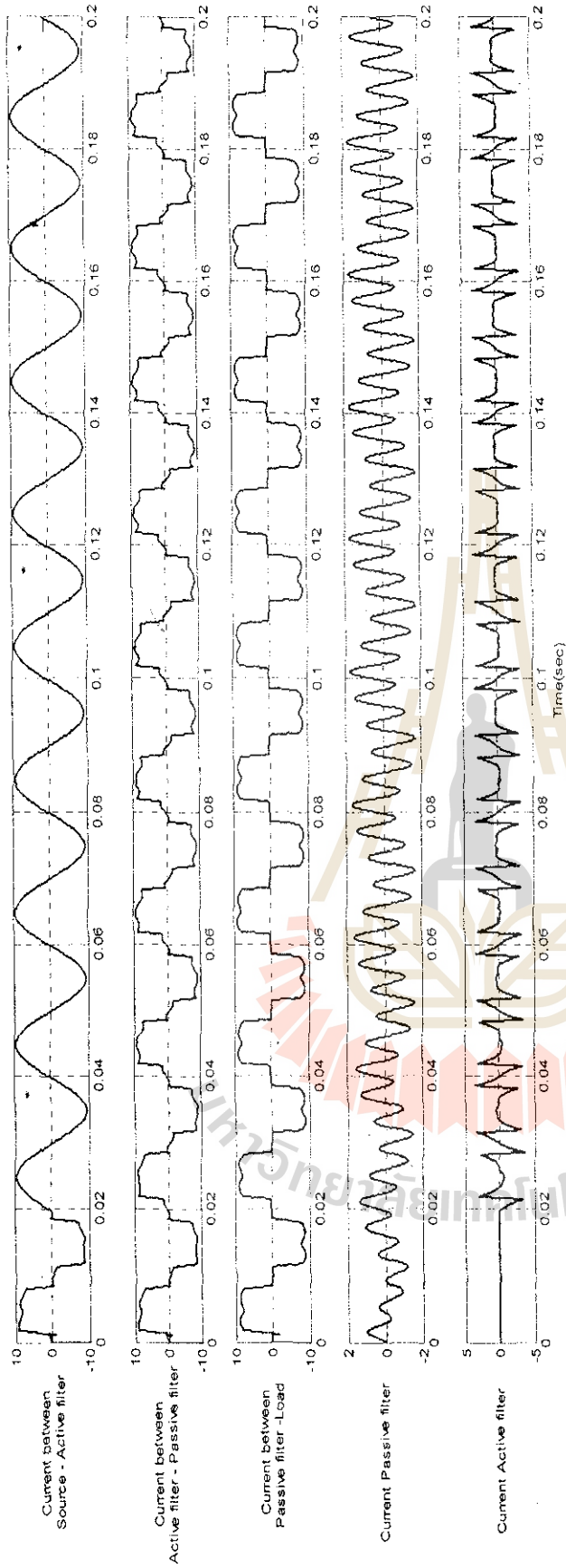
Source – Active Filter(DQF) – Passive Filter order 5 – Load.



รูปที่ 4.15 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดกรณี 4.5.3

จากรูปที่ 4.15 เป็นผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยเมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริด โดยรูปคลื่นสัญญาณบนสุดเป็นรูปกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นรูปคลื่นชานตันที่ไม่มีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ โดยวงจรกรองแต่ละชนิดทำการกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องโดยเรียงจากวงจรกรองกำลังพาสซีฟกำจัดฮาร์มอนิกไปทีละส่วนหนึ่งตามตัววงจรกรองกำลังแอกทีฟก็ทำหน้าที่กำจัดฮาร์มอนิกที่เหลือทั้งหมด

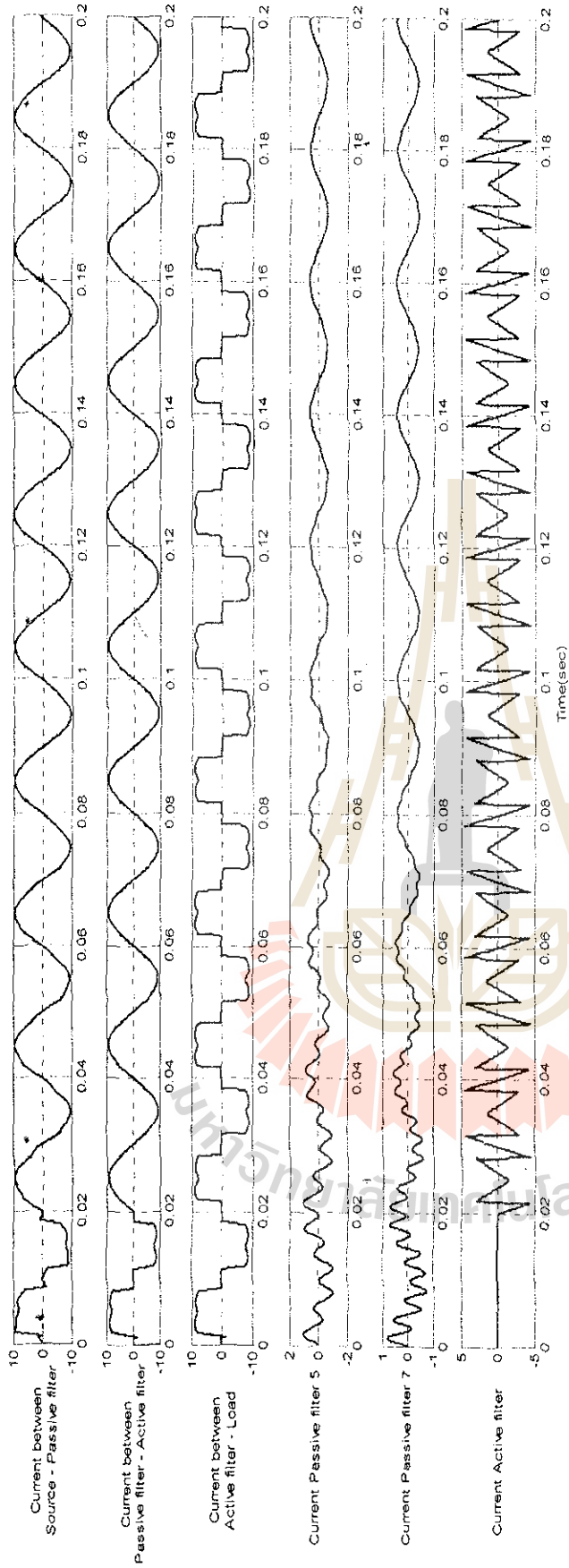
Source – Active Filter(SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Passive Filter order 5 – Load.



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดกรณี 4.5.4

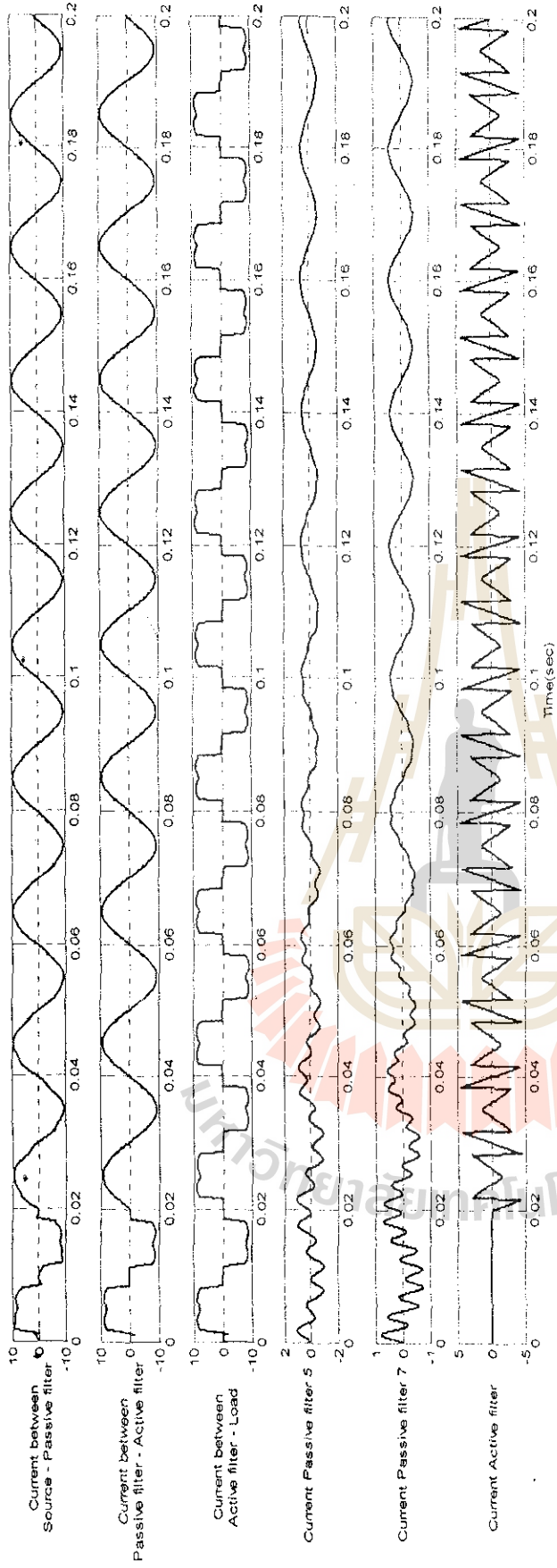
จากรูปที่ 4.16 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.15

Source ~ Passive Filter order5&7 ~ Active Filter(DQF) ~ Load.



รูปที่ 4.17 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดกรณี 4.5.5

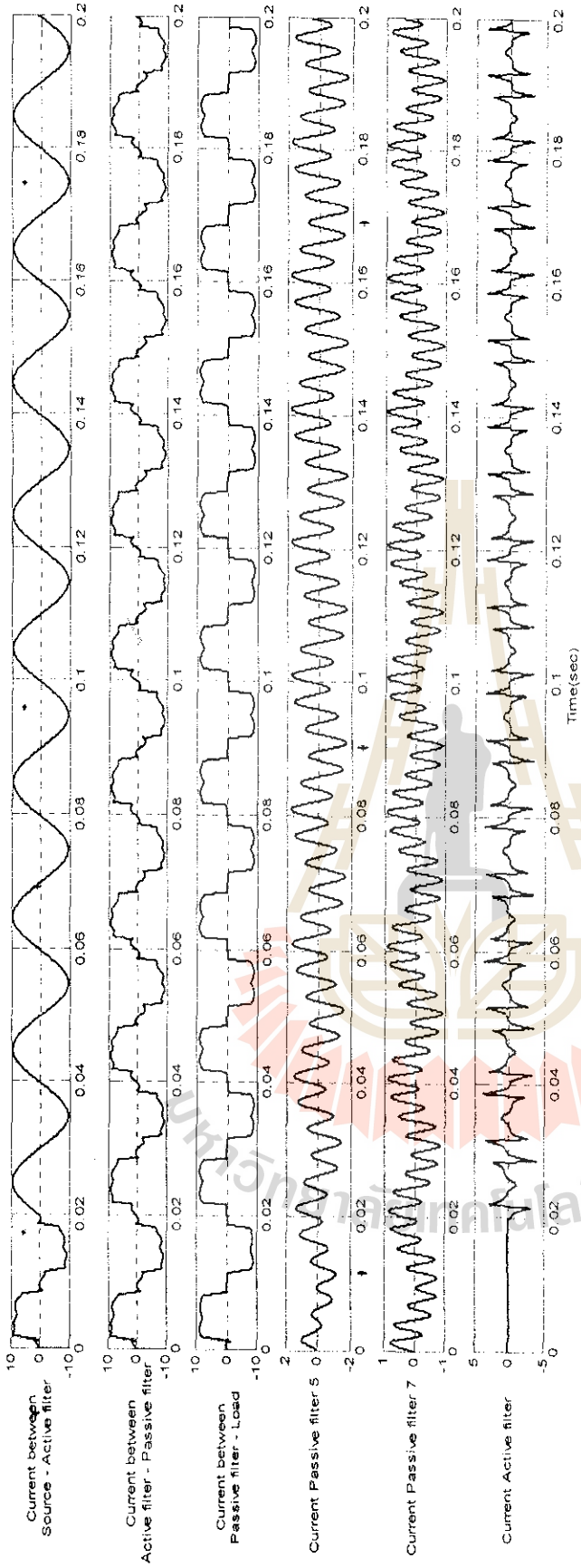
จากรูปที่ 4.17 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.13, 4.14 ถึงแม้จะติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟเพิ่มเข้าไปแต่วงจรกรองกำลังก็ไม่ได้ช่วยกำจัดฮาร์มอนิกแต่อย่างใด

Source – Passive Filter order 5&7 – Active Filter(SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Load.

รูปที่ 4.18 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไซบริดกรณี 4.5.6

จากรูปที่ 4.18 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.17

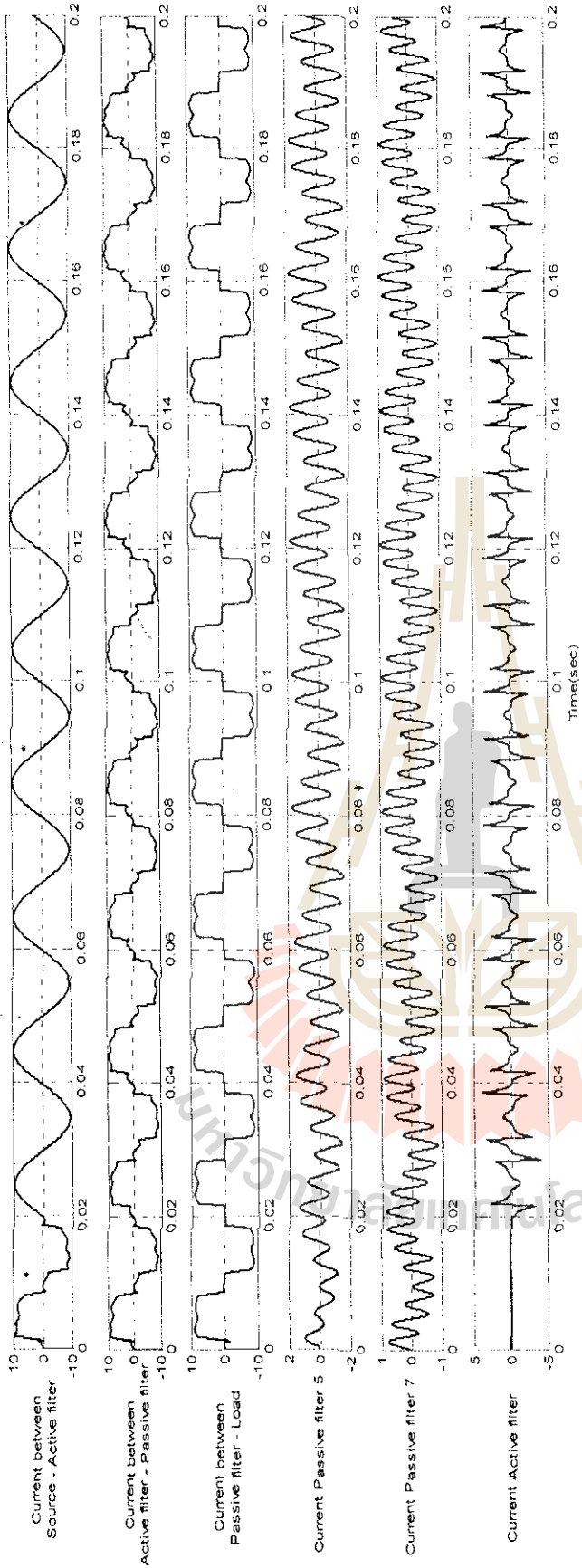
Source -- Active Filter(DQF) – Passive Filter order 5&amp;7 – Load.



รูปที่ 4.19 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดกรณี 4.5.7

จากรูปที่ 4.19 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในท่านอนเดียวกันกับรูปที่ 4.13, 4.14 โดยวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่เพิ่มเข้าไปนั้นช่วยทำให้กระแสลดฮือในส่วน  
ของวงจรกรองแอกทีฟที่มีค่าลดลงสามารถสังเกตได้จากรูปคลื่นสัญญาณกระแสของวงจรกรองแอกทีฟหรืออ่านค่าได้จากตารางที่ 4.2

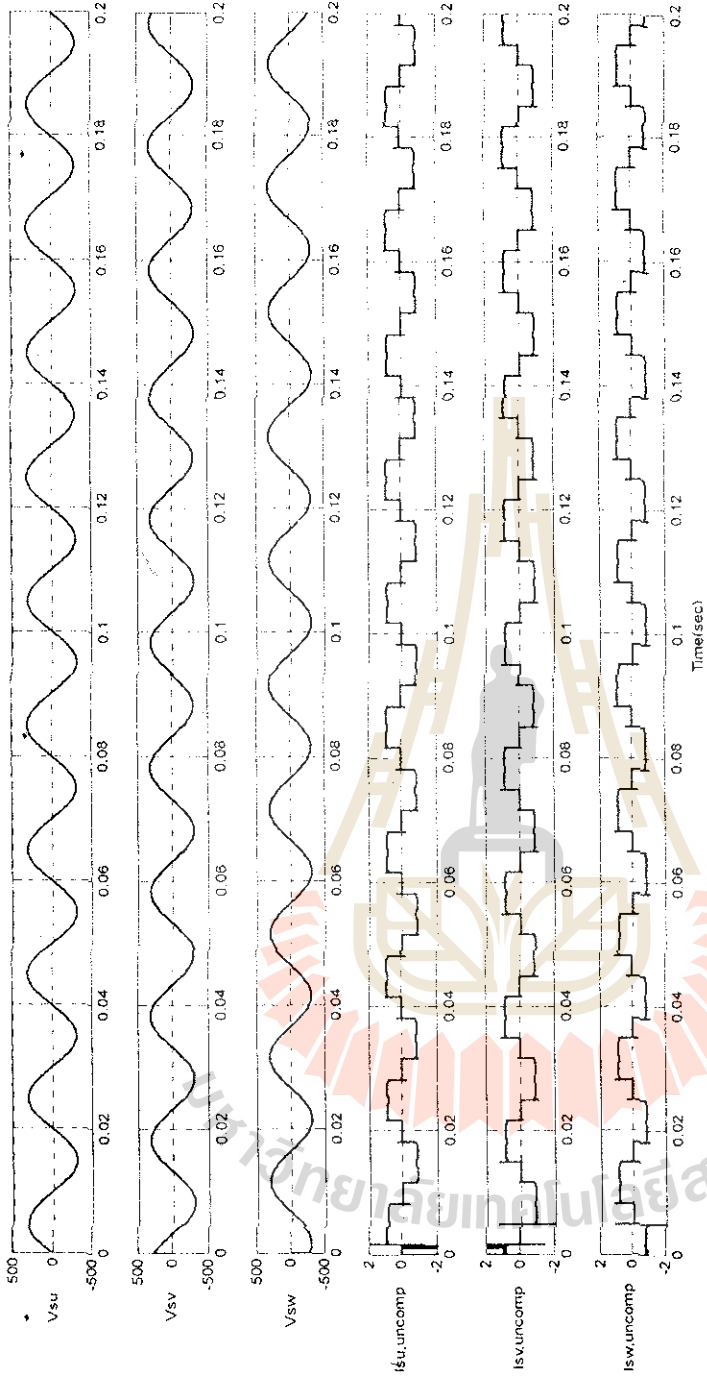
Source – Active Filter(SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Passive Filter order5&7 – Load



รูปที่ 4.20 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไซบริคกรณี 4.5.8

จากรูปที่ 4.18 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.17

Source – Load.

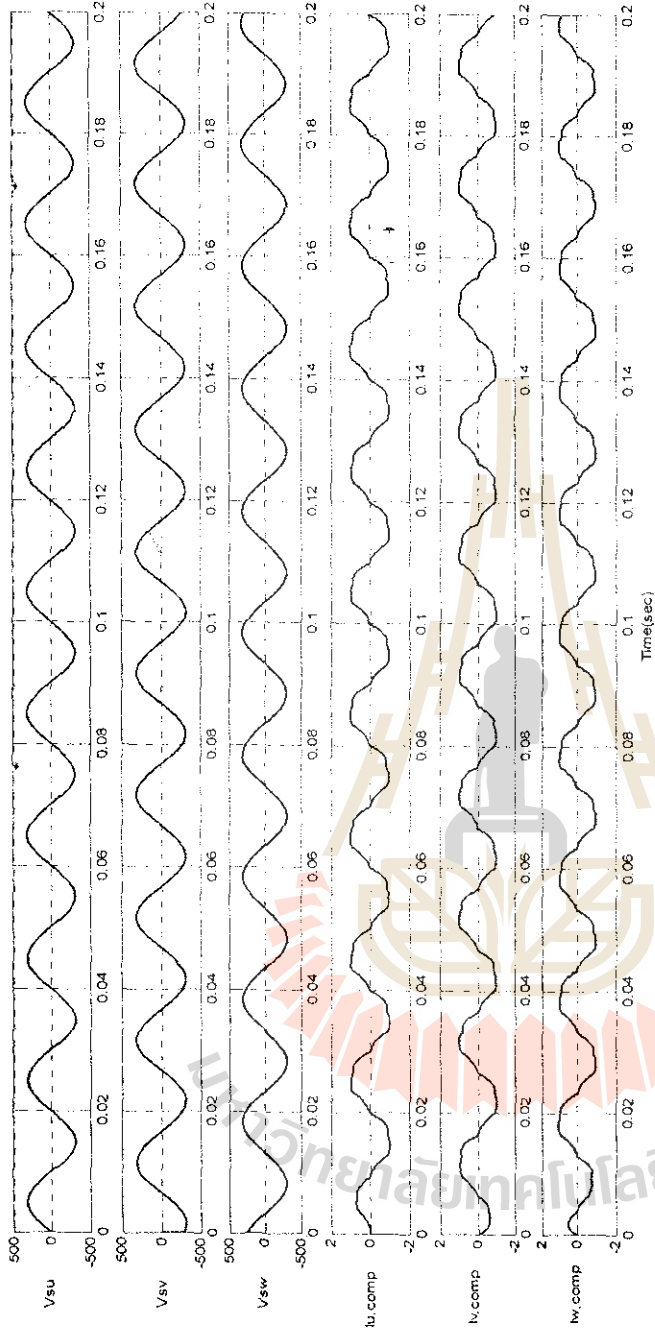


รูปที่ 4.21 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย

จากรูปที่ 4.21 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในการทำงานของเดิวก่อนกับรูปที่ 4.7 ต่างกันเพียงแอมพลิจูดของกระแส



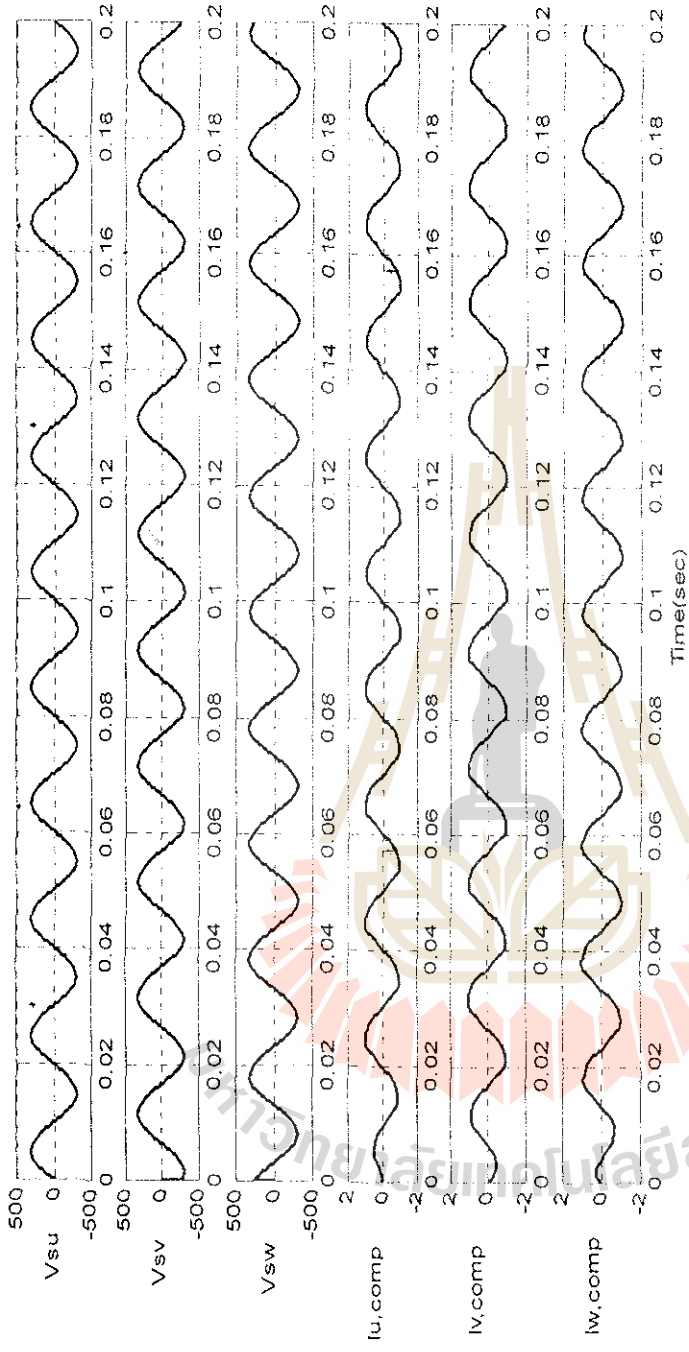
Source – Passive filter1 – Load.



รูปที่ 4.22 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟชนิดที่ 1

จากรูปที่ 4.22 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่ออกแบบให้กำจัดฮาร์โมนิกก่อนดับแต่ประสิทธิภาพการกำจัดยังไม่ใช้ที่ดีที่สุด แต่สามารถกำจัดฮาร์โมนิกไปได้มาก ซึ่งอาจเห็นได้จากรูปคลื่นกระแสที่คล้ายรูปคลื่นไซน์มากขึ้น

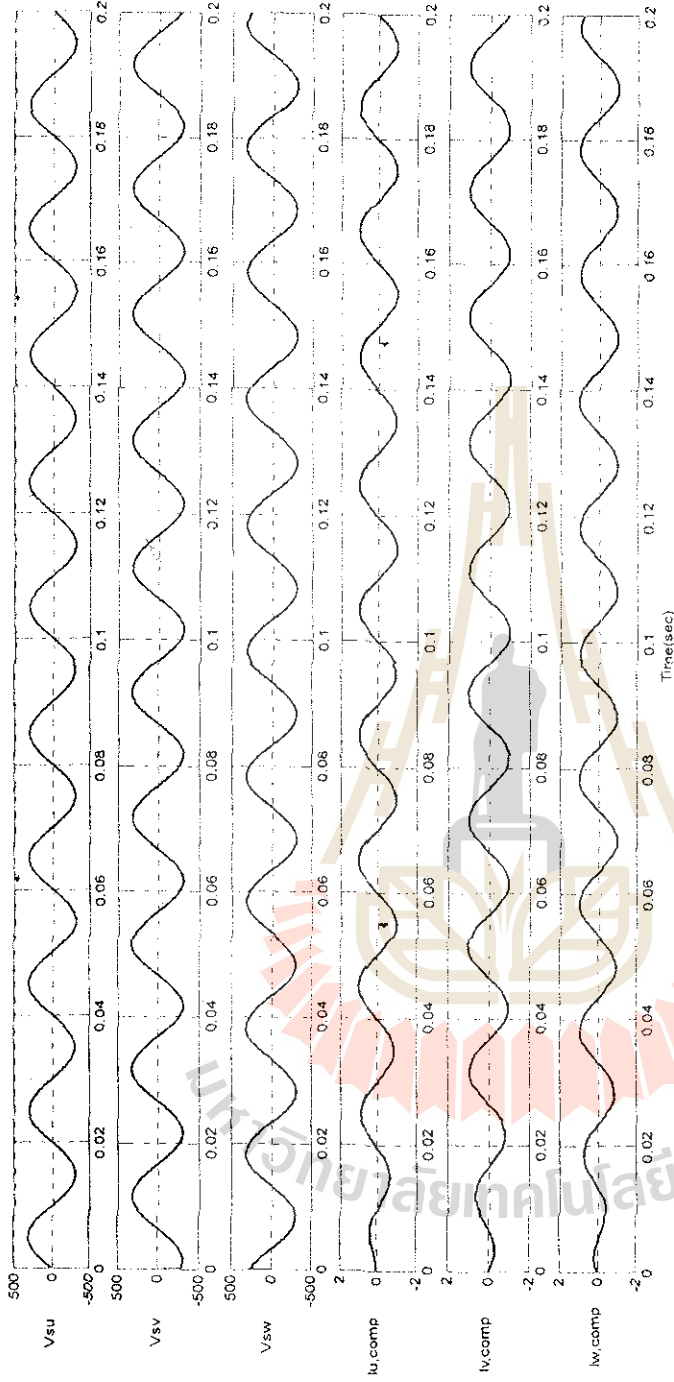
Source – Passive filter2– Load.



รูปที่ 4.23 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรองกำลังพาสซีฟที่ 2

จากรูปที่ 4.23 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.22 แต่รูปคลื่นกระแสและลักษณะรูปคลื่นชานมากขึ้น

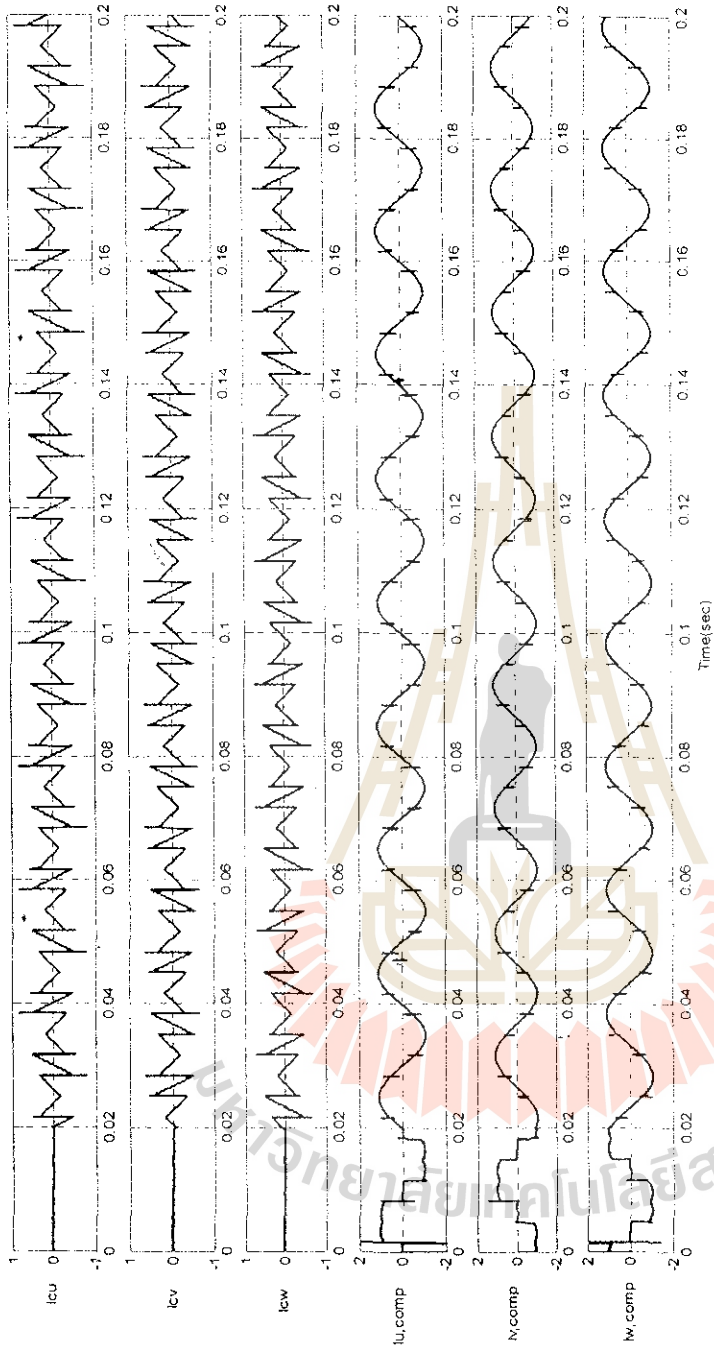
Source – Passive filter3– Load.



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟกรณที่ 3

จากรูปที่ 4.24 ผลการจำลองสถานการณ์ เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่ออกแบบให้กำจัดฮาร์มอนิกทุกอันดับและมีประสิทธิภาพสูง ทำให้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้หมดจนรูปคลื่นกระแสเป็นรูปคลื่นไซน์

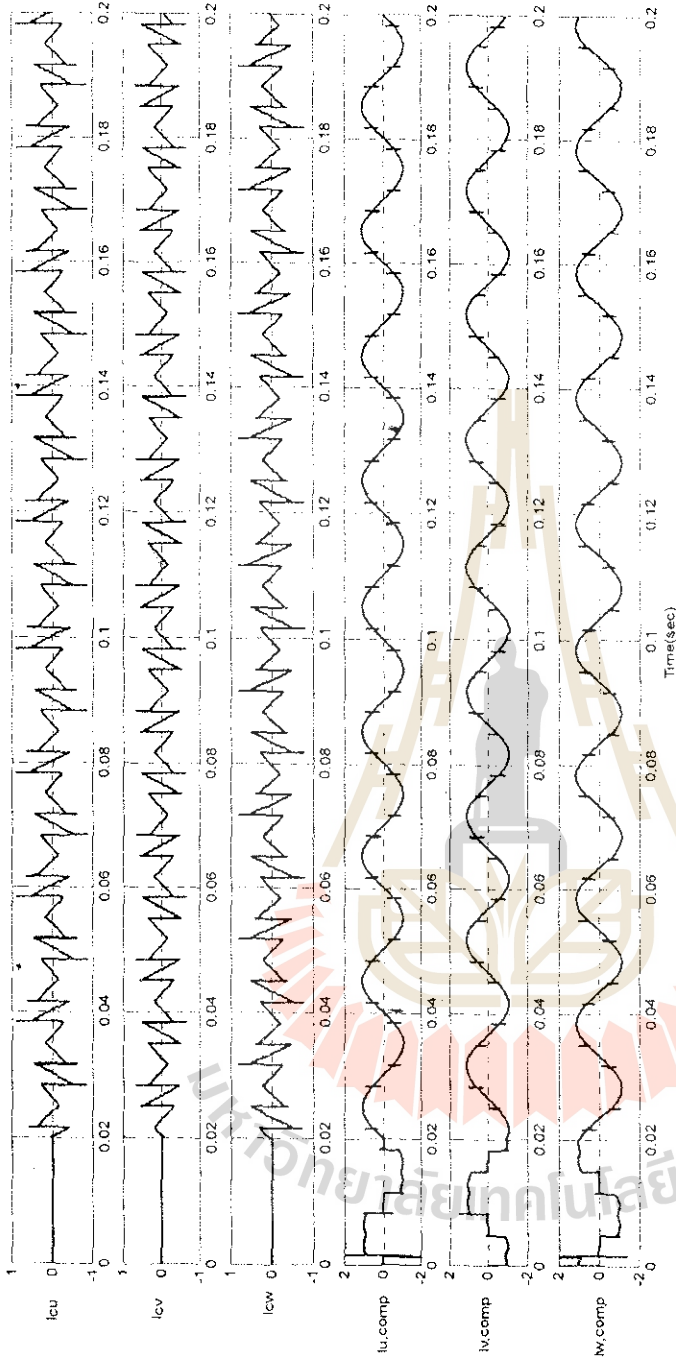
Source -- Active filter (DQF) -- Load.



รูปที่ 4.25 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (DQF)

จากรูปที่ 4.25 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.11 ต่างกันเพียงแอมพลิจูดของกระแส

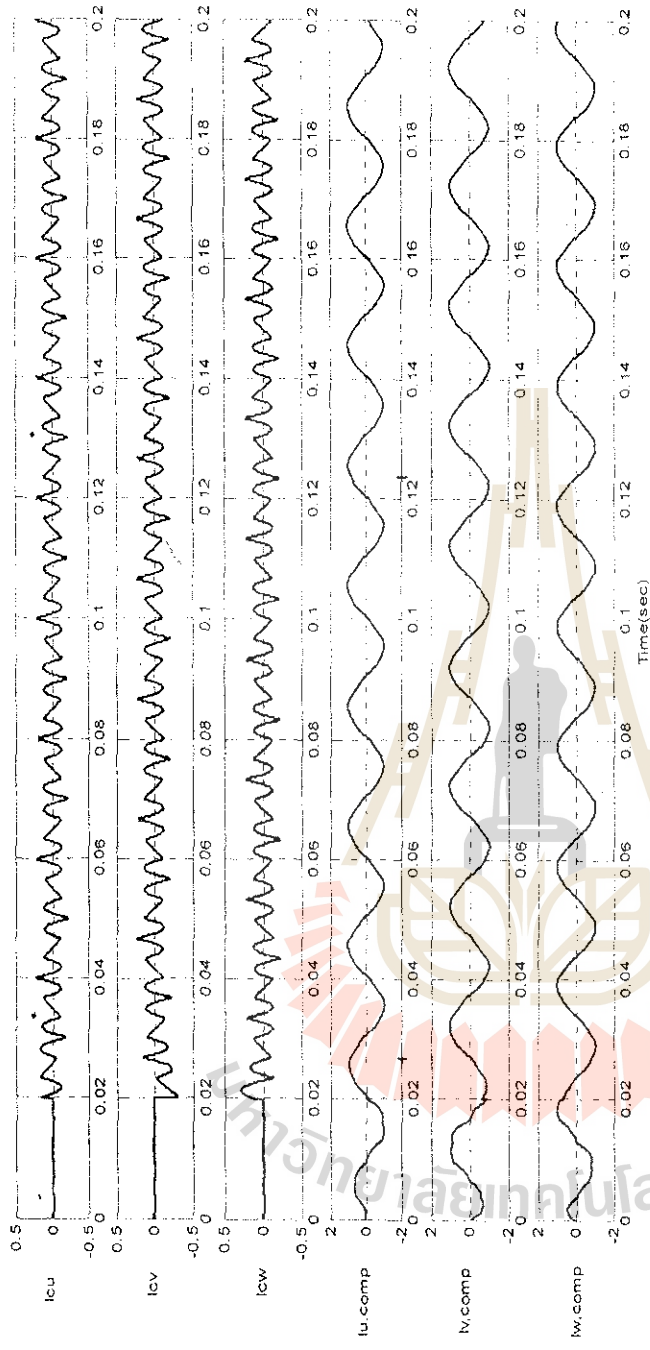
Source – Active filter (SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Load.



รูปที่ 4.26 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$ )

จากรูปที่ 4.26 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.12 ต่างกันเพียงแอมพลิจูดของกระแส

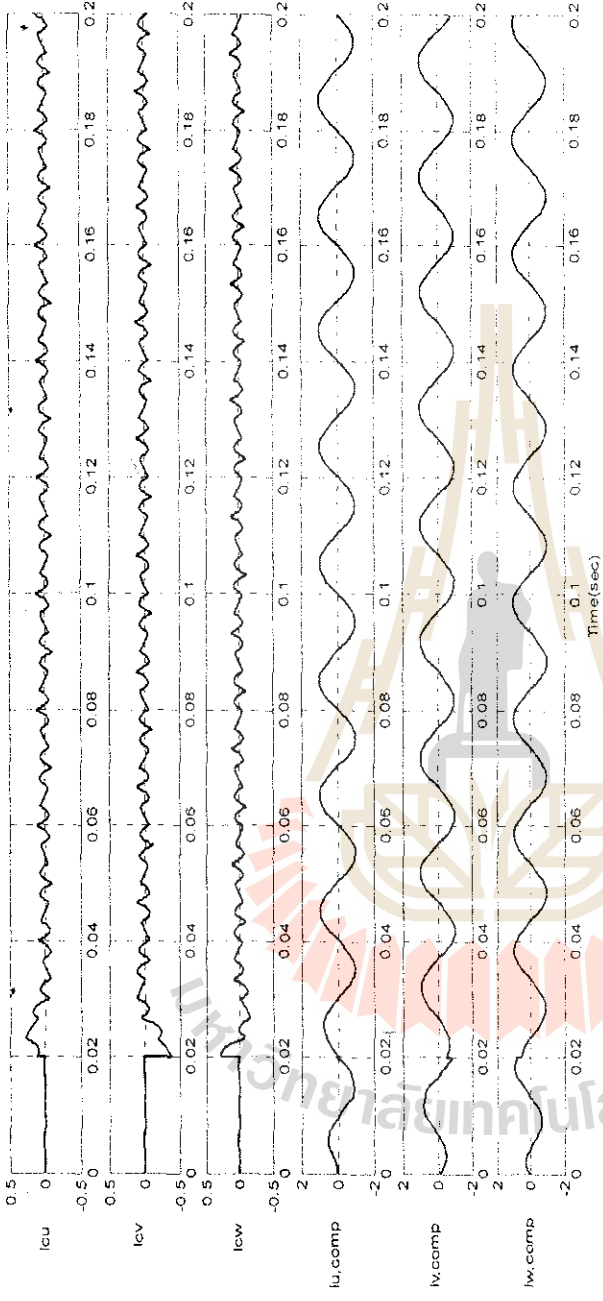
Source – Active Filter(DQF) – Passive Filter I – Load



รูปที่ 4.27 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรองกำลังไฮบริดโดยใช้วงจรองกำลังพาสซีฟกรณีที 1

จากรูปที่ 4.27 ให้ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรองกำลังไฮบริด สามารถนึกถูกกำจัดไปเกือบหมดและรูปคลื่นกระแสที่เปลี่ยนชายน้อยมาก

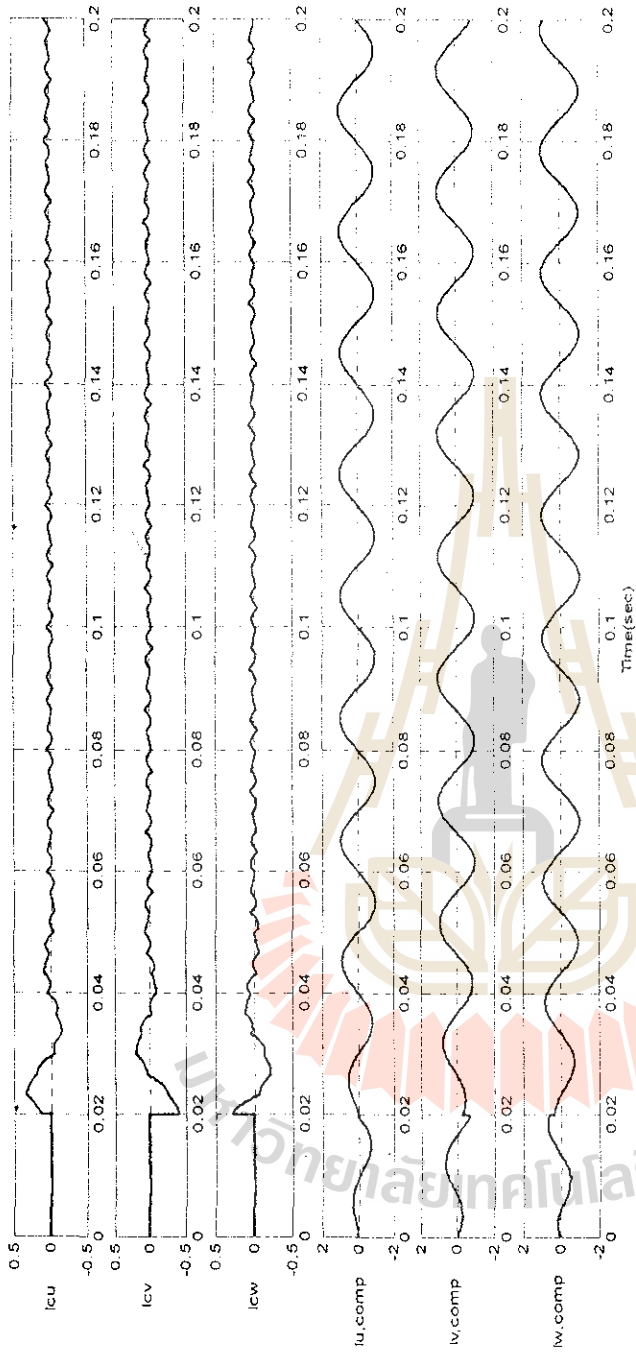
Source -- Active Filter(DQF) – Passive Filter2-- Load



รูปที่ 4.28 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดโดยใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟกรณีที่ 2

จากรูปที่ 4.28 ให้ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริด ฮาร์มอนิกถูกกำจัดไปเกือบหมดและรูปคลื่นกระแสที่คล้ายรูปคลื่นไซน์มาก ในช่วงเริ่มต้นที่ 0.02-0.03 วินาทีกระแสจะสูงเนื่องจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่เพิ่มขึ้น

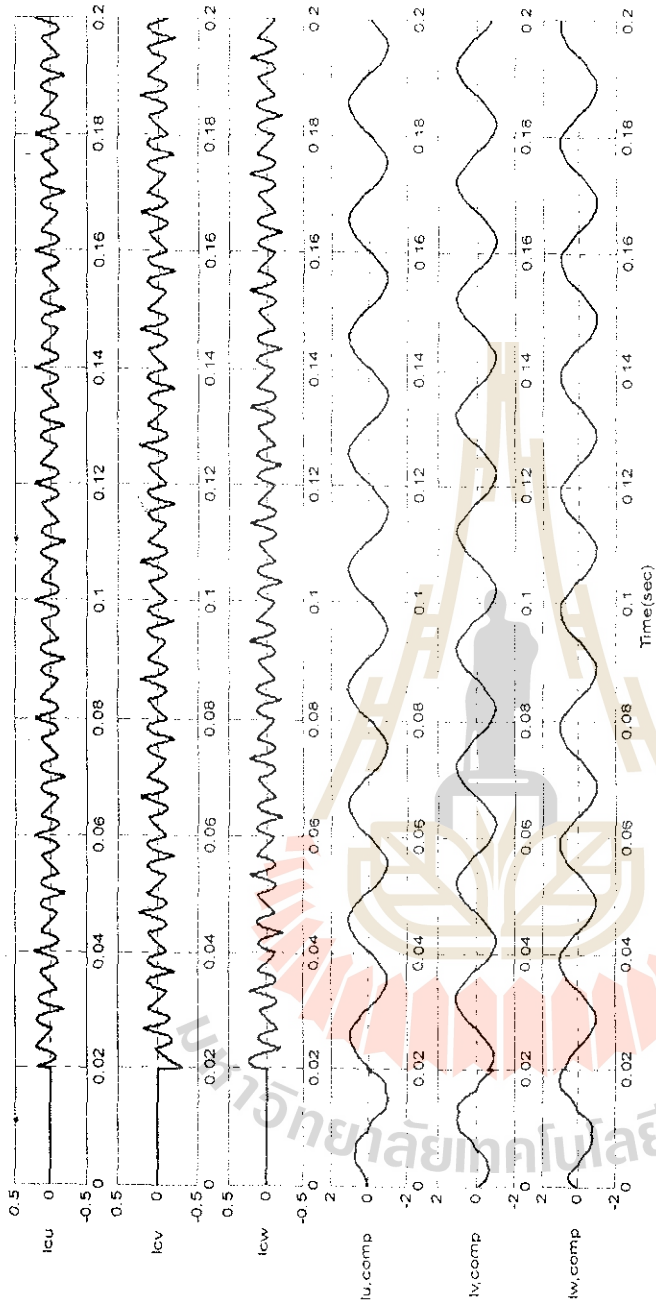
Source – Active Filter(DQF) – Passive Filter3– Load



รูปที่ 4.29 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดโดยใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟกรณีที่ 3

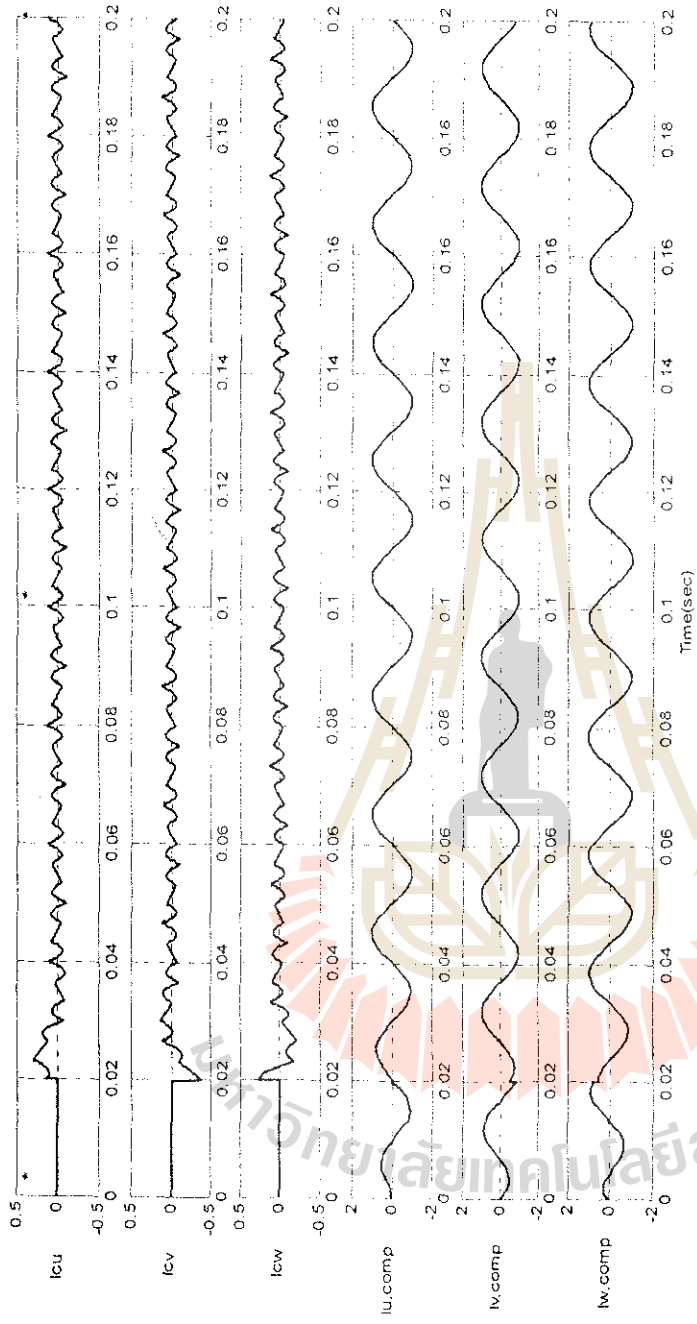
จากรูปที่ 4.29 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.28 ต่างกันเพียงแอมพลิจูดของกระแสและเซย์ในช่วงวินาทีที่ 0.02-0.03 จะสูงกว่าเพราะค่าตัวเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง



Source – Active Filter(SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Passive Filter1– Load

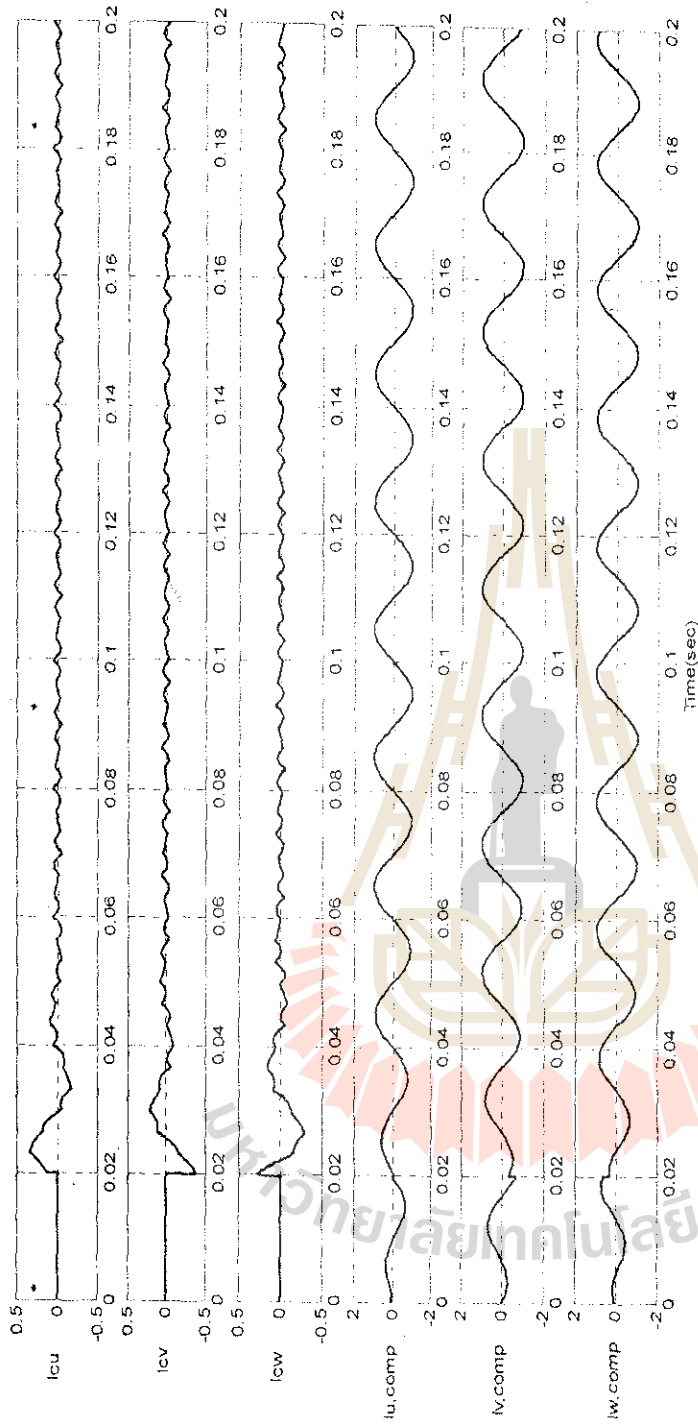
รูปที่ 4.30 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรองกำลังไฮบริดโดยใช้วงจรองกำลังพาสซีฟกรณีที่ 1

จากรูปที่ 4.30 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.27

Source – Active Filter(SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Passive Filter2– Load

รูปที่ 4.31 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรรองกำลังไฮบริดโดยใช้วงจรรองกำลังพาสซีฟกรณีที่ 2

จากรูปที่ 4.31 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในการทำงานของเดียวกับกับรูปที่ 4.28

Source – Active Filter(SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Passive Filter3– Load

รูปที่ 4.32 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรถองกำลังไฮบริดโดยใช้วงจรถองกำลังพาสซีฟประเภทที่ 3

จากรูปที่ 4.32 ให้ผลการจำลองสถานการณ์ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.29

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการจำลองสถานการณ์ทั้งก่อนและหลังการกำจัดสารมอดิก โดยผลที่นำเสนอเป็นค่า %THD<sub>v</sub> ในแต่ละเฟส และค่า %THD<sub>w</sub> เฉลี่ย (%THD<sub>ave</sub>)

วิธีการกำจัดสารมอดิก	%THD <sub>v</sub> เฟส v	%THD <sub>w</sub> เฟส w	%THD <sub>ave</sub> เฉลี่ย
ก่อนการกำจัดสารมอดิก	29.09	29.06	29.07
หลังการขจัดเศษสารมอดิก			
ติดตั้งวงจรรอกกำลังพาสซีฟที่กำจัดสารมอดิกเฉพาะอันดับที่ 5	19.39	19.29	19.39
ติดตั้งวงจรรอกกำลังพาสซีฟที่กำจัดสารมอดิกเฉพาะอันดับที่ 7	25.90	25.88	25.89
ติดตั้งวงจรรอกกำลังพาสซีฟที่กำจัดสารมอดิกเฉพาะอันดับที่ 5,7	17.04	16.93	17.05
ติดตั้งวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (DQF)	1.10	1.10	1.10
ติดตั้งวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$ )	1.10	1.10	1.10
ติดตั้งวงจรรอกกำลังไซบริดกรณีที่ 4.5.1	1.08	1.05	1.07
ติดตั้งวงจรรอกกำลังไซบริดกรณีที่ 4.5.2	1.05	1.04	1.05
ติดตั้งวงจรรอกกำลังไซบริดกรณีที่ 4.5.3	0.74	0.72	0.73
ติดตั้งวงจรรอกกำลังไซบริดกรณีที่ 4.5.4	0.75	0.74	0.74
ติดตั้งวงจรรอกกำลังไซบริดกรณีที่ 4.5.5	1.02	1.03	1.03
ติดตั้งวงจรรอกกำลังไซบริดกรณีที่ 4.5.6	1.02	1.05	1.03
ติดตั้งวงจรรอกกำลังไซบริดกรณีที่ 4.5.7	0.72	0.72	0.72
ติดตั้งวงจรรอกกำลังไซบริดกรณีที่ 4.5.8	0.73	0.72	0.72

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการจำลองสถานการณ์ทั้งก่อนและหลังการกำจัดฮาร์มอนิก โดยแสดงค่ากระแส (I rms) และพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ (VA) ณ จุดต่างๆ

วิธีการกำจัดฮาร์มอนิก	$i_{su}$ (Arms)	$i_{filter,5}$ (Arms)	$i_{filter,7}$ (Arms)	$i_{APF}$ (Arms)	$P_{su}$ (KVA)	$P_{filter,5}$ (VA)	$P_{filter,7}$ (VA)	$P_{APF}$ (VA)
ก่อนการกำจัดฮาร์มอนิก	7.69	-	-	-	1.68	-	-	-
หลังการกำจัดฮาร์มอนิก								
ติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5	7.20	0.96	-	-	1.57	211.20	-	-
ติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 7	7.29	-	0.49	-	1.59	-	107.8	-
ติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับที่ 5,7	7.20	0.97	0.49	-	1.57	213.40	107.8	-
ติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (DQF)	7.05	-	-	2.04	1.54	-	-	446.94
ติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$ )	7.05	-	-	2.04	1.54	-	-	446.70
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดกรณี 4.5.1	6.61	0.42	-	1.92	1.44	92.40	-	420.50
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดกรณี 4.5.2	6.61	0.42	-	1.92	1.45	92.40	-	419.91
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดกรณี 4.5.3	6.64	0.96	-	1.24	1.45	211.20	-	270.70
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดกรณี 4.5.4	6.62	0.96	-	1.24	1.45	211.20	-	270.41
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดกรณี 4.5.5	6.63	0.42	0.30	1.92	1.45	92.40	66.00	420.22
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดกรณี 4.5.6	6.64	0.42	0.30	1.92	1.45	92.40	66.00	419.92
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดกรณี 4.5.7	6.69	0.96	0.48	1.08	1.46	211.2	105.6	235.06
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดกรณี 4.5.8	6.63	0.96	0.49	1.08	1.45	211.2	107.8	235.58

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการจำลองสถานการณ์ทั้งก่อนและหลังการกำจัดฮาร์โมนิก โดยแสดงค่า %THD<sub>v</sub> ในแต่ละเฟส และค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ย (%THD<sub>ave</sub>) ค่ากระแสแอมป์ (rms) และพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ (VA) ณ จุดต่างๆ

วิธีการกำจัดฮาร์โมนิก	%THD <sub>i</sub> เฟส u	%THD <sub>i</sub> เฟส v	%THD <sub>i</sub> เฟส w	%THD <sub>i</sub> เฉลี่ย	i <sub>su</sub> (Arms)	i <sub>APF</sub> (Arms)	P <sub>su</sub> (VA)	P <sub>APF</sub> (VA)
ก่อนการกำจัดฮาร์โมนิก	30.55	30.50	30.64	30.56	0.70	-	154.88	-
หลังการกำจัดฮาร์โมนิก								
ติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟกรณีที่ 1	9.74	9.71	9.73	9.73	0.72	-	157.62	-
ติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟกรณีที่ 2	4.97	4.95	4.97	4.96	0.71	-	155.47	-
ติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟกรณีที่ 3	2.50	2.48	2.50	2.50	0.70	-	154.64	-
ติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (DQF)	4.01	3.95	3.97	3.98	0.76	0.22	168.01	47.28
ติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$ )	4.16	4.00	3.92	4.03	0.76	0.22	166.65	47.97
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริด (DQF กรณีที่ 1)	3.25	3.26	3.24	3.25	0.71	0.09	155.96	20.22
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริด (DQF กรณีที่ 2)	1.67	1.66	1.65	1.66	0.70	0.05	154.31	10.21
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริด (DQF กรณีที่ 3)	0.83	0.84	0.82	0.83	0.70	0.02	153.61	5.11
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริด (SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$ กรณีที่ 1)	3.23	3.24	3.25	3.24	0.71	0.09	155.97	20.23
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริด (SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$ กรณีที่ 2)	1.64	1.65	1.66	1.65	0.70	0.05	154.31	10.21
ติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริด (SWFA บนแกน $\alpha, \beta, 0$ กรณีที่ 3)	0.83	0.82	0.84	0.83	0.70	0.02	153.61	5.11

#### 4.7 อภิปรายผล

การจำลองสถานการณ์ของระบบก่อนการชดเชย ที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นในที่นี้คือวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับโหลดความต้านทานให้ผลการจำลองที่แสดง รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ( $V_{su}, V_{sv}$  และ  $V_{sw}$ ) ที่คงความเป็นชานซ์ ขณะที่กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย ( $i_{su,uncomp}, i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$ ) มีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นชานซ์เนื่องจากผลของฮาร์มอนิก เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟโดยออกแบบให้กำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ซึ่งเป็นอันดับฮาร์มอนิกที่มีมากในโหลดลักษณะนี้ ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองแล้วปรากฏปริมาณฮาร์มอนิกในกระแสลดลง เห็นได้จากรูปคลื่นกระแสมีความคล้ายรูปคลื่นชานซ์มากขึ้น แต่เนื่องจากมีฮาร์มอนิกอันดับอื่นปะปนอยู่ด้วยในระบบ ทำให้ฮาร์มอนิกหลงเหลืออยู่ รวมถึงความไม่สมบูรณ์แบบในการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองด้วย เห็นได้จากกระแสที่ไหลผ่านวงจรกรองยังมีกระแสที่ความถี่มูลฐานและความถี่อื่นปะปนอยู่ ทำให้การกำจัดฮาร์มอนิกลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อทำการติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้กับระบบ โดยกระแสชดเชยที่ฉีดให้กับระบบจะฉีดแบบอุดมคติ คือกระแสที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกจะนำมาหักลบกับกระแสที่ไหลเข้าโหลด เพื่อให้ได้กระแสที่แหล่งจ่ายที่ไม่มีฮาร์มอนิกปะปนอีก การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบกับ 2 วิธีด้วยกันคือ วิธี DQF และที่คณะวิจัยพัฒนาขึ้นเป็นวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเห็นชัดว่าทั้งสองวิธีให้การกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีมากเท่าเทียมกัน โดยปริมาณฮาร์มอนิกมีหลงเหลืออยู่น้อยมากรวมถึงรูปคลื่นกระแสก็มีความเป็นรูปคลื่นชานซ์ เมื่อนำวงจรกรองกำลังพาสซีฟและวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตั้งกล่าวมาข้างต้น มาติดตั้งร่วมกันเป็นวงจรกรองกำลังไฮบริดแบบที่ 1 ซึ่งทำการจำลองสถานการณ์หลายกรณีด้วยกัน กรณีที่ให้ผลดีที่สุดคือติดตั้งวงจรกรองในระบบเป็นลำดับดังนี้ Source – Active Filter (SWFA on  $\alpha, \beta, 0$ ) – Passive Filter order 5&7 – Load. โดยส่วนของวงจรกรองกำลังพาสซีฟได้ช่วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟในการกำจัดฮาร์มอนิกในบางส่วน ทำให้กระแสชดเชยที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟต้องฉีดชดเชยให้ระบบนั้นลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟอย่างเดียว รวมถึงการติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดแบบดังกล่าวเป็นแบบที่เหมาะสม เนื่องจากวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่อยู่ด้านหน้าโหลด จะทำหน้าที่กำจัดฮาร์มอนิกก่อนที่ฮาร์มอนิกที่เหลือจากวงจรกรองกำลังพาสซีฟทั้งหมด จะถูกกำจัดโดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟต่อไป และในส่วนของวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกทั้งสองวิธีคือ DQF และ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  ให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพเท่าเทียมกัน ต่างกันตรงที่วิธี SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  มีความเร็วในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่เร็วกว่า เนื่องจากการคำนวณไม่จำเป็นต้องแปลงแกนจากแกน  $\alpha, \beta, 0$  ไปเป็นแกน DQ

การจำลองสถานการณ์เมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดแบบที่ 2 ที่ประกอบด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรมที่ออกแบบให้กำจัดฮาร์มอนิกทุกอันดับ ใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลัง

แอกทีฟ การจำลองสถานการณ์ได้แบ่งเป็นกรณีตามประสิทธิภาพในการกรองของวงจรกรองกำลังพาสซีฟ เมื่อประสิทธิภาพในการกรองของวงจรกรองพาสซีฟมีมาก การกำจัดฮาร์มอนิกก็ดีมากตามไปด้วย รวมไปถึงกำลังไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอกทีฟก็ลดลง ซึ่งมีประโยชน์ในการลดต้นทุนในการสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

วงจรกรองกำลังไฮบริดทั้ง 2 รูปแบบที่นำเสนอมาได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็นหลายกรณีเพื่อให้ได้รูปแบบวงจรกรองไฮบริดที่ดีที่สุด รูปแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรมให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพดีมาก ทั้งด้านการกำจัดฮาร์มอนิกและช่วยลดกำลังไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้เกือบถึง 90% การวางตำแหน่งติดตั้ง Source – Active Filter – Passive Filter – Load เป็นลำดับที่เหมาะสมตามลำดับหน้าที่การกำจัดฮาร์มอนิก อีกส่วนหนึ่งคือการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  ที่พัฒนาขึ้นนั้นให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิผล ทั้งด้านการกำจัดฮาร์มอนิกที่เท่ากับวิธี DQF แต่มีความซับซ้อนน้อยกว่าในขั้นตอนการแปลงแกน





## บทที่ 5

### ผลการทดลองและการกำจัดฮาร์โมนิก

#### 5.1 กล่าวนำ

บทนี้นำเสนอเนื้อหาผลการทดสอบ และอภิปรายผล วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  โดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟในการทดสอบภาคปฏิบัติยังคงเป็นระบบเดิมที่ใช้กับงานวิจัย DQF ส่วนวงจรกรองกำลังพาสซีฟในที่นี้ใช้แบบอนุกรมซึ่งให้ผลการจำลองที่ดีจากบทที่ผ่านมาโดยทำการออกแบบและสร้างขึ้นใหม่เพื่อทดสอบวงจรกรองทั้งสองเป็นแบบไฮบริด ซึ่งในที่นี้มีโพลไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในการทดสอบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโพลเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และโพลเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นตัวแทนของโหลดทางไฟฟ้ากำลังเช่น เครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น

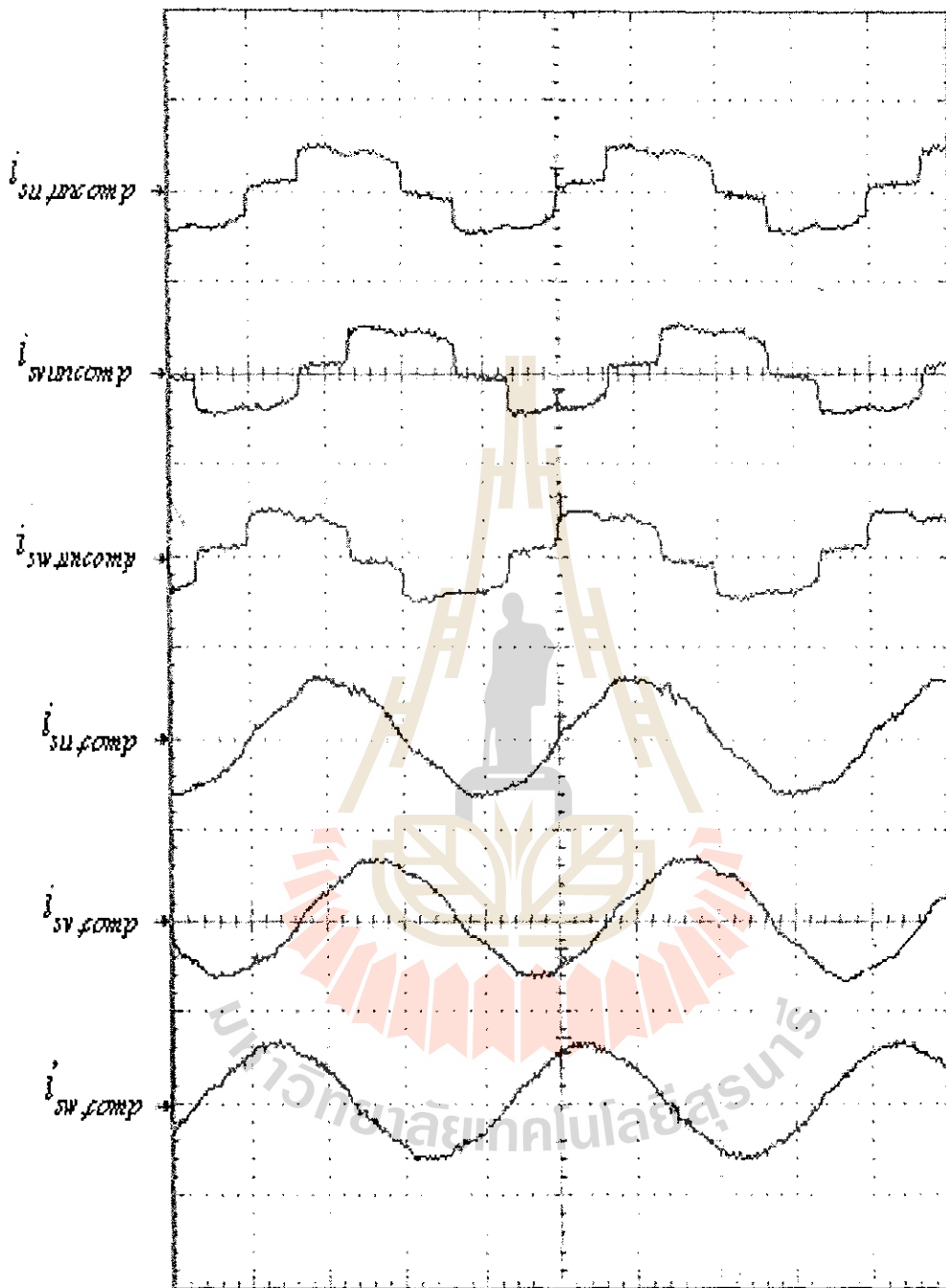
#### 5.2 ผลการทดสอบกรณีโพลของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิก ที่นำเสนอในหัวข้อนี้ ระบบที่ใช้ในการทดสอบมีโพลไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโพลหนึ่งจุดเป็นความต้านทาน การทดสอบดังกล่าวมีการลดพิคกแรงดันไฟฟ้าของระบบสามเฟส จาก 220 โวลต์อาร์เอ็มเอสในแต่ละเฟส เหลือเพียง 50 โวลต์อาร์เอ็มเอส ทั้งนี้เพื่อลดพิคกของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับการสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟและเพื่อความปลอดภัย ความต้านทานหนึ่งจุดที่เป็น โพลของวงจรเรียงกระแสมีขนาด 900 โอห์ม รูปที่ 5.1 แสดงแผนภาพของระบบค้นแบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อการทดสอบนี้ [1] การวัดปริมาณฮาร์โมนิกใช้ FLUKE 434 แสดงผลในรูป %THDi ส่วนวงจรกรองกำลังพาสซีฟ

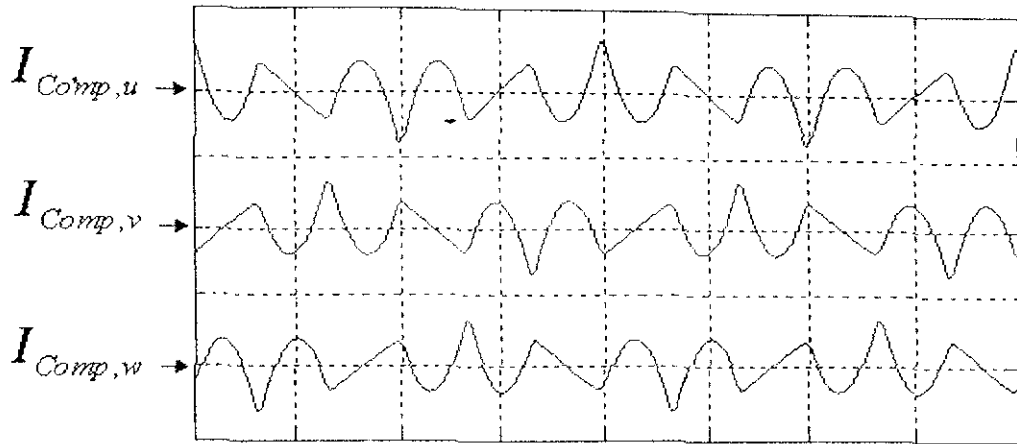


รูปที่ 5.1 ระบบที่ใช้ทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกของงานวิจัย

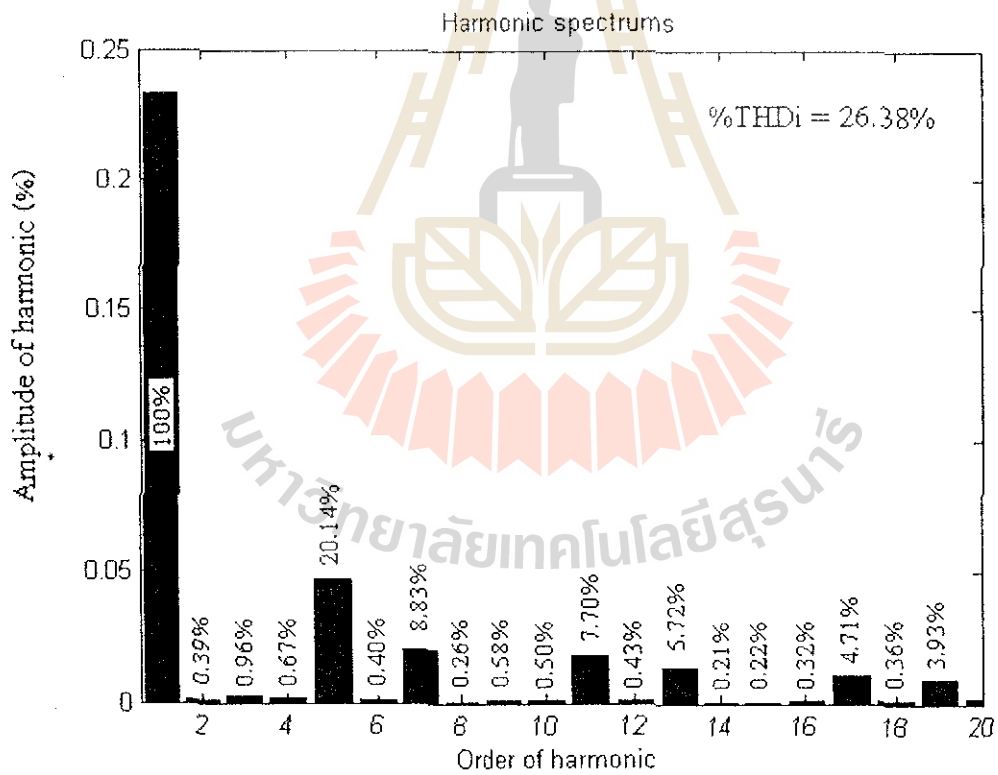
แบบอนุกรมใช้การออกแบบดังที่กล่าวถึงในบทที่ 4 โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้มีดังนี้ ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.5 H ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 20  $\mu F$



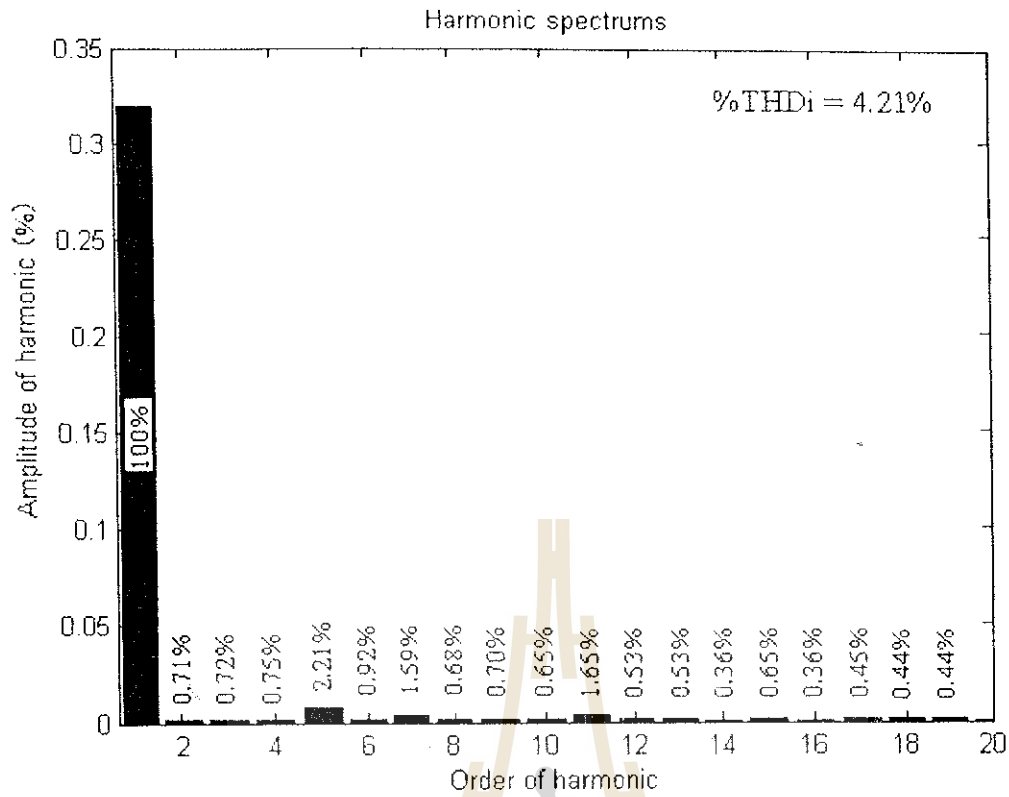
รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว (สเกลในแกนนอนเท่ากับ 5ms/div. แกนตั้งเท่ากับ 0.5A/div.)



รูปที่ 5.3 รูปสัญญาณกระแสชดเชยที่ได้จากวงจรกรองกำลังแอกทีฟ กรณีโหลดเป็นวงจรเรียง  
กระแสต่อกับโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว  
(สเกลในแกนนอนเท่ากับ 5ms/div. แกนตั้งเท่ากับ 0.02A/div.)



ก) ก่อนการชดเชย



ข) หลังการชดเชย

รูปที่ 5.4 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเฟส u ก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

ผลการทดสอบของระบบเมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสและตัวต้านทาน ได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 สเกลแกนนอนของรูปที่ 5.2 เป็น 5 มิลลิวินาทีต่อช่อง ในขณะที่สเกลแกนตั้งเป็น 0.5 แอมแปร์ต่อช่อง จากรูปดังกล่าว กระแสไฟฟ้าก่อนการชดเชย ( $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$ ) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณชายน้ โดยที่ค่า %THDi ในแต่ละเฟสดูได้จากตารางที่ 5.1 ค่า %THDi เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 26.38 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายหลังการชดเชยฮาร์มอนิก รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าหลังการชดเชย ( $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$ ) มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณชายน้บริสุทธิ์อย่างมาก ข้อมูลด้าน %THDi ในแต่ละเฟส และ %THDi เฉลี่ยหลังการชดเชยดูได้จากตารางที่ 5.1 ค่า %THDi เฉลี่ยหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 4.21 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการชดเชย เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการชดเชยของเฟส u ไปวิเคราะห์สเปกตรัม เพื่อดูปริมาณ ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 5.4 แกนนอนของรูปดังกล่าว คือลำดับฮาร์มอนิก (h) แกนตั้ง คือ ค่ากระแสสูงสุดแต่ละลำดับฮาร์มอนิก ( $I_h$ ) จากรูปที่ 5.4 สังเกตได้

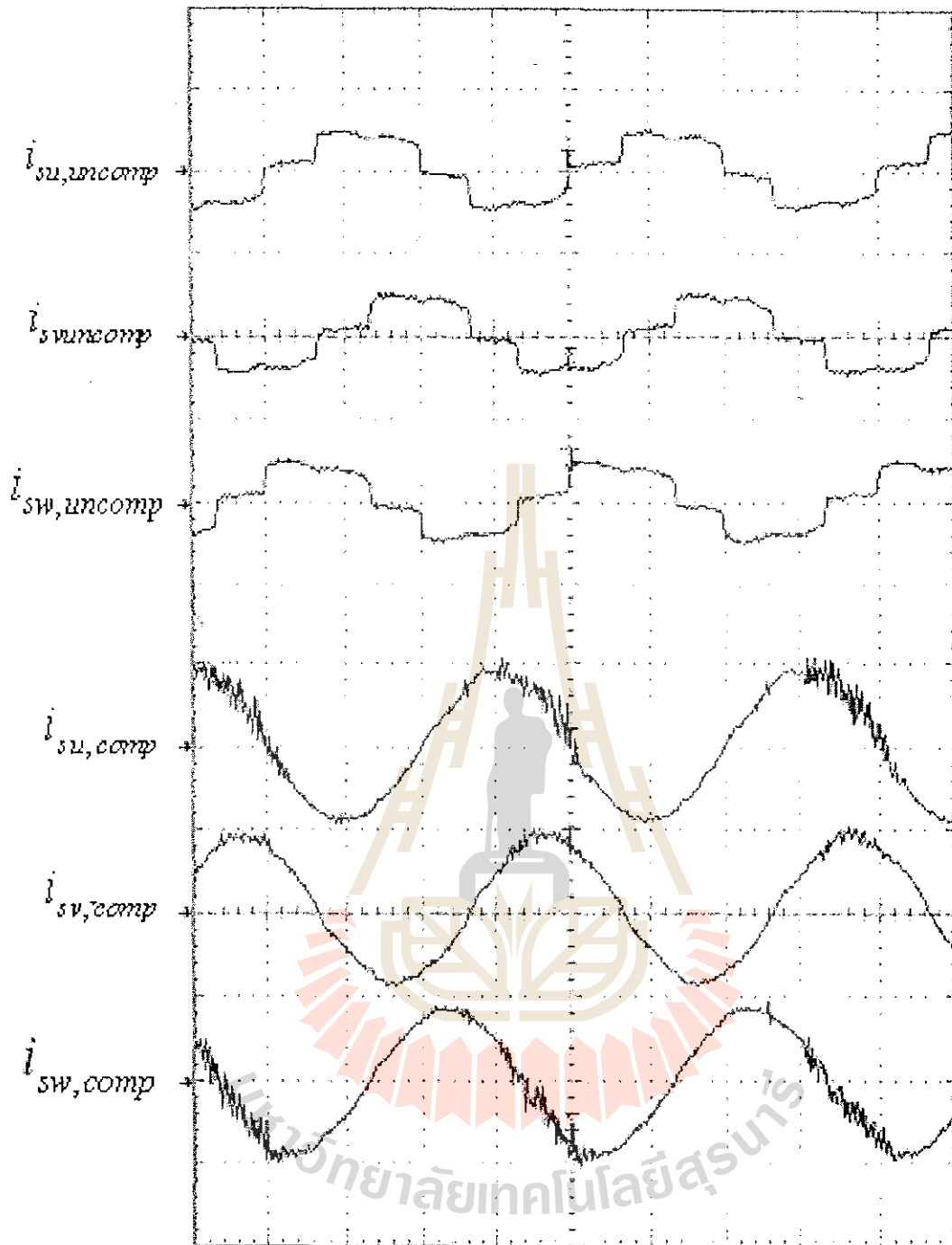
ว่าก่อนการชดเชย ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 7 11 13 17 19 มีปริมาณมากอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับปริมาณฮาร์มอนิกที่ลำดับอื่นๆ และมีค่าเกินกรอบที่มาตรฐาน IEEE Std.519-1992 แต่ภายหลังการชดเชย ปริมาณ ฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆเหล่านี้มีค่าลดลงอย่างมากโดยปริมาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีค่าลดลงจาก 20.14 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 2.21 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 7 ลดลงจาก 8.83 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 1.59 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 11 ลดลงจาก 7.70 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 1.65 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 13 ลดลงจาก 5.72 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.53 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 17 ลดลงจาก 4.71 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.45 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 19 ลดลงจาก 3.93 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.44 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งภายหลังการชดเชย ปริมาณ ฮาร์มอนิกที่ลำดับต่าง ๆ และค่า%THDi อยู่ในกรอบมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 ส่วนผลการวิเคราะห์สเปกตรัม เพื่อดูปริมาณฮาร์มอนิกสำหรับเฟส v และ w จะมีลักษณะในทำนองเดียวกับเฟส u จึงไม่นำเสนอไว้ ณ ที่นี้ อาจกล่าวได้ว่า ผลการทดสอบทางปฏิบัติในกรณีนี้ ให้ผลดีที่น่าพึงพอใจมากตลอดจนผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในสถานะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

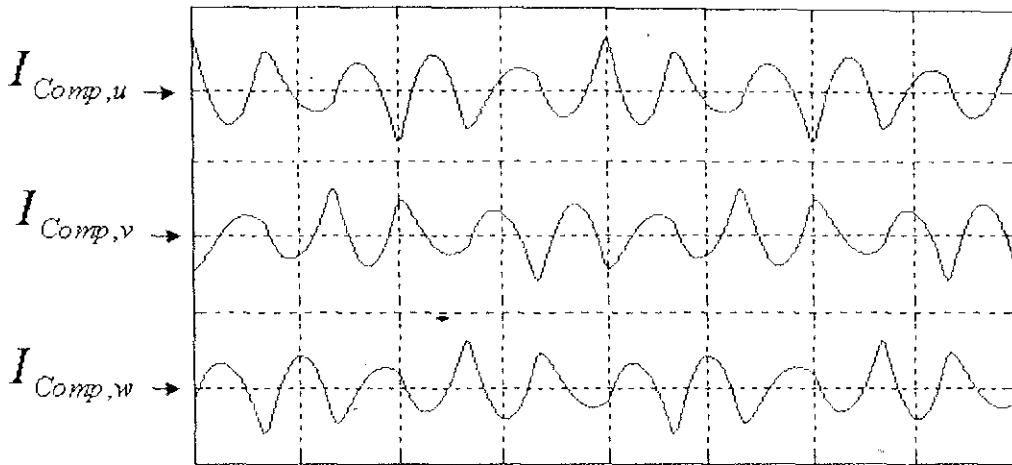
สถานะของระบบ	%THDi เฟส u	%THDi เฟส v	%THDi เฟส w	%THDi เฉลี่ย
ก่อนการชดเชย	26.44	26.38	26.32	26.38
หลังการชดเชย	4.44	4.38	3.81	4.21

### 5.3 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

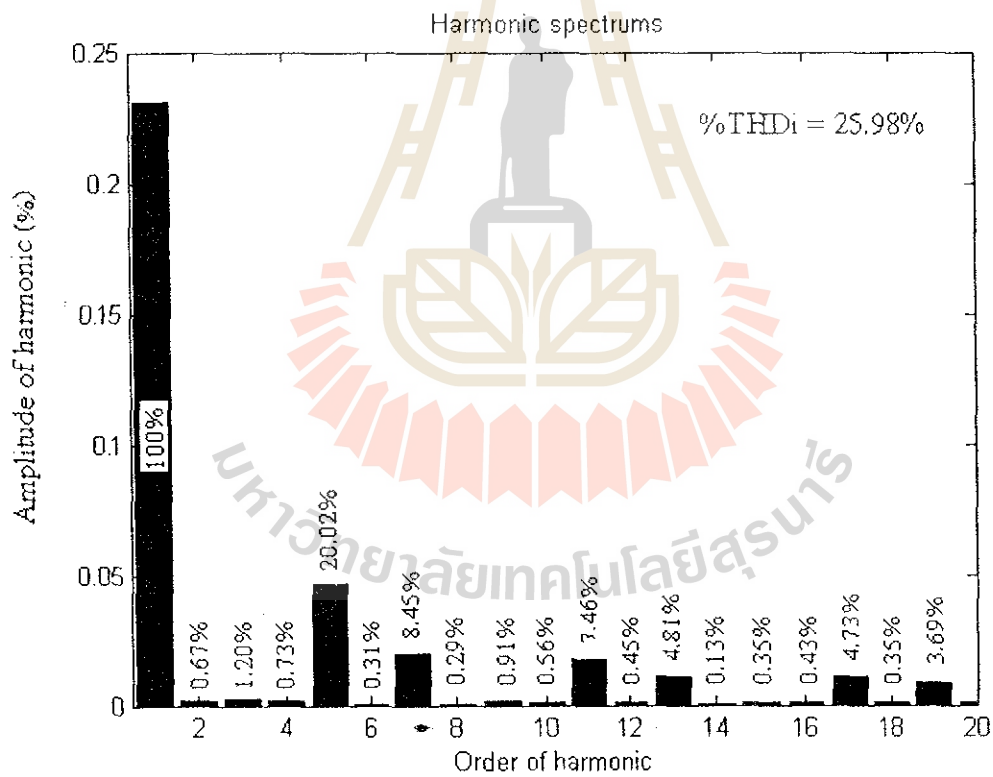
ระบบที่ใช้ในการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในหัวข้อนี้ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดหนึ่งชุดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งแทนหรือเทียบเท่ากับโหลดทางกลไฟฟ้าเช่นมอเตอร์ เพื่อทดสอบผลดูประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกในเชิงปฏิบัติจริงมากขึ้น พิกัดแรงดันที่ใช้ในการทดสอบเหมือนกันกับที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ความต้านทานที่ใช้เป็นโหลดให้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีขนาด 900 โอห์ม ในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำมีขนาด 1.95 เฮนรี รูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ที่บันทึกไว้จากการทดสอบได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 5.5 ซึ่งสังเกตได้ว่ากระแสไฟฟ้าก่อนการชดเชยมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ มีค่า %THDi เฉลี่ยก่อนการชดเชยเท่ากับ 25.98 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 5.2 ภายหลังจากการชดเชยกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์อย่างมาก ซึ่งค่า %THDi เฉลี่ยหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 4.85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับสถานะ



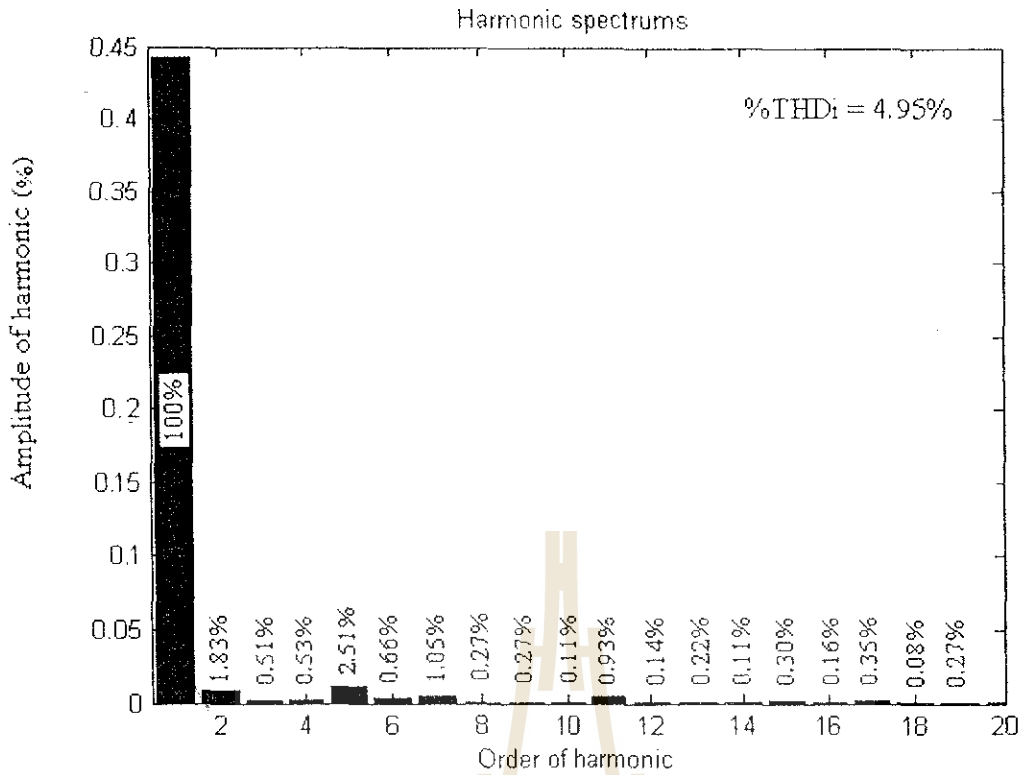
รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบกรณีไหลของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ  
(สเกลในแกนนอนเท่ากับ 5ms/div. แกนตั้งเท่ากับ 0.5A/div.)



รูปที่ 5.6 รูปสัญญาณกระแสชดเชยที่ได้จากวงจรกรองกำลังแยกที่ฟิกรณีโหลด เป็นวงจรเรียงกระแสต่อกับโหลดความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ (สเกลในแกนนอนเท่ากับ 5ms/div. แกนตั้งเท่ากับ 0.02A/div.)



ก) ก่อนการชดเชย



ข) หลังการชดเชย

รูปที่ 5.7 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเฟส u ก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

ก่อนการชดเชย อย่างไรก็ตามอาจสังเกตเห็นสัญญาณรบกวนความถี่สูงปรากฏขึ้นบนรูปคลื่นของกระแสที่ผ่านการชดเชยแล้วการรบกวนเหล่านี้เกิดจากการสวิตช์ที่ไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์สวิตชิงเมื่อดำเนินการวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิก ก่อนและหลังการชดเชยของเฟส u ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อก่อนหน้านี้ จะได้สเปกตรัมดังรูปที่ 5.7 โดยก่อนการชดเชยปริมาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 7 11 13 17 และ 19 มีค่าเกินขอบเขตมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 อยู่มาก แต่หลังการชดเชย ปริมาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีค่าลดลงจาก 20.02 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 2.51 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 7 ลดลงจาก 8.45 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 1.05 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 11 ลดลงจาก 7.46 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.93 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 13 ลดลงจาก 4.81 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.22 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 17 ลดลงจาก 4.73 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.35 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 19 ลดลงจาก 3.69 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.27 และอาจสังเกตเห็นว่ามีฮาร์มอนิกอันดับคู่เกิดขึ้นเช่น อันดับที่ 2 และ 4 ซึ่งสอดคล้องกับการปรากฏของสัญญาณรบกวนความถี่สูง อย่างไรก็ตาม จากผลดังกล่าวข้างต้นปริมาณ ฮาร์มอนิกเหล่านี้ มีค่าลดลง และอยู่ในกรอบมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 ส่วนผลการวิเคราะห์



สเปกตรัมเพื่อดูปริมาณฮาร์มอนิกสำหรับเฟส v และ w จะมีลักษณะในทำนองเดียวกันกับเฟส u จึงไม่ได้นำเสนอไว้ ณ ที่นี้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

สภาวะของระบบ	%THDi เฟส u	%THDi เฟส v	%THDi เฟส w	%THDi เฉลี่ย
ก่อนการชดเชย	26.21	25.90	25.83	25.98
หลังการชดเชย	4.95	4.86	4.74	4.85

#### 5.4 สรุป

ผลทดสอบในทางปฏิบัติของการใช้วิธี SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกควบคู่กับวงจรกรองกำลังไฮบริดให้ผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจอย่างมาก ทั้งในกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งก่อนการชดเชยค่า %THDi เฉลี่ยมีค่ามากกว่า IEEE Std.519-1992 อยู่มากทั้งสองกรณี ภายหลังเมื่อชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริด ปรากฏว่า รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงความเป็นสัญญาณชายนับริสุทธิ์อย่างมากและค่า %THDi เฉลี่ยหลังการชดเชยอยู่ในขอบเขตมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 อาจกล่าวได้ว่า ในภาพรวมปริมาณฮาร์มอนิกมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกให้กับวงจรกรองกำลังไฮบริดซึ่งเป็นวงจรกรองที่มีโครงสร้างผสมผสานทั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟและแอคทีฟ วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบต่าง ๆ มีส่วนในการช่วยลดขนาดของกระแสและแรงดันที่ความถี่มูลฐานเพื่อลดพิคค่ากำลังไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอคทีฟ เมื่อนำวงจรทั้งสองติดตั้งทำงานแบบไฮบริดก็จะทำให้การกำจัดฮาร์มอนิกมีประสิทธิภาพมากขึ้น การระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกให้กับวงจรกรองกำลังไฮบริดในที่นี้ได้พัฒนามาจากวิธี DQF คัดแปลงโดยการตัดการแปลงแกนหมุน  $d-q$  ออกเรียกวิธีใหม่นี้ว่าวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  ซึ่งอัลกอริทึมใหม่มีโครงสร้างหลักเป็นการวิเคราะห์ฟูริเยร์ SWFA กระทำกับกระแสไฟฟ้าสเปสเวกเตอร์  $(\alpha, \beta, 0)$  จึงเรียกวิธีการใหม่นี้ว่า space - vector with Fourier method หรือ วิธี SVF แนวทางใหม่นี้มีหนทางการคำนวณง่ายกว่า DQF มีความซับซ้อนน้อยกว่า อีกทั้งวิธี SWFA มีความถูกต้องในการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกสูง และมีความอ่อนตัวในการปรับใช้เพื่อการกำจัดฮาร์มอนิกแบบกลุ่มหรือแบบเจาะจงอันดับตลอดจนข้อดีของการคิดกระแสอันดับศูนย์ยังช่วยในเรื่องของความไม่สมดุลของระบบ ทำให้การฉีดกระแสชดเชยสามารถกระทำได้อย่างถูกต้อง รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการระบุนอกลักษณะด้วยวิธี DQF กับวิธีประยุกต์ SWFA บนแกน  $\alpha, \beta, 0$  หรือ SVF นั้นเปรียบเทียบโดยใช้ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่พิจารณาแบบจำลองของวงจรกรองในส่วนของวงจรกรองกำลังแอคทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ที่กำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียวโดยยังไม่คำนึงถึงข้อจำกัดในทางปฏิบัติของวงจรกรองกำลัง คำนึงถึงสมรรถนะของวิธีการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกพิจารณาจากค่า %THDi หลังการกำจัดฮาร์มอนิกเป็นสำคัญ การจำลองสถานการณ์ได้พิจารณาระบบ 2 รูปแบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นคือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียวโดยความต้านทานในที่มีค่าเท่ากับ 50 และ 600 โอห์ม ไม่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุในการปรับเรียบแรงดัน จึงจัดเป็นโหลดในกลุ่มแหล่งจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (current - source nonlinear load, CSNL) ที่ทำให้เกิดเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกในระบบเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยนี้มีกรอบของการศึกษาวิจัยในด้านการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเป็นการ โดยเฉพาะ จึงยังไม่พิจารณาผลเนื่องจากแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า กรณีโหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานที่มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม %THDi เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 29.07 เปอร์เซ็นต์ แต่

ภายหลังเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานซึ่งออกแบบให้กำจัดฮาร์โมนิกที่อันดับ 5 และ 7 มีค่า %THDi เหลือหลังการติดตั้งวงจรกรอง เท่ากับ 17.05 เปอร์เซ็นต์ และกรณีติดตั้งวงจรกรองแยกที่ฟ โดยใช้วิธี DQF และ SVF ในการระบุดอกลักษณะให้ผลหลังการชดเชย %THDi เหลือเท่ากับ 1.10 เปอร์เซ็นต์ เท่ากันทั้งสองวิธี กรณีติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดโดยประกอบด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนานออกแบบให้กำจัดฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 กับ 7 และวงจรกรองกำลังแยกที่ฟที่ใช้วิธี DQF และ SVF ในการระบุดอกลักษณะโดยลำดับในการติดตั้งวงจรกรองกำลังที่ให้ผลที่ดีที่สุดคือเรียงลำดับการติดตั้งจาก Source - Active Filter - Passive Filter - Load ซึ่งให้ผลหลังการชดเชยมี %THDi เหลือเท่ากับ 0.72 เปอร์เซ็นต์ เท่ากันทั้งสองวิธี รวมถึงกำลังไฟฟ้าที่วงจรกรองกำลังแยกที่ฟ ก็ลดลงเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งช่วยลดพิคต์กำลังไฟฟ้าและต้นทุนในการผลิตได้ดีกว่าใช้วงจรกรองกำลังแยกที่ฟแต่เพียงอย่างเดียว กรณีโหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานที่มีค่าเท่ากับ 600 โอห์ม %THDi เหลือก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 30.56 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายหลังเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบอนุกรมซึ่งออกแบบให้กำจัดฮาร์โมนิกทุกอันดับโดยผลการกำจัดฮาร์โมนิกขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้น ยังมีค่ามากกว่าการกำจัดฮาร์โมนิกที่ยังดีขึ้นตามไปด้วย แต่การที่ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากทำให้ต้นทุนของวงจรกรองมากขึ้นด้วย ที่ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 2.0 เฮนรี ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 5 ไมโครฟารัด ภายหลังการชดเชย %THDi เหลือหลังการติดตั้งวงจรกรอง เท่ากับ 2.50 เปอร์เซ็นต์ และกรณีติดตั้งวงจรกรองกำลังแยกที่ฟโดยใช้วิธี DQF และ SVF ในการระบุดอกลักษณะให้ผลหลังการชดเชย %THDi เหลือเท่ากับ 3.98 เปอร์เซ็นต์ และ 4.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ กรณีติดตั้งวงจรกรองกำลังทั้งสองที่กล่าวมาเป็นแบบไฮบริดโดยใช้วิธี DQF และ SVF ในการระบุดอกลักษณะ ซึ่งให้ผลหลังการชดเชย %THDi เหลือเท่ากับ 0.83 เปอร์เซ็นต์ เท่ากันทั้งสองวิธี รวมถึงกำลังไฟฟ้าที่วงจรกรองกำลังแยกที่ฟก็ลดลงเกือบ 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งช่วยลดพิคต์และต้นทุนในการผลิตได้มาก ดีกว่าใช้วงจรกรองกำลังแยกที่ฟเพียงอย่างเดียว แต่กระนั้นก็ควรเลือกออกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์โมนิกที่เหมาะสม ถ้ามากเกินไป ยอมรับไปสู่ขนาดความเหนี่ยวนำที่ใหญ่ก็จะตามมาด้วยต้นทุนที่สูงขึ้นเช่นกัน รายละเอียดการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกในกรณีอื่นๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบในทางปฏิบัติ เพื่อเป็นการยืนยันถึงสมรรถนะของวิธี SVF เมื่อใช้เป็นวิธีในการระบุดอกลักษณะฮาร์โมนิกให้กับวงจรกรองกำลังไฮบริด การทดสอบดำเนินการกับระบบสามเฟสที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายกระแสให้ความต้านทาน และระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายกระแสให้ความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ฮาร์ตควร์ในส่วนของวงจรกรองกำลัง แยกที่ฟได้ใช้ชุดทดสอบเดิมจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [1] ดำเนินงานที่พิกัด 50 โวลต์อาร์เอ็มเอส 0.5 แอมแปร์ อาร์เอ็มเอส ผลทดสอบในทางปฏิบัติของการใช้วงจรกรองกำลังไฮบริดแบบนี้ที่มีวิธี SVF ระบุดอกลักษณะฮาร์โมนิกให้ผลที่น่าพึงพอใจอย่างมาก ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็น

ความต้านทานเพียงอย่างเดียว ค่า %THDi เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 26.38% และในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ค่า %THDi เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 25.98% ซึ่งค่าทั้งสองมีค่ามากกว่าที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 แต่ภายหลังการชดเชยฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริด ปรากฏว่า รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงความเป็นสัญญาณชานัน์บริสุทธิ์ทั้งสองกรณี และค่า %THDi เฉลี่ยหลังการชดเชยในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 4.21% และ 4.85% ตามลำดับซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 โดยในภาพรวม ปริมาณฮาร์มอนิกลดลงมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ รายละเอียดต่างๆเกี่ยวกับการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 5

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในทางปฏิบัติ ควรจะได้มีการพัฒนาอัลกอริทึมระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกให้สามารถคำนวณได้รวดเร็วขึ้น โดยการใช้เทคนิคทางซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ผสมผสานกัน
2. ในทางทฤษฎี ควรให้มีการศึกษาความเป็นไปได้ ที่จะรวมหรือผสมผสานกันด้านระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก การควบคุมฮาร์ดแวร์เพื่อการกำจัดฮาร์มอนิก และการควบคุมเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง เข้าด้วยกันเป็นหนึ่งเดียว เพื่อการลดต้นทุนของการพัฒนาเทคโนโลยีในอนาคต



## บรรณานุกรม

- [1] สราวุฒิ สุจิตจร, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ “วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบใหม่ที่ใช้การตรวจวัดฮาร์มอนิกในเวลาจริง (รหัสโครงการ SUT7-711-48-24-67)”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2548
- [2] J. Arrillaga, D.A.Bradley, P.S.Bodger. Power System Harmonics, John Wiley & Sons Ltd., 1985.
- [3] Zainal Salam, Tan Perng Cheng and Awang Jusoh, “Harmonics Mitigation Using Active Power Filter A Technological Review”, Department of Energy Conversion, Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, VOL. 8, NO. 2, 2006, pp. 17-26.
- [4] F. Z. Peng, “Harmonic sources and filtering approaches”, IEEE Industry Applications Magazine, vol. 7, Issue 4, July-Aug, 2001, pp. 18-25.
- [5] S. Sujitjorn, K-L. Areerak, and T. Kulworawanichpong, “The DQ Axis With Fourier (DQF) Method for Harmonic Identification”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, 2007, pp. 737-739.
- [6] Takeda, M., Ikeda, K., Teramoto, A., and Aritsuka, T. (1998). Harmonic Current and Reactive Power Compensation with an Active Filter. IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC'88), pp. 1174-1170.
- [7] El-Habrouk, M., and Darwish, M.K. (2001). Design and Implementation of a Modified Fourier Analysis Harmonic Current Computation Technique for Power Active Using DSPs. IEE Proc.-Electr. Power Appl. 148(1), pp. 21-28.
- [8] กองพล อารีรัถย์, วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์, “การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ”
- [9] IEEE Std. 1036-1992., IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors., 1992
- [10] วิรัตน์ เกตุสวัสดิ์สมคร, วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์, “การวิเคราะห์และออกแบบวงจรรอกกำลังแบบผสมพาสซีฟและแอกทีฟที่มีการชดเชยกระแสรีแอกทีฟและฮาร์มอนิก”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546
- [11] ATLURI RAMA PRASAD, PHOIVOS D. ZIOGAS, “A Novel Passive Waveshaping Method for Single-phase Diode Rectifiers”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 31, NO. 6, DECEMBER 1990

## ประวัติผู้วิจัย

นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ 1) จากโรงเรียนนายเรืออากาศ เมื่อ พ.ศ. 2527 และ PhD (Electronic and Electrical Engineering) จาก University of Birmingham, UK เมื่อ พ.ศ. 2530 ปัจจุบันเป็นศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชำนาญด้าน control system, applied signal processing, AI มีความชำนาญพิเศษด้านเครื่องสายไทย การเลี้ยวและ ฝึกสุนัข มีผลงานหนังสือและตำรา 3 รายการ บทความวิจัยกว่า 100 รายการ และได้จัดสิทธิบัตรการ ประดิษฐ์ไว้ 12 รายการ

