

รหัสโครงการ SUT7-711-48-24-67



รายงานการวิจัย

วงจรกรองกำลังแบบแอกทีฟแบบใหม่ที่ใช้การตรวจวัดฮาร์มอนิก  
ในเวลาจริง

(A Novel Active Power Filter Employing Real-Time  
Harmonic Identification)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวิชัย สุจิตจร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2548 - 2549

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2550

ก

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณกองพล อารีรักษ์ เป็นอย่างยิ่งในความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ มากมาย ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อำนวยความสะดวก ในการใช้ห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการสนับสนุนงบประมาณการ เข้าร่วมประชุมวิชาการนานาชาติ

ผู้วิจัย

สิงหาคม 2550

## บทคัดย่อ

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า นับเป็นสิ่งสำคัญประเด็นหนึ่งสำหรับภาคอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากฮาร์มอนิกก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ ซึ่งส่งผลให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหาย และทำงานผิดพลาด งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ ที่เรียกว่า วิธี DQF ซึ่งเมื่อใช้งานร่วมกับวงจรขยายกำลังที่มีคุณสมบัติราบเรียบมากที่สุดในทางความถี่ เกิดเป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบใหม่ การทดสอบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF พึ่งพาการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยมีการศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีการระบุเอกลักษณ์อื่น ๆ สองวิธี ได้แก่ วิธี DQ และ SWFA ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ วิธี DQF สามารถให้ข้อมูลฮาร์มอนิกที่มีความถูกต้องมากที่สุด นำไปสู่การกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบได้ดีที่สุด ด้วยวงจรกรองกำลังแบบแอกทีฟแบบใหม่ของงานวิจัยนี้ นอกจากนั้น ยังส่งผลดีให้สามารถรักษาสถานะสมดุลหลังการกำจัดฮาร์มอนิกได้ด้วย ได้มีการพัฒนาต้นแบบวงจรกรองกำลังแบบแอกทีฟแบบใหม่ขึ้นด้วยเทคโนโลยีตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และวงจรขยายกำลังแบบแอนะล็อก ระบบที่ใช้ทดสอบเป็นระบบสามเฟสที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสจ่ายกระแสให้ความต้านทานเพียงอย่างเดียว และวงจรเรียงกระแสสามเฟสจ่ายกระแสให้ความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ผลการทดสอบของทั้งสองกรณีเป็นที่น่าพึงพอใจอย่างมาก โดยรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงความเป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ และค่า %THD<sub>r</sub>เฉลี่ยภายหลังการชดเชยฮาร์มอนิก อยู่ในขอบเขตมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 ซึ่งในภาพรวมปริมาณฮาร์มอนิกลดลงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ภายหลังจากชดเชย ระบบจะกลับสู่สถานะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ถึงแม้ว่าก่อนการชดเชยระบบมีความไม่สมดุลบ้างเล็กน้อย

## Abstract

Electrical harmonic elimination is an important aspect for industry because harmonic can be troublesome and harmful to electrical devices and equipment. This research aims to develop a new method of harmonic identification namely the DQF method. The DQF method functioning together with a power amplifier with maximally flat frequency response form a novel active power filter. Simulation studies have been used to assess the effectiveness of the DQF method in comparison with the well-known DQ and the SWFA methods, respectively. As a result, the DQF method provides the most accurate harmonic identification in turn leading to the highest achievement in harmonic elimination utilizing the proposed novel filter. Furthermore, our novel filter could maintain the power system balance. A prototype of our novel active power filter has been constructed around a DSP technology and an analog power amplifier. The 3-phase system under test carries a nonlinear load of the type 3-phase rectifier with a resistor and a series resistor-inductor connected in turn, respectively. The test results are very satisfactory and show that the current waveforms at the main source are sinusoidal. The averaged %THD, after harmonic compensation is complied with the IEEE Std. 519-1992. In other words, the total harmonic reduction is 90%. Additionally, after compensation a slightly unbalanced system can be brought back to a balanced situation completely.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ขั้นตอนการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์สารมอโนก.....	4
กล่าวนำ.....	4
การระบุเอกลักษณ์สารมอโนกด้วยวิธีการหมุนแกน.....	4
การระบุเอกลักษณ์สารมอโนกด้วยวิธีวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วิน โดว์เลื่อน.....	6
การระบุเอกลักษณ์สารมอโนกด้วยวิธีการหมุนแกนประกอบกับวิธีฟูรีเยร์.....	9
สรุป.....	12
บทที่ 3 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดสารมอโนก.....	13
กล่าวนำ.....	13
โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์การกำจัดสารมอโนก.....	13
ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อโหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....	14
ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อโหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหลดเป็นความต้านทานค่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....	19
ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุล ในแต่ละเฟส.....	22
สรุป.....	29

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบการกำจัดสารมือนิก.....	30
กล่าวนำ.....	30
ผลการทดสอบกรณีไหลของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....	30
ผลการทดสอบกรณีไหลของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับ ตัวเหนี่ยวนำ.....	35
สรุป.....	38
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	40
สรุป.....	40
ข้อเสนอแนะ.....	43
บรรณานุกรม.....	44
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์.....	47
ภาคผนวก ข. การตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายกำลัง.....	52
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และผลงานการจดสิทธิบัตร.....	53
ประวัติผู้วิจัย.....	54

## สารบัญตาราง

ตาราง 3.1 ผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว .....	19
ตาราง 3.2 ผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....	22
ตาราง 3.3 ผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะที่ระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุล ในแต่ละเฟส .....	27
ตาราง 3.4 เกณฑ์ในการชี้วัดสมรรถนะการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิก .....	29
ตาราง 3.5 สมรรถนะของการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกในแต่ละวิธี.....	29
ตาราง 4.1 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในสถานะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแส สามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....	34
ตาราง 4.2 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในสถานะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแส สามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ .....	38

## สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1	แผนภาพแสดงการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	2
รูปที่ 2.1	เวกเตอร์กระแสบนแกนหมุน d-q.....	5
รูปที่ 2.2	แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ.....	6
รูปที่ 2.3	แผนภาพอธิบายการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_1$ และ $B_1$ .....	7
รูปที่ 2.4	แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA.....	8
รูปที่ 2.5	แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF.....	9
รูปที่ 2.6	แผนภาพอธิบายการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_{0d}$ และ $A_{0q}$ .....	10
รูปที่ 3.1	โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก.....	13
รูปที่ 3.2	โครงสร้างของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสต่อกับโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....	14
รูปที่ 3.3	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อระบบมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....	18
รูปที่ 3.4	โครงสร้างของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสต่อกับโหลดความต้านทานอนุกรม กับตัวเหนี่ยวนำ.....	19
รูปที่ 3.5	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อระบบมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....	21
รูปที่ 3.6	โครงสร้างของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส.....	23
รูปที่ 3.7	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุล ในแต่ละเฟส.....	26
รูปที่ 4.1	ระบบที่ใช้ทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกของงานวิจัย.....	31
รูปที่ 4.2	ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....	32
รูปที่ 4.3	สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเฟส u ก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลด ของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....	33
รูปที่ 4.4	รูปคลื่นกระแสในสายนิวทรัลก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดเป็นความต้านทาน.....	34
รูปที่ 4.5	ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานอนุกรมกับ ตัวเหนี่ยวนำ.....	36
รูปที่ 4.6	สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเฟส u ก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลด ของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....	37
รูปที่ 4.7	รูปสัญญาณกระแสในสายนิวทรัลก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดเป็นความต้านทาน อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....	38

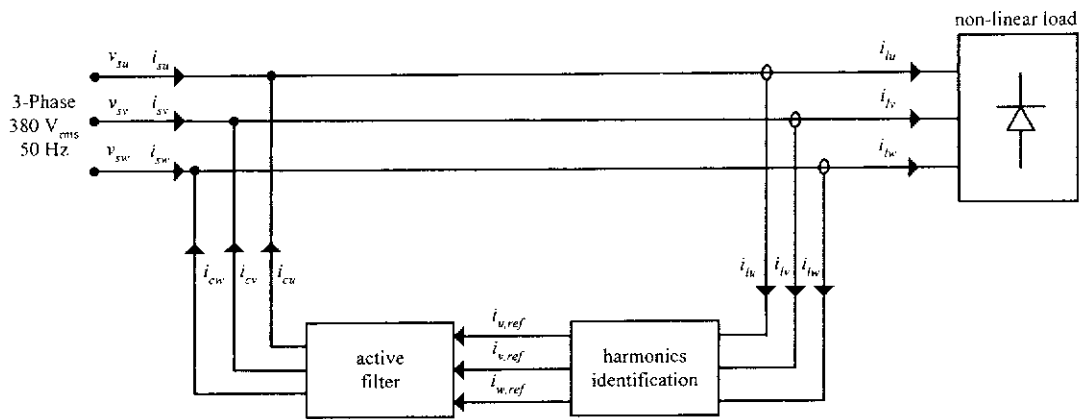


# บทที่ 1

## บทนำ

### ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ได้นำเทคโนโลยีคอนเวอร์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย ดังเช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ การหลอมโลหะ อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น คอนเวอร์เตอร์มีบทบาทสำคัญในการแปลงพลังงาน เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์ทำงานโดยใช้อุปกรณ์สวิตซิงกำลัง จึงก่อให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า ฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือได้ว่าเป็น “มลพิษ” ในระบบไฟฟ้า และทำให้เกิดผลเสียหลายประการ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยส่วนหนึ่งทางด้านไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน จึงมุ่งเน้นการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก ดังเช่น การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ ซึ่งได้แก่ วงจรจูน และวงจรดีจูน การใช้วงจรกรองกำลังไฮบริด (Lin, Yang, and Tsai, 2002) และ การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ ที่ต้องอาศัยอุปกรณ์สวิตซิง ฉีดกระแสเพื่อหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ (Gu, and Gyu, 1998) วงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยส่วนใหญ่มีโครงสร้างเชิงระบบดังรูปที่ 1.1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟนี้ให้ผลดีในการกรอง มีความอ่อนตัวที่สามารถปรับแต่งให้ทำงานกับระบบใด ๆ ได้ง่าย ตลอดจนประสบปัญหาน้อยจากสภาวะเรโซแนนซ์ในระบบ ดังที่อาจสังเกตจากรูปที่ 1.1 ว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีส่วนประกอบสำคัญส่วนหนึ่งสำหรับทำหน้าที่ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก (harmonic identification) ซึ่งชุดระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกนี้จะต้องบ่งบอกได้ว่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบมีปริมาณเท่าใด เพราะฉะนั้นวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าอย่างได้ผล และจากการศึกษาค้นคว้าในเรื่องการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก พบว่า วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก แบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มด้วยกัน กลุ่มแรกเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจผลรวมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ โดยไม่แสดงรายละเอียดอันดับของฮาร์มอนิก กลุ่มที่สองเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่แสดงรายละเอียดอันดับของฮาร์มอนิก งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาวิธีการใหม่เพื่อระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก สำหรับใช้งานเป็นส่วนประกอบหลักส่วนหนึ่งของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบใหม่ของงานวิจัยนี้ จึงมีส่วนประกอบเป็นชุดระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยอัลกอริทึมใหม่ ทำงานร่วมกับวงจรขยายกำลังที่มีการตอบสนองทางความถี่แบบราบเรียบมากที่สุด การพัฒนาชุดระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในงานวิจัยเลือกใช้การ์ด DSP ของบริษัท Texas Instruments รุ่น eZdsp™ F2812 สำหรับการประมวลผล การตรวจสอบผลการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกของวิธีการที่พัฒนาขึ้น จะดำเนินการศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีการต่าง ๆ ที่ปรากฏในงานวิจัยอื่นมาก่อนแล้ว



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- พัฒนาวิธีการใหม่สำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก เพื่อใช้งานในวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
- เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีต้นแบบสำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก และกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

### ขอบเขตของการวิจัย

- การวิเคราะห์ และแก้ปัญหาฮาร์มอนิก มุ่งเน้นที่การปรับแก้กระแสฮาร์มอนิก
- การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก เพื่อใช้งานในวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ต้องกำจัดฮาร์มอนิกได้ตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

### ขั้นตอนการวิจัย

- ค้นคว้าและศึกษาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกต่าง ๆ ที่เคยปรากฏมาก่อนแล้ว
- จำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกตามวิธีการที่ปรากฏมาก่อนหน้านี้
- คิดค้นวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ ที่มีประสิทธิภาพดีกว่าเดิม
- จำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก โดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ที่คิดค้นขึ้น พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่กับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากการใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในอดีต
- สร้างชุดระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกโดยใช้การ์ด DSP รุ่น eZdsp™ F2812
- สร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ที่พัฒนาขึ้น

- ทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกในทางปฏิบัติ โดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่สร้างขึ้น
- ตรวจสอบผลการกำจัดฮาร์โมนิกในทางปฏิบัติ และปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้ผลการกำจัดฮาร์โมนิกเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

#### **ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

- ได้อัลกอริทึมใหม่เพื่อการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกที่มีประสิทธิภาพ สำหรับใช้งานในวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามเฟส
- ได้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกที่มีประสิทธิภาพ
- ได้ต้นแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดฮาร์โมนิกได้ตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

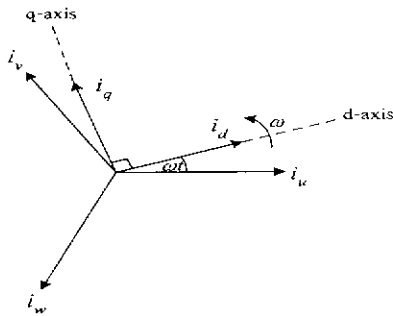
#### กล่าวนำ

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า และจากการศึกษางานวิจัยในอดีต พบว่า การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มด้วยกัน คือ การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ และการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกบางอันดับ ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคิดค้นวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ สำหรับกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ เนื้อหาในบทนี้จึงทบทวนอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก สองวิธี ได้แก่ วิธีการหมุนแกน (d-q axis หรือแกน direct และแกน quadrature) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วิธี DQ (Takeda, Ikeda, Teramoto, and Aritsuka, 1988) และวิธีวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (sliding window Fourier analysis) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วิธี SWFA (EI-Habrouk, and Darwish, 2001) ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวใช้สำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ นอกจากนี้ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ที่พัฒนาขึ้น ที่เรียกว่า วิธีการหมุนแกนประกอบกับวิธีฟูรีเยร์ (DQ axis with Fourier) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วิธี DQF วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นการผสมผสานข้อดีของวิธี DQ และวิธี SWFA นั้นเอง

#### การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกน (วิธี DQ)

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ ในขั้นตอนอาศัยการแปลงค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส คือ  $i_u$ ,  $i_v$  และ  $i_w$  เป็นกระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์ (space vector) บนแกน  $\alpha$ ,  $\beta$  และ 0 ( $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  และ  $i_0$ ) โดยการใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (2-1) หลังจากนั้นจะนำค่ากระแสบนแกน  $\alpha$  ( $i_\alpha$ )

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



รูปที่ 2.1 เวกเตอร์กระแสบนแกนหมุน d-q

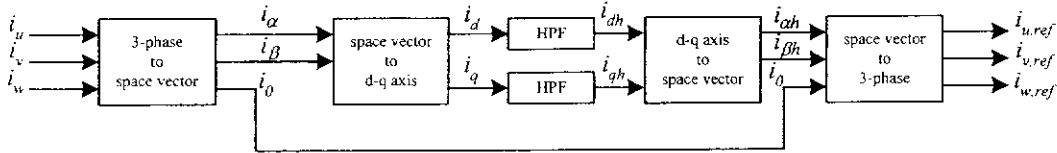
และแกน  $\beta$  ( $i_\beta$ ) ไปอยู่บนแกนหมุน d-q ( $i_d$  และ  $i_q$ ) ด้วยเมตริกซ์ดังสมการที่ (2-2) จากสมการดังกล่าวว่า  $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (เรเดียน/วินาที) ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเพื่อต้องการทราบฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบจะกำหนดให้  $\omega$  เท่ากับ ความถี่มูลฐานของระบบ ด้วยเหตุนี้เวกเตอร์กระแสไฟฟ้า  $i_d$  และ  $i_q$  จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความถี่มูลฐาน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยในประเทศไทย ความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ หรือ 314.16 เรเดียน/วินาที จากรูปที่ 2.1 เมื่อพิจารณาบนแกนหมุน d-q กระแสที่ความถี่มูลฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรงในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสสลับ ด้วยเหตุนี้การแยกองค์ประกอบระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกนหมุน d-q ( $i_{dh}$  และ  $i_{qh}$ ) และกระแสที่ความถี่มูลฐาน ทำได้โดยใช้วงจรกรอง

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

$$\begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{u,ref} \\ i_{v,ref} \\ i_{w,ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

ผ่านสูง (high-pass filter) หลังจากนั้นแปลงค่ากระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d-q กลับเป็นกระแสฮาร์มอนิกบนแกน  $\alpha$  และแกน  $\beta$  ( $i_{\alpha h}$  และ  $i_{\beta h}$ ) ดังสมการที่ (2-3) ส่วนกระแสสเปซเวกเตอร์บนแกน 0 ( $i_0$ ) จะนำไปใช้ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ( $i_{u.ref}$ ,  $i_{v.ref}$  และ  $i_{w.ref}$ ) โดยการใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (2-4) จากกระบวนการทั้งหมดสำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้ ได้อธิบายเป็นแผนภาพไว้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ

### การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (วิธี SWFA)

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA อาศัยการคำนวณจากสมการของอนุกรมฟูริเยร์ ซึ่งการคำนวณจะดำเนินการเฉพาะค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน ( $i_1$ ) ดังสมการที่ (2-5) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์  $A_1$  และ  $B_1$  คำนวณได้จากสมการที่ (2-6) และ (2-7) ตามลำดับ จากสมการดังกล่าว  $T$  คือ ค่าเวลาในการชักตัวอย่าง (วินาที),  $\omega$  คือ ความถี่มูลฐาน (เรเดียน/วินาที),  $N$  คือ จำนวนจุดข้อมูลในการคำนวณต่อหนึ่งคาบ และ  $N_0$  คือ ตำแหน่งของจุดข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ หลังจากคำนวณ

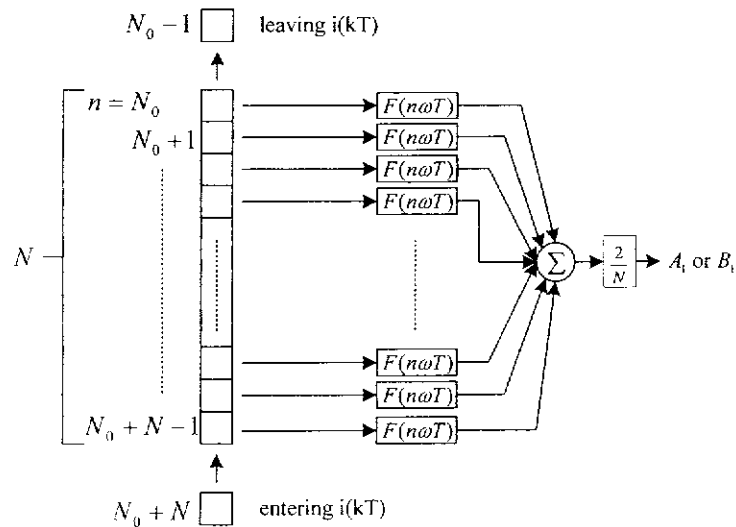
$$i_1(kT) = A_1 \cos(\omega kT) + B_1 \sin(\omega kT) \quad (2-5)$$

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(nT) \cos(n\omega T) \quad (2-6)$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(nT) \sin(n\omega T) \quad (2-7)$$

ค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณไปหักลบออกจากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก ( $i$ ) ดังสมการที่ (2-8) จะได้กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ ( $i_h$ ) โดยในขั้นแรกจะรับข้อมูลกระแส  $i$  จำนวนหนึ่งคาบ ซึ่งมีทั้งหมด  $N$  ข้อมูล หลังจากนั้นทำการคำนวณค่า  $A_1$  และ  $B_1$  จากสมการที่ (2-6) และ (2-7) เพื่อคำนวณค่ากระแส  $i_1$

จากสมการที่ (2-5) ค่าสัมประสิทธิ์  $A_1$  และ  $B_1$  ที่ได้จากการคำนวณในช่วงแรกนี้จะถูกเก็บเป็นข้อมูลในรูปแบบของแอมพลิจูดรูปที่ 2.3 ซึ่งในรูปดังกล่าว  $F(n\omega T) = \cos(n\omega T)$  ในกรณีคำนวณค่า  $A_1$  และ  $F(n\omega T) = \sin(n\omega T)$  ในกรณีคำนวณค่า  $B_1$  กระบวนการดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นเป็นการคำนวณเพื่อหาค่าเริ่มต้นให้กับอัลกอริทึมการระบุแอมพลิจูดฮาร์มอนิก ด้วยวิธี SWFA และในรอบการคำนวณถัดไป เริ่มต้นจากการรับข้อมูลกระแสค่าใหม่  $i(N_0 + N)$  จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก และลบข้อมูลกระแสค่าเก่า  $i(N_0 - 1)$  เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_1$  ค่าใหม่ ( $A_1^{(new)}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์  $B_1$  ค่าใหม่ ( $B_1^{(new)}$ ) ดังสมการที่ (2-9) และ (2-10) ตามลำดับ โดยที่  $A_1^{(old)}$  คือค่าสัมประสิทธิ์  $A_1$  ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้ และ  $B_1^{(old)}$  คือค่าสัมประสิทธิ์  $B_1$  ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้เช่นเดียวกัน จากกระบวนการดังกล่าวทั้งหมดข้างต้น มีการคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในทุกรอบของการรับข้อมูลกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับ  $T$  วินาที



รูปที่ 2.3 แผนภาพอธิบายการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_1$  และ  $B_1$

$$i_n = i - i_1 \quad (2-8)$$

$$A_1^{(new)} = A_1^{(old)} + \frac{2}{N} \{i[(N_0 + N)T] \cos[(N_0 + N)\omega T] - i[(N_0 - 1)T] \cos[(N_0 - 1)\omega T]\} \quad (2-9)$$

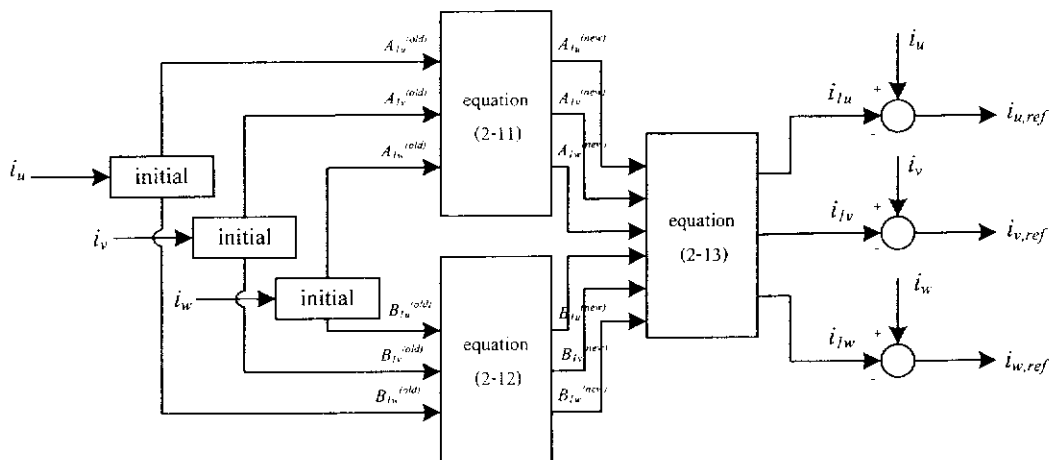
$$B_1^{(new)} = B_1^{(old)} + \frac{2}{N} \{i[(N_0 + N)T] \sin[(N_0 + N)\omega T] - i[(N_0 - 1)T] \sin[(N_0 - 1)\omega T]\} \quad (2-10)$$

จากการอธิบายข้างต้น เป็นการคำนวณสำหรับหนึ่งเฟส การนำวิธี SWFA นี้ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_i$  และ  $B_i$  กับระบบไฟฟ้าสามเฟส ทำได้โดยใช้สมการที่ (2-11) และ (2-12) ตามลำดับ ส่วนการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานทั้งสามเฟสคำนวณได้จากสมการที่ (2-13) การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธี SWFA สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส แสดงเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ 2.4

$$\begin{bmatrix} A_{1u}^{(new)} \\ A_{1v}^{(new)} \\ A_{1w}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1u}^{(old)} \\ A_{1v}^{(old)} \\ A_{1w}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_u[(N_0-1)T] \\ i_v[(N_0-1)T] \\ i_w[(N_0-1)T] \end{bmatrix} \cos[(N_0-1)\omega T] + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_u[(N_0+N)T] \\ i_v[(N_0+N)T] \\ i_w[(N_0+N)T] \end{bmatrix} \cos[(N_0+N)\omega T] \quad (2-11)$$

$$\begin{bmatrix} B_{1u}^{(new)} \\ B_{1v}^{(new)} \\ B_{1w}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{1u}^{(old)} \\ B_{1v}^{(old)} \\ B_{1w}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_u[(N_0-1)T] \\ i_v[(N_0-1)T] \\ i_w[(N_0-1)T] \end{bmatrix} \sin[(N_0-1)\omega T] + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_u[(N_0+N)T] \\ i_v[(N_0+N)T] \\ i_w[(N_0+N)T] \end{bmatrix} \sin[(N_0+N)\omega T] \quad (2-12)$$

$$\begin{bmatrix} i_{1u}(kT) \\ i_{1v}(kT) \\ i_{1w}(kT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1u} & B_{1u} \\ A_{1v} & B_{1v} \\ A_{1w} & B_{1w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega kT) \\ \sin(\omega kT) \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

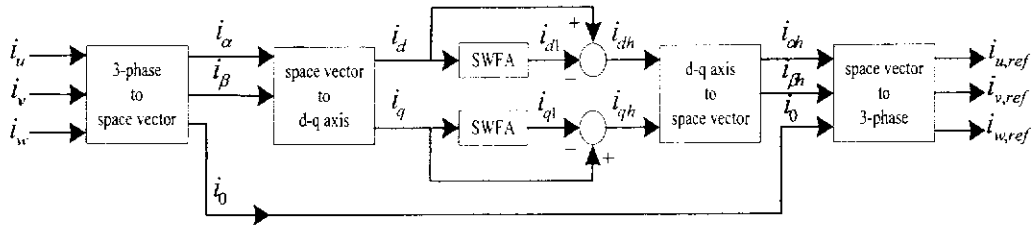


รูปที่ 2.4 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA



การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกนประกอบกับวิธีฟูริเยร์ (วิธี DQF)

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ในขั้นตอนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส คือ  $i_u, i_v$  และ  $i_w$  เป็นกระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์ ( $i_\alpha, i_\beta$  และ  $i_0$ ) ดังสมการที่ (2-1) ต่อจากนั้นแปลงค่ากระแสบนแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ( $i_\alpha$  และ  $i_\beta$ ) ไปอยู่บนแกนหมุน d-q ( $i_d$  และ  $i_q$ ) ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-2) ในสมการดังกล่าวค่า  $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (เรเดียน/วินาที) การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเพื่อต้องการทราบฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ จะกำหนดให้  $\omega$  เท่ากับ ความถี่มูลฐานของระบบ ด้วยเหตุนี้เวกเตอร์กระแสไฟฟ้า  $i_d$  และ  $i_q$  จึงหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความถี่มูลฐาน การคำนวณตามกระบวนการดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นของวิธี DQF ในช่วงแรกนี้จะเหมือนกับวิธี DQ ทุกประการ และถ้าพิจารณาบนแกนหมุน d-q กระแสที่ความถี่มูลฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรง ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสสลับ การแยกองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง ซึ่งเป็นกระแสที่ความถี่มูลฐานออกจากองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับจะแตกต่างกับวิธี DQ ที่ใช้วงจรกรองผ่านสูง โดยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธี DQF จะแยกองค์ประกอบดังกล่าวโดยใช้หลักการของวิธี SWFA ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 ซึ่งค่ากระแสความถี่มูลฐานที่ได้ มี



รูปที่ 2.5 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF

ความถูกต้องแม่นยำกว่าการใช้วงจรกรองผ่านสูง การใช้วิธี SWFA ในที่นี้เริ่มต้นจากการพิจารณาความสัมพันธ์ออยเลอร์-ฟูริเยร์ (Euler-Fourier formulas) ดังสมการที่ (2-14) ซึ่งมีองค์ประกอบสองเทอม คือ เทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง และเทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ เมื่อกระแสที่ความถี่มูลฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรง การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF จึงคำนวณเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์  $A_0$  เท่านั้น ซึ่งการคำนวณหาค่า  $A_0$  คำนวณ

$$i(kT) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega kT) + B_h \sin(h\omega kT)] \tag{2-14}$$

$$A_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(nT) \cos(nh\omega T) \tag{2-15}$$

ได้จากการแทนค่า  $h = 0$  ในสมการที่ (2-15) เพราะฉะนั้นจากรูปที่ 2.5 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานบนแกน d ( $i_{d1}$ ) และค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานบนแกน q ( $i_{q1}$ ) คำนวณได้จากสมการที่ (2-16) และ (2-17) ตามลำดับ ค่า  $A_{0d}$  และ  $A_{0q}$  จากสมการดังกล่าวคำนวณได้จากสมการที่ (2-18) และ (2-19) ซึ่งการคำนวณเริ่มด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นของ  $A_{0d}$  และ  $A_{0q}$  โดยรับข้อมูลกระแส  $i_d$  และ  $i_q$  มาหนึ่งคาบ ซึ่งมีทั้งหมด  $N$  ข้อมูล มาคำนวณตามสมการที่ (2-18) และ (2-19)

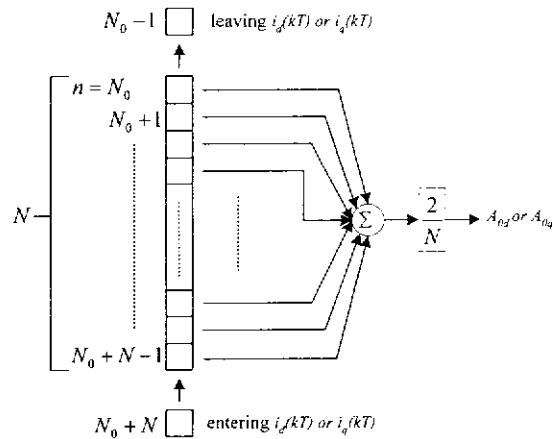
$$i_{d1}(kT) = \frac{A_{0d}}{2} \quad (2-16)$$

$$i_{q1}(kT) = \frac{A_{0q}}{2} \quad (2-17)$$

$$A_{0d} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_d(nT) \quad (2-18)$$

$$A_{0q} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_q(nT) \quad (2-19)$$

$$\begin{bmatrix} A_{0d}^{(new)} \\ A_{0q}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{0d}^{(old)} \\ A_{0q}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_d[(N_0-1)T] \\ i_q[(N_0-1)T] \end{bmatrix} + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_d[(N_0+N)T] \\ i_q[(N_0+N)T] \end{bmatrix} \quad (2-20)$$



รูปที่ 2.6 แผนภาพอธิบายการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_{0d}$  และ  $A_{0q}$

หลังจากนั้นเก็บค่าดังกล่าวในรูปแบบของแวลวลำดับดังรูปที่ 2.6 ส่วนในรอบการทำงานถัดไปเริ่มต้นจากการรับข้อมูลกระแส  $i_d$  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 (2-20) โดยที่  $A_{0d}^{(old)}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์  $A_{0d}$  ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้ และ  $A_{0q}^{(old)}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์  $A_{0q}$  ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้เช่นกัน ซึ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_{0d}^{(new)}$  และ  $A_{0q}^{(new)}$  ในทุกรอบของการรับข้อมูลกระแส  $i_d$  และ  $i_q$  ค่าใหม่ ทำให้ได้ค่ากระแส  $i_{d1}$  และ  $i_{q1}$  ในทุกรอบของการคำนวณ โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับ  $T$  วินาที หลังจากทีคำนวณค่ากระแส  $i_{d1}$  และ  $i_{q1}$  นำค่ากระแสดังกล่าวไปหักลบออกจากค่ากระแส  $i_d$  และ  $i_q$  ดังสมการที่ (2-21) และ (2-22) จะได้กระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบบนแกนหมุน d-q)  $i_{dh}$  และ  $i_{qh}$  (หลังจากนั้นแปลงค่ากระแส ฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d-q กลับเป็นกระแสฮาร์มอนิกบนแกน  $\alpha$  และ  $\beta$ )  $i_{d\alpha}$  และ  $i_{d\beta}$  (ดังสมการที่ (2-3) ส่วนกระแส  $i_0$  จะนำไปใช้ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟสามเฟส ( $i_{u,ref}$ ,  $i_{v,ref}$  และ  $i_{w,ref}$ ) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (2-4)

$$i_{dh} = i_d - i_{d1} \quad (2-21)$$

$$i_{qh} = i_q - i_{q1} \quad (2-22)$$

จากกระบวนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ตามที่ได้อธิบายข้างต้น สังเกตได้ว่าในช่วงแรกของการคำนวณ และในช่วงสุดท้ายของการคำนวณ จะเหมือนกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ ทุกประการ ทั้งนี้เนื่องจากข้อดีของการคำนวณตามวิธี DQ มีการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าในลำดับศูนย์ (zero sequence) หรือ  $i_0$  ซึ่งกระแสดังกล่าวจะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุล เมื่อค่านึงถึงค่ากระแสลำดับศูนย์ จะส่งผลให้วงจรรองกำลังแอกทีฟสามเฟสสามารถฉีดกระแสชดเชยได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ระบบกลับมาอยู่ในสภาพสมดุลได้ หลังกำจัดฮาร์มอนิก ประเด็นที่แตกต่างกันระหว่างวิธี DQ และวิธี DQF อยู่ที่การแยกองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงออกจากองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ โดยวิธี DQF ได้นำข้อดีของวิธี SWFA มาใช้ในส่วนนี้ แทนการใช้วงจรกรองผ่านสูงตามวิธี DQ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการคำนวณตามหลักการของวิธี SWFA เหมาะกับการใช้งานในเวลาจริง อีกทั้งมีความถูกต้องสูง เมื่อเทียบกับการใช้วงจรกรองผ่านสูง นอกจากนี้เมื่อระบบมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม รูปแบบของกระแสฮาร์มอนิกจะเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน สถานการณ์ดังกล่าวอาจส่งผลให้การออกแบบวงจรกรองผ่านสูงตามวิธี DQ ต้องดำเนินการใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับรูปแบบของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น แต่ในทางกลับกัน การแยกองค์ประกอบดังกล่าวโดยใช้วิธี

SWFA สามารถใช้ได้กับรูปแบบกระแสฮาร์มอนิกได้ทุกรูปแบบ โดยไม่ขึ้นอยู่กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ

### สรุป

วิธี DQF สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ตามที่ได้นำเสนอในบทนี้ เป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ จากการผสมผสานข้อดีของวิธี DQ และวิธี SWFA เข้าไว้ด้วยกัน ข้อดีของวิธี DQ คือ มีการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์ ซึ่งส่งผลให้การฉีดกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแยกที่ไฟในระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุลเป็นไปอย่างเหมาะสม สามารถนำระบบให้กลับมาอยู่ในสภาพสมดุลหลังการกำจัดฮาร์มอนิก ส่วนข้อดีของวิธี SWFA ที่นำมาใช้กับวิธี DQF คือ การคำนวณเพื่อแยกองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงออกจากสัญญาณกระแสสลับ ให้ความถูกต้องสูง และมีความอ่อนตัว สามารถปรับใช้กับระบบใด ๆ ได้ง่ายกว่าการใช้วงจรกรองผ่านสูง นอกจากนี้การคำนวณด้วยวิธี SWFA ใช้เวลาการคำนวณสั้น ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในเวลาจริง นอกจากนั้นแล้ว วิธี DQF ยังสามารถแก้จุดด้อยของวิธี DQ และวิธี SWFA ได้อีกด้วย โดยจุดด้อยของวิธี DQ คือ การแยกองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงออกจากองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ ที่ใช้วงจรกรองผ่านสูง มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าวิธี DQF ส่วนจุดด้อยของวิธี SWFA คือ ไม่มีการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์ ซึ่งส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุล ไม่สามารถทำให้ระบบกลับมาอยู่ในสภาพสมดุลได้ภายหลังการกำจัดฮาร์มอนิก รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ รวมถึงข้อดี และข้อเสียของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธีจะนำเสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่อาศัยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธีเปรียบเทียบกัน

### บทที่ 3

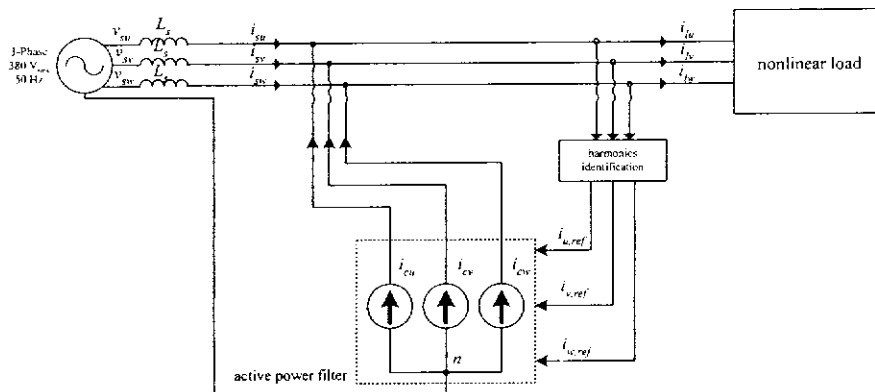
#### ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก

##### กล่าวนำ

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่นำเสนอในบทนี้ พิจารณาแบบจำลองของวงจรกรองเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ที่กำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก อัลกอริทึมเหล่านี้ ได้แก่ วิธี DQ วิธี SWFA และวิธี DQF ในการจำลองสถานการณ์ได้พิจารณาแบบ 3 รูปแบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแตกต่างกัน ได้แก่ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ และระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส โหลดดังกล่าว เมื่อไม่คิดตั้งตัวเก็บประจุในการปรับเรียบแรงดัน สามารถพิจารณาเป็นโหลดในกลุ่มแหล่งจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (current-source nonlinear load, CSNL) ตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี ใช้ค่า %THD<sub>i</sub> และ %unbalance ภายหลังการชดเชยเป็นสำคัญ ทั้งนี้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิก และความสมดุลของระบบไฟฟ้าภายหลังการชดเชย การแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในบทนี้จึงพิจารณาวงจรกรองกำลังแบบแอคทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ที่สามารถจ่ายกระแสชดเชยฮาร์มอนิกได้จริงตามผลการคำนวณ สมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นแบบจำลองของแต่ละกรณีได้แยกแสดงไว้ในภาคผนวก บทนี้จึงนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และอภิปรายผลไปพร้อมกัน

##### โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก

โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์ สามารถแทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.1 ดังสังเกตได้ว่ามีองค์ประกอบหนึ่งเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก (harmonics identification)



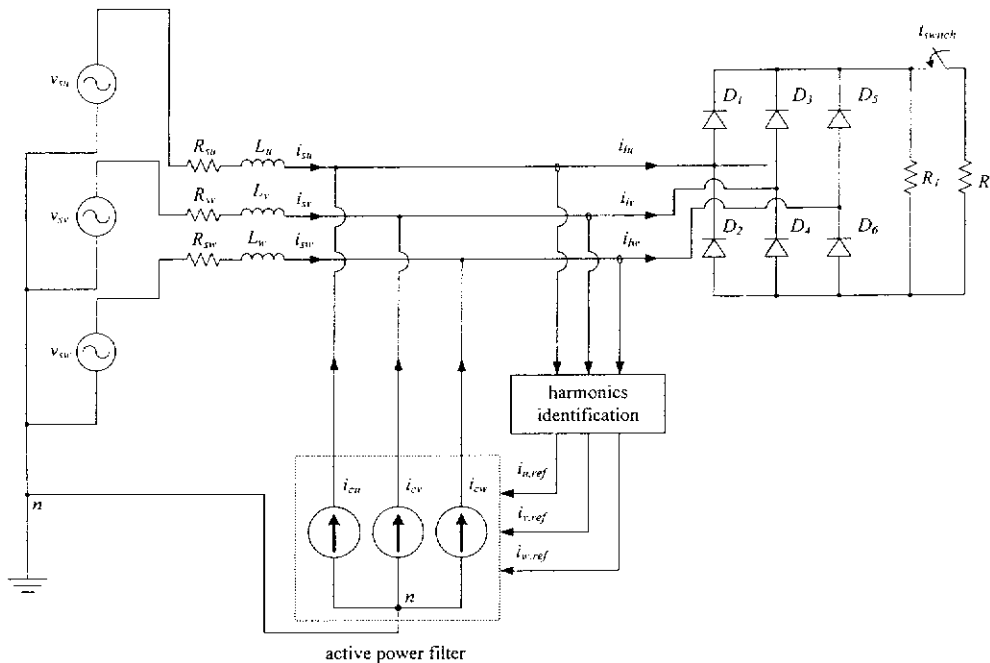
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก

ซึ่งหมายรวมถึง วิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง ต่อไปนี้ วิธี DQ วิธี SWFA หรือวิธี DQF การจำลองสถานการณ์ได้พิจารณาระบบ 3 รูปแบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแตกต่างกัน

ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อโหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในหัวข้อนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 โดยค่า  $R_u, R_v$  และ  $R_w$  ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์มีค่าเท่ากับ 0.001 โอห์ม ค่า  $L_u, L_v$  และ  $L_w$  มีค่าเท่ากับ 100 ไมโครเฮนรี ส่วนค่าโหลดความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  มีค่าเท่ากับ 870 โอห์ม โดยในเบื้องต้น ถ้าพิจารณาว่าไม่มีวงจรกรองกำลังแอกทีฟ กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก ( $i_{su}, i_{sv}$  และ  $i_{sw}$ ) จะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าโหลด ( $i_{lu}, i_{lv}$  และ  $i_{lw}$ ) แต่ถ้าพิจารณาในกรณีที่มีวงจรกรองกำลังแอกทีฟ นิติกระแสชดเชย ( $i_{cu}, i_{cv}$  และ  $i_{cw}$ ) เพื่อกำจัดฮาร์มอนิก จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าทั้งสาม โดยอาศัยกฎของเคอร์ชอฟฟ์ ดังสมการที่ (3-1) ในสมการใช้  $i$  เป็นตัวห้อย แสดงเฟส u เฟส v หรือ เฟส w เมื่อพิจารณาเฟส u จะแทน  $i$  ด้วย u ถ้าเป็นเฟส v จะแทน  $i$  ด้วย v และถ้าเป็นเฟส w จะแทน  $i$  ด้วย w

$$i_{si} = i_{li} - i_{ci} \tag{3-1}$$



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสต่อกับโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว

ผลการจำลองสถานการณ์ก่อนการชดเชย รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ( $v_{su}$ ,  $v_{sv}$  และ  $v_{sw}$ ) และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย ( $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$ ) แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ก) ส่วนรูปสัญญาณของกระแสชดเชย ( $i_{cu}$ ,  $i_{cv}$  และ  $i_{cw}$ ) และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักหลังการชดเชย ( $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$ ) ที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ SWFA และ DQF แสดงไว้ดังรูปที่ 3.3 ข) ถึง 3.3 ง) ตามลำดับ จากรูปที่ 3.3 ก) สังเกตได้ว่าค่า  $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$  มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้ายังคงรูปคลื่นสัญญาณไซน์อยู่ นอกจากนี้ในการจำลองสถานการณ์ กำหนดให้มีการสวิตช์โหลดความต้านทาน  $R_2$  ต่อขนานกับ  $R_1$  ที่เวลา 0.06 วินาที เพื่อศึกษาถึงสภาวะชั่วคราวที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ตลอดจนการชดเชยฮาร์มอนิก จึงส่งผลให้แอมพลิจูดของ  $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$  มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไป ซึ่งสังเกตได้อย่างชัดเจนในกรณีเฟส w ที่ค่ากระแส  $i_{sw,uncomp}$  มีค่าเพิ่มขึ้นทันทีทันใดที่เวลา 0.06 วินาที ในขณะที่ค่า  $i_{sv,uncomp}$  มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่มีค่าเพิ่มขึ้นทางซีกลบของรูปสัญญาณ เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่สัญญาณ  $i_{sv,uncomp}$  มีค่าเป็นลบ ส่วนกรณีเฟส u ค่า  $i_{su,uncomp}$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เนื่องจากที่เวลา 0.06 วินาที ค่า  $i_{su,uncomp}$  มีค่าเป็นศูนย์ เพราะฉะนั้นถึงแม้ว่าจะมีการสวิตช์โหลดเพิ่มเข้าไปในช่วงนี้ ค่า  $i_{su,uncomp}$  ยังคงมีค่าเป็นศูนย์เช่นเดิม และถ้าพิจารณาค่า %THD<sub>i</sub> ในแต่ละเฟสก่อนการชดเชย ที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 สังเกตได้ว่าค่า %THD<sub>i</sub> มีค่ามากกว่า IEEE Std. 519-1992 โดยค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ย (%THD<sub>i,ave</sub>) ก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 28.65 เปอร์เซ็นต์ ค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยดังกล่าวคำนวณได้จากสมการที่ (3-2) เมื่อ

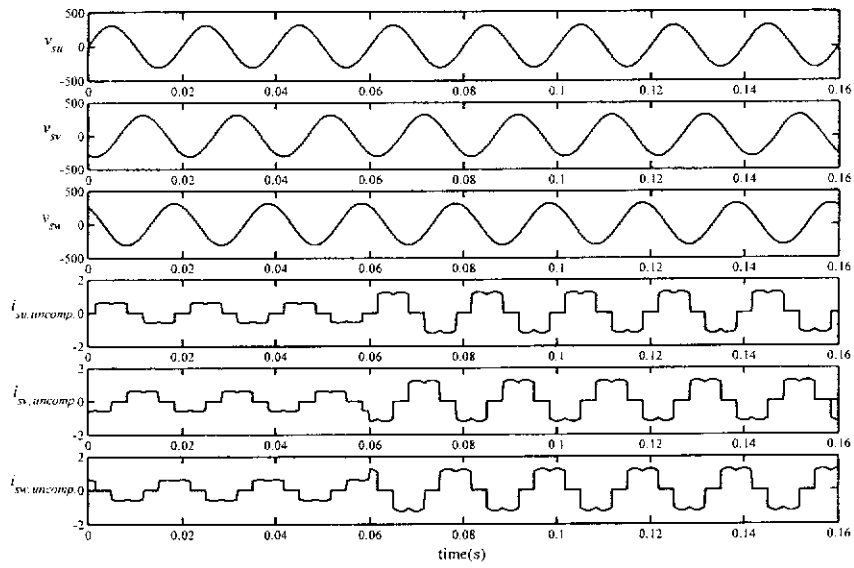
$$\%THD_{i,ave} = \sqrt{\frac{\sum_{k=u,v,w} (\%THD_{i(k)})^2}{3}} \quad (3-2)$$

ได้มีการชดเชยฮาร์มอนิกแล้ว กระแส  $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$  มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มาก อาจมีการบิดเบี้ยวบ้างแต่เพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจสังเกตได้จากรูปคลื่นของสัญญาณเหล่านี้ในรูปที่ 3.3 ข) ถึง 3.3 ง) ตามลำดับ ข้อมูลด้าน %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยและ %unbalance ได้รับการรวบรวมแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 จากข้อมูลในตารางดังกล่าวอาจสังเกตได้ว่า วิธี SWFA และ DQF เป็นวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่มีความถูกต้องมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ จึงส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกได้ผลดีที่สุด โดยภายหลังการชดเชย ค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่วิธี DQ ให้ผลการระบุเอกลักษณ์ได้ไม่ดีเท่าใดนัก จึงส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกได้ผลไม่ดีไปด้วยเช่นกัน โดยค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.02 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังอยู่ภายในขอบเขตตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการกำจัดฮาร์มอนิก ที่ใช้วิธีการ

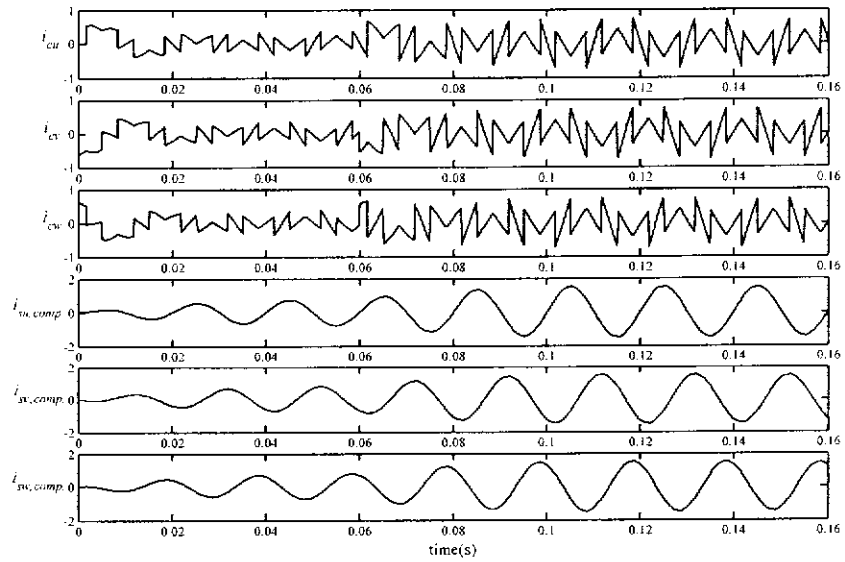
ระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี SWFA และ DQF ในรูปที่ 3.3 ค) และ 3.3 ง) สังเกตได้ว่าในช่วง 0.02 วินาทีแรกยังไม่มีการกำจัดฮาร์มอนิกเกิดขึ้น โดยไม่มีการฉีดกระแสชดเชยใดๆ เลย ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการดังกล่าวต้องใช้เวลากำหนดค่าเริ่มต้น (initialisation) ให้กับการคำนวณ และเมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะชั่วคราวเนื่องจากการสวิตช์โหลดความต้านทานต่อขนานเพิ่มเข้าไปในระบบที่เวลา 0.06 วินาที สังเกตได้ว่ากระแส  $i_{cu}$ ,  $i_{cv}$  และ  $i_{cw}$  ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันที่เวลาดังกล่าว โดยสังเกตได้จากรูปที่ 3.3 ข) ถึง 3.3 ง) โดยเฉพาะเฟส v และเฟส w สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของกระแส  $i_{cv}$  และ  $i_{cw}$  อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เฟส u ค่ากระแส  $i_{cu}$  ไม่สามารถสังเกตถึงการเปลี่ยนแปลงได้อย่างเด่นชัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่เวลา 0.06 วินาที กระแส  $i_{su,uncomp.}$  ที่ใช้ในกระบวนการการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกไม่มีการเปลี่ยนแปลง และมีค่าเป็นศูนย์ที่เวลาดังกล่าว จึงส่งผลให้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในเฟส u ที่ให้ผลลัพธ์เป็นกระแส  $i_{cu}$  ไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดเหมือนกับเฟส v และเฟส w นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ ดังรูปที่ 3.3 ข) ยังสังเกตได้อีกว่า การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกใช้เวลาประมาณ 0.04 วินาที จึงเข้าสู่สถานะคงตัวหลังจากมีการสวิตช์โหลดความต้านทาน จึงส่งผลให้ค่ากระแส  $i_{su,comp.}$ ,  $i_{sv,comp.}$  และ  $i_{sw,comp.}$  เข้าสู่สถานะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.1 วินาที ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ ใช้วงจรกรองผ่านสูงในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกออกจากองค์ประกอบมูลฐานตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ซึ่งการใช้วงจรดังกล่าวอาจทำให้เกิดเวลาประวิงได้ ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ที่มีการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี SWFA และ DQF ดังรูปที่ 3.3 ค) และ 3.3 ง) สังเกตได้ว่ากระแสชดเชยที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้ ใช้เวลาประมาณ 0.02 วินาที จึงเข้าสู่สถานะคงตัวหลังจากสวิตช์โหลดความต้านทาน ทั้งนี้เนื่องจากวิธี SWFA และ DQF มีขั้นตอนกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับการคำนวณ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 0.02 วินาที อย่างไรก็ตามผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะชั่วคราวดังกล่าวข้างต้น พบว่า การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธีสามารถให้ข้อมูลฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องตามการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของกระแส  $i_{su,uncomp.}$ ,  $i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$  นอกจากนี้ความสมดุลทั้งก่อนและหลังการชดเชยสามารถพิจารณาได้จากค่า %unbalance ในตารางที่ 3.1 โดยคำนวณค่าดังกล่าวตามสมการที่ (3-3) ตามมาตรฐาน IEEE Std. 141-1993 โดยก่อนการชดเชยค่า %unbalance เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่หลังการชดเชยที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี ต่างก็ให้ %unbalance เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกันทั้งสิ้น ซึ่งหมายถึงระบบทั้งก่อนและหลังการชดเชยอยู่ในสถานะสมดุล

$$\% \text{ unbalance} = \frac{|\text{maximum current deviation from average rms current}|}{\text{average rms current}} \times 100\% \quad (3-3)$$

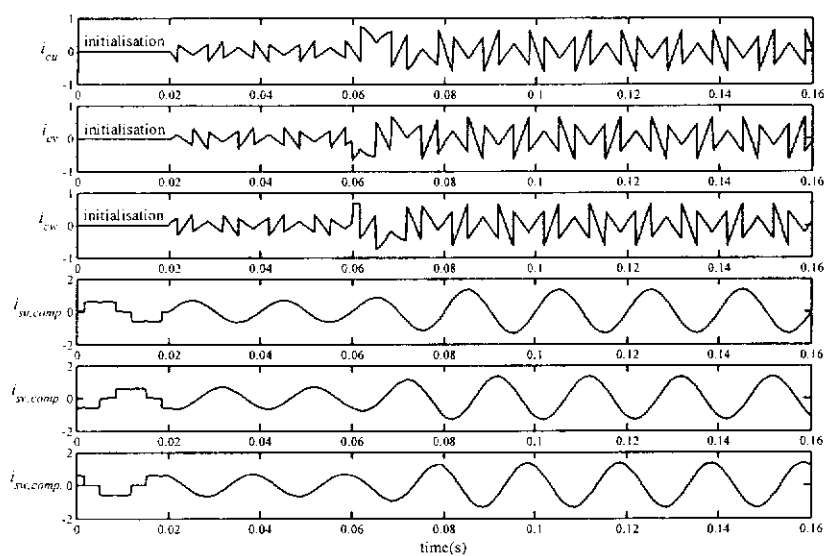




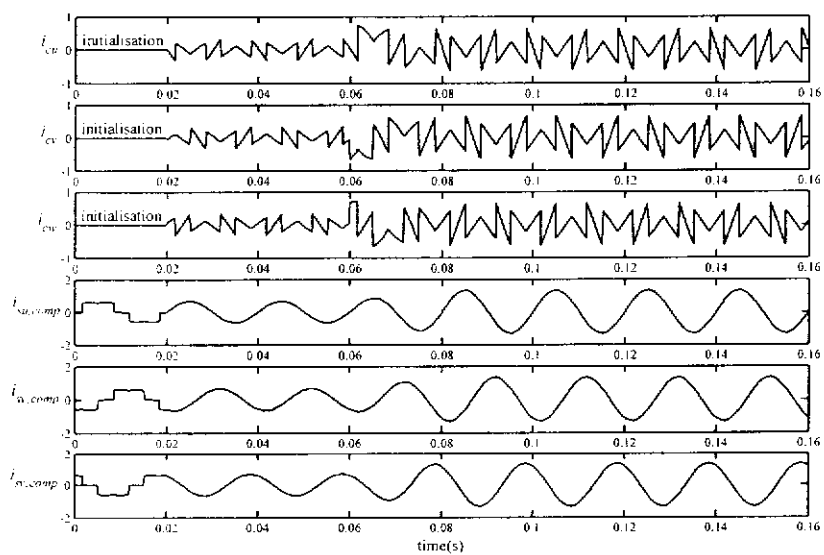
ก) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย



ข) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ก) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ง) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

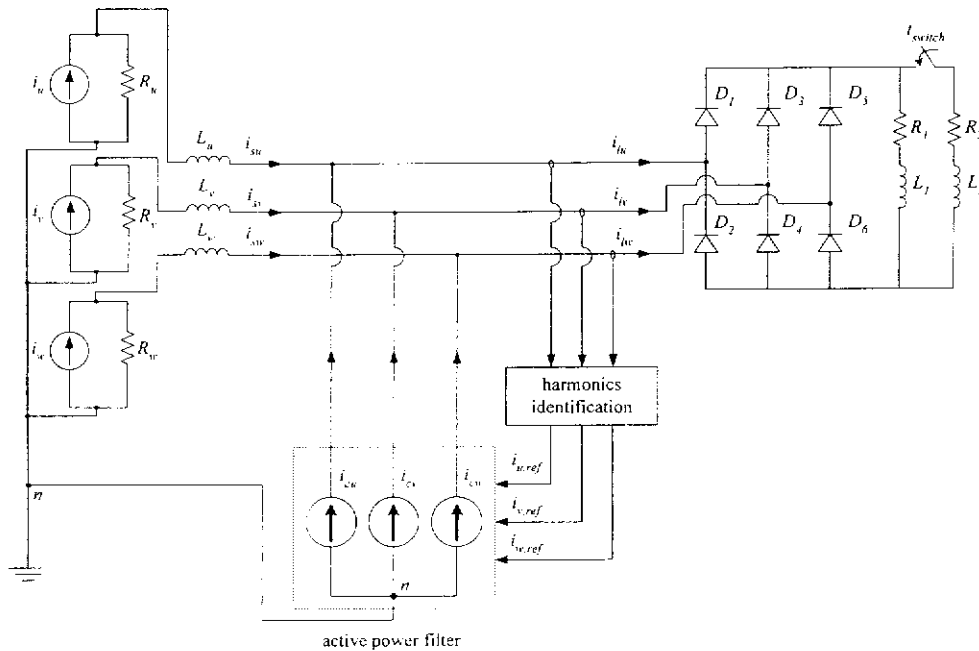
รูปที่ 3.3 ผลการจำลองฮาร์มอนิกเมื่อระบบมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส  
ที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 3.1 ผลการจำลองสถานการณ์ในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

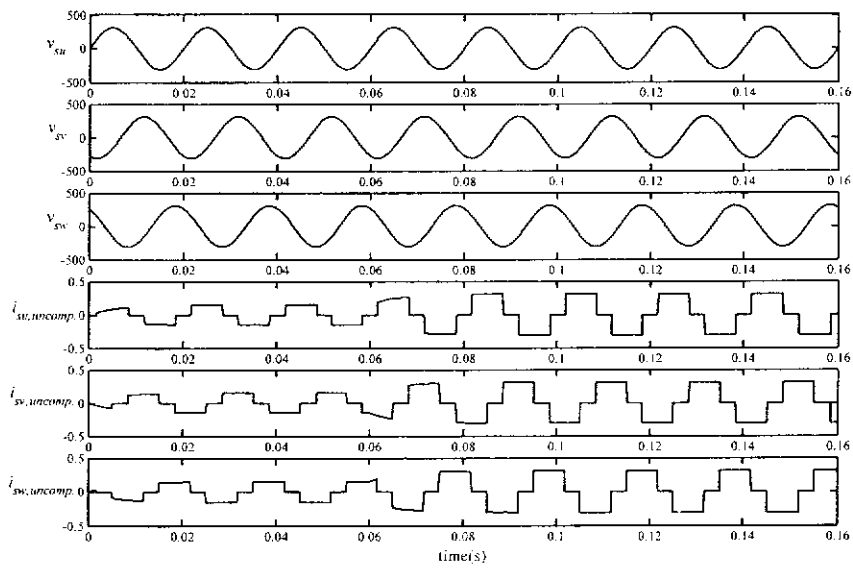
วิธีการระบุ เอกลักษณ์ฮาร์มอนิก	%THD <sub>i</sub> เฟส u	%THD <sub>i</sub> เฟส v	%THD <sub>i</sub> เฟส w	%THD <sub>i</sub> เฉลี่ย	$i_{su}$ (rms)	$i_{sv}$ (rms)	$i_{sw}$ (rms)	unbalance (%)
ก่อนการชดเชย	28.43	29.09	28.42	28.65	0.96	0.96	0.96	0
หลังการชดเชย								
วิธี DQ	0.81	1.08	1.13	1.02	1.02	1.02	1.02	0
วิธี SWFA	0	0	0	0	0.93	0.93	0.93	0
วิธี DQF	0	0	0	0	0.93	0.93	0.93	0

ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อโหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

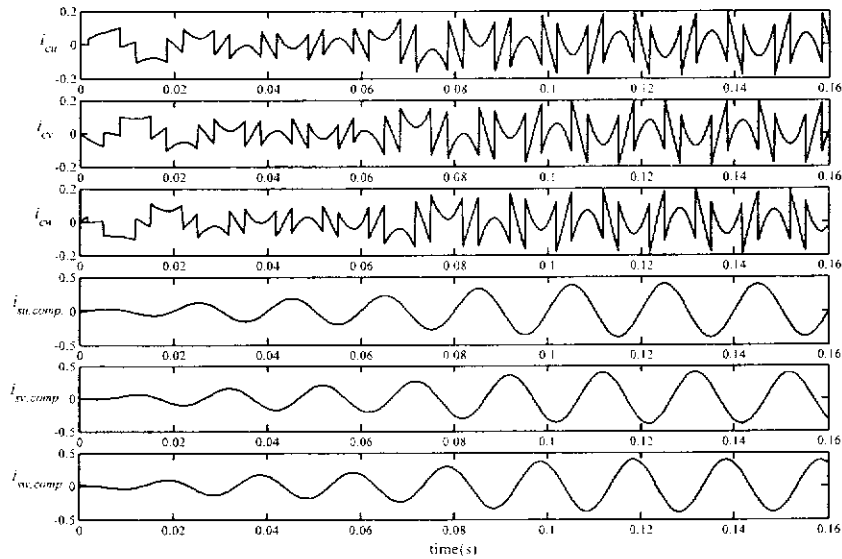
โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในหัวข้อนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 โดยค่า  $R_u$ ,  $R_v$  และ  $R_w$  ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์มีค่าเท่ากับ 0.001 โอห์ม ค่า  $L_u$ ,  $L_v$  และ  $L_w$  มีค่าเท่ากับ 100 ไมโครเฮนรี ค่าโหลดความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  สมมติให้มีค่าเท่ากับ 3.37 กิโลโอห์ม ส่วนค่าโหลดตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  และ  $L_2$  สมมติมีค่าเท่ากับ 19.8 เฮนรี โดยรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน  $v_{su}$ ,  $v_{sv}$  และ  $v_{sw}$  และกระแส  $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$  แสดงไว้ดัง



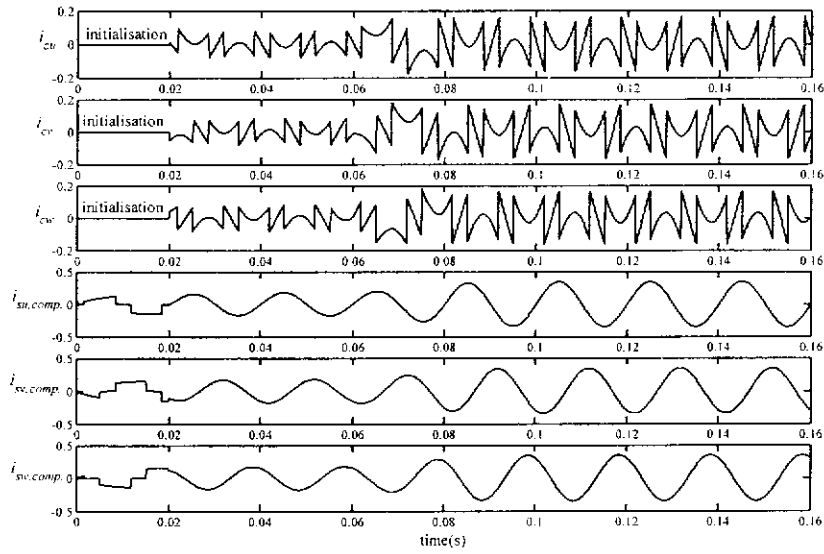
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสต่อกับโหลดความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ



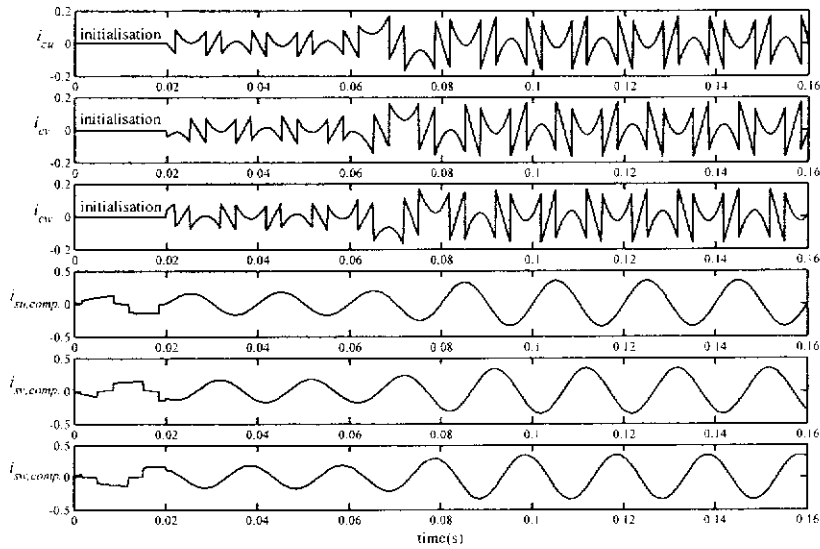
ก) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย



ข) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ค) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ง) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

รูปที่ 3.5 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อระบบมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส  
ที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

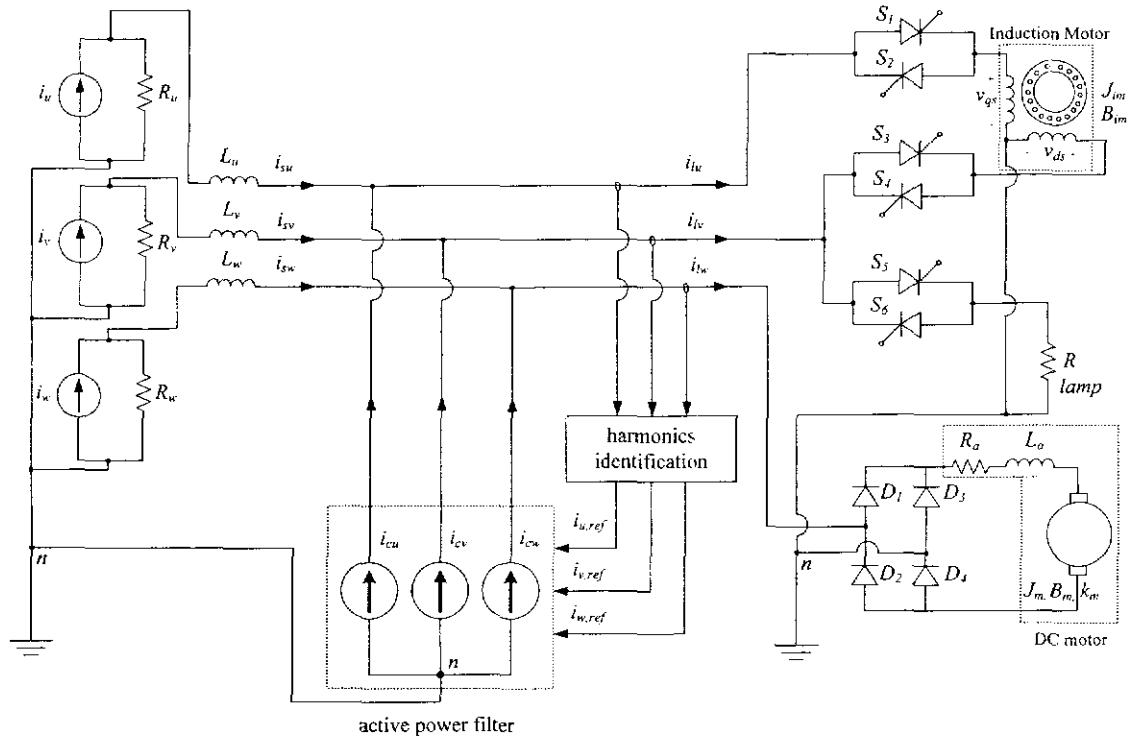
รูปที่ 3.5 ก) การจำลองสถานการณ์ดังกล่าว กำหนดให้มีการสวิตช์โหลดความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำชุดที่สองต่อขนานกับชุดที่หนึ่งเป็นเวลา 0.06 วินาที จึงส่งผลให้ค่าแอมพลิจูดของ  $i_{su,uncomp.}$ ,  $i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$  มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 0.06 วินาที ส่วนรูปคลื่นสัญญาณของกระแส  $i_{cu}$ ,  $i_{cv}$  และ  $i_{cw}$  และกระแส  $i_{su,comp.}$ ,  $i_{sv,comp.}$  และ  $i_{sw,comp.}$  ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ SWFA และ DQF แสดงไว้ดังรูปที่ 3.5 ข) ถึง 3.5 ง) ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์สามารถสังเกตได้ว่าก่อนการชดเชย กระแส  $i_{su,uncomp.}$ ,  $i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$  มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ โดยดูได้จากรูปที่ 3.5 ก) ในขณะที่หลังการชดเชยกระแส  $i_{su,comp.}$ ,  $i_{sv,comp.}$  และ  $i_{sw,comp.}$  มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น ทั้งนี้อาจดูได้จากค่า %THD<sub>i</sub> ในตารางที่ 3.2 โดยที่ค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 28.52 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่ามาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 อยู่มาก แต่ภายหลังการชดเชย สังเกตได้ว่าการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และ DQF ให้ผลการระบุเอกลักษณ์ได้ดีที่สุด จึงส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกได้ผลดีที่สุดด้วยเช่นกัน โดยค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชย ที่อาศัยการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การชดเชยที่ใช้วิธี DQ ในการระบุเอกลักษณ์มีค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชยเท่ากับ 0.93 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความมากที่สุด และจากการจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองในสภาวะชั่วคราว และค่า %unbalance พบว่ามีผลที่คล้ายคลึงกับที่ปรากฏในคำอธิบายและอภิปรายผลในหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว

ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองสถานการณ์ในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก	%THD <sub>i</sub> เฟส u	%THD <sub>i</sub> เฟส v	%THD <sub>i</sub> เฟส w	%THD <sub>i</sub> เฉลี่ย	$i_{su}$ (rms)	$i_{sv}$ (rms)	$i_{sw}$ (rms)	unbalance (%)
ก่อนการชดเชย	28.35	28.86	28.35	28.52	0.25	0.25	0.25	0
หลังการชดเชย								
วิธี DQ	0.67	1.01	1.07	0.93	0.27	0.27	0.27	0
วิธี SWFA	0	0	0	0	0.24	0.24	0.24	0
วิธี DQF	0	0	0	0	0.24	0.24	0.24	0

ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

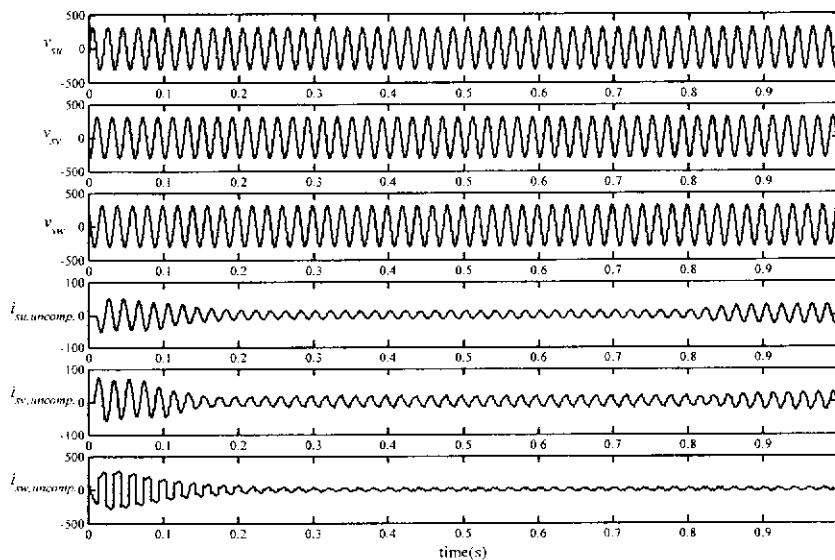
โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในหัวข้อนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 โดยค่า  $R_u$ ,  $R_v$  และ  $R_w$  ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์มีค่าเท่ากับ 0.001 โอห์ม ค่า  $L_u$ ,  $L_v$  และ  $L_w$  มีค่าเท่ากับ 100 ไมโครเฮนรี ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิด



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

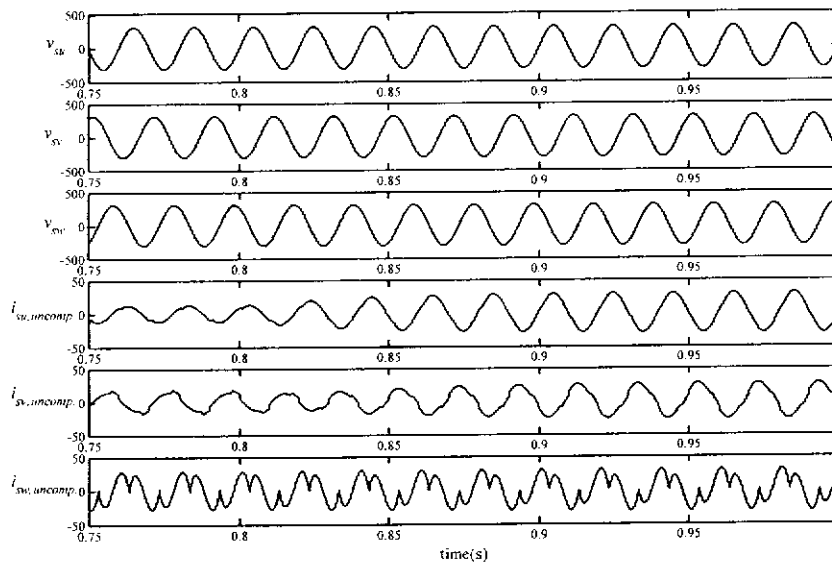
วงจรสนามแยกส่วนมีค่า  $R_a$  เท่ากับ 0.6 โอห์ม  $L_a$  เท่ากับ 8 มิลลิเฮนรี  $J_m$  เท่ากับ 0.0465 กิโลกรัม×เมตร<sup>2</sup>  $B_m$  เท่ากับ 0.004 นิวตัน×เมตร×วินาที/เรเดียน และค่า  $k_m$  เท่ากับ 0.55 นิวตัน×เมตร/แอมแปร์ (Sousa and Bose, 1994) ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ประกอบด้วย ค่า  $r_{qs}$  เท่ากับ 2.6 โอห์ม ค่า  $r_{ds}$  เท่ากับ 1.3 โอห์ม ค่า  $r_{rr}$  เท่ากับ 2.01 โอห์ม ค่า  $L_{mq}$  เท่ากับ 0.2785 เฮนรี ค่า  $L_{lr}$  เท่ากับ 0.0074 เฮนรี ค่า  $L_{lqs}$  และ  $L_{lds}$  เท่ากับ 0.0053 เฮนรี ค่า  $J_{im}$  เท่ากับ 0.3 กิโลกรัม×เมตร<sup>2</sup> และค่า  $B_{im}$  เท่ากับ 0.005 นิวตัน×เมตร×วินาที/เรเดียน (Rahim, 2002) นอกจากนี้ในการจำลองสถานการณ์ กำหนดให้มุมจุดชนวนเกทของเอสซีอาร์  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  ที่ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 3.6 มีค่าเท่ากับ 20 องศา ในขณะที่มุมจุดชนวนเกทของเอสซีอาร์  $S_5$  และ  $S_6$  ที่ควบคุมความสว่างของหลอดไฟที่แทนด้วยความต้านทาน  $R$  เท่ากับ 50 โอห์มมีค่าเท่ากับ 60 องศา รูปสัญญาณแรงดัน  $v_{su}, v_{sv}$  และ  $v_{sw}$  และกระแส  $i_{su,uncomp.}, i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$  ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ก) จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าในช่วง 0.3 วินาทีแรก  $i_{su,uncomp.}, i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$  มีค่าสูงมากและมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงการเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ การจำลองสถานการณ์ดังกล่าว กำหนดให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อกับโหลด 2 นิวตัน×เมตร และมอเตอร์

ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสต่อกับโหลด 40 นิวตัน×เมตร ที่เวลาดั้งแต่ 0.8 วินาทีเป็นต้นไป ด้วยเหตุนี้ค่ากระแส  $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$  จึงมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่วินาทีที่ 0.8 เป็นต้นไป และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.9 วินาที โดยดูได้จากรูปที่ 3.7 ข) ที่เป็นการพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ตั้งแต่เวลาที่ 0.75 ถึง 1 วินาที ส่วนรูปสัญญาณของกระแส  $i_{cu}$ ,  $i_{cv}$  และ  $i_{cw}$  และกระแส  $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$  ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ SWFA และ DQF แสดงไว้ดังรูปที่ 3.7 ค) ถึง 3.7 จ) ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวสังเกตได้ว่าการชดเชย กระแส  $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$  มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ และมีแอมพลิจูดไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลให้ระบบอยู่ในสภาวะไม่สมดุลก่อนการชดเชย โดยดูได้จากรูปที่ 3.7 ข) อีกทั้งค่า %unbalance ก่อนการชดเชยในตารางที่ 3.3 มีค่าเท่ากับ 6.15 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่หลังการชดเชยกระแส  $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$  มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณ ไซน์มากขึ้น ทั้งนี้อาจดูได้จากค่า %THD จากตารางที่ 3.3 โดยที่ค่า %THD เดลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 28.39 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายหลังการชดเชย สังเกตได้ว่าวิธี DQF ให้ข้อมูลปริมาณฮาร์มอนิกที่มีความถูกต้องสูงที่สุด จึงนำไปสู่การกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด โดยค่า %THD เดลี่ยหลังการชดเชยที่อาศัยวิธีการระบุเอกลักษณ์ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 1.60 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสมดุลภายหลังการชดเชย พบว่า การชดเชยฮาร์มอนิกที่อาศัยวิธี DQF เป็นวิธีการระบุเอกลักษณ์สามารถรักษาสภาพ

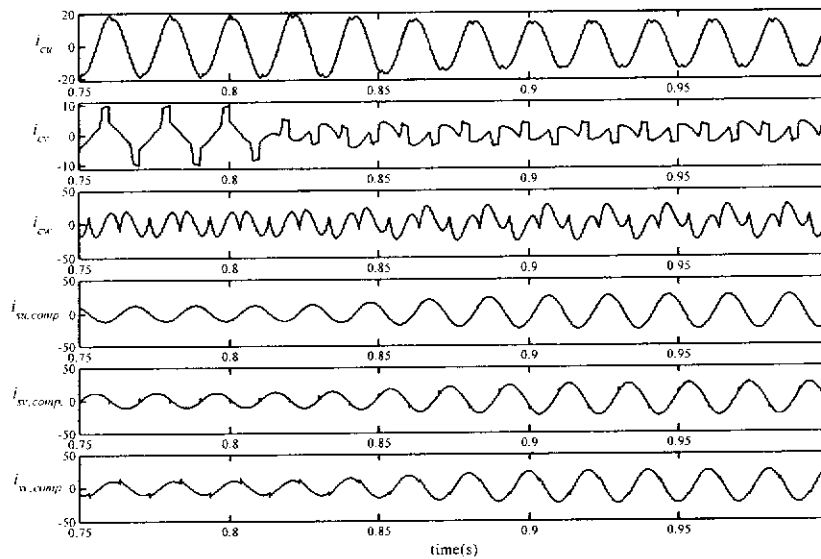


ก) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย

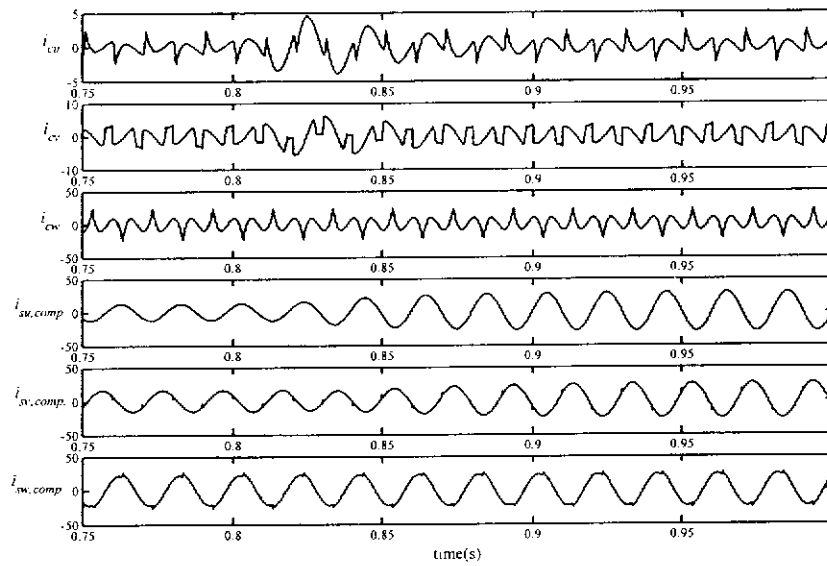




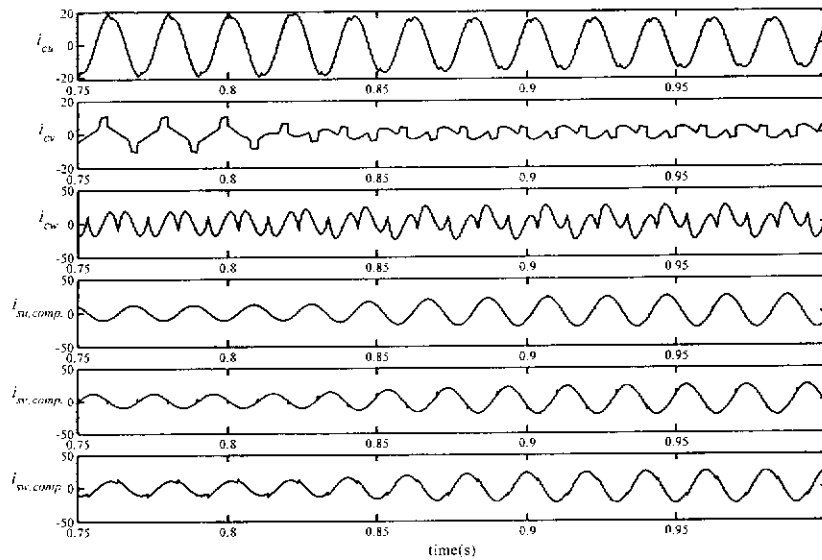
ข) แรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย  
เมื่อพิจารณาผลในช่วงเวลา 0.75 ถึง 1 วินาที



ค) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ง) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



จ) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

รูปที่ 3.7 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

ตารางที่ 3.3 ผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะที่ระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

วิธีการระบุเอกลักษณ์	%THD <sub>u</sub>	%THD <sub>v</sub>	%THD <sub>w</sub>	%THD <sub>เฉลี่ย</sub>	$i_{su}$	$i_{sv}$	$i_{sw}$	unbalance (%)
ฮาร์มอนิก	เฟส u	เฟส v	เฟส w	เฉลี่ย	(rms)	(rms)	(rms)	
ก่อนการชดเชย	3.68	10.52	47.89	28.39	20.96	18.79	19.49	6.15
หลังการชดเชย								
วิธี DQ	1.02	1.59	4.55	2.84	17.65	17.08	17.13	2.10
วิธี SWFA	0.16	1.31	2.74	1.76	20.89	18.59	17.48	10.03
วิธี DQF	0.14	1.46	2.35	1.60	16.68	16.65	16.70	0.16

สมดุลภายหลังการชดเชยได้ดีที่สุด ซึ่งค่า %unbalance ที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 มีค่าเท่ากับ 0.16 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การชดเชยฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ไม่สามารถรักษาสภาพสมดุลภายหลังการชดเชยได้เลย ซึ่งค่า %unbalance ที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 มีค่าเท่ากับ 10.03 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการชดเชยฮาร์มอนิกที่อาศัยวิธี DQ ในการระบุเอกลักษณ์ สามารถรักษาสภาพสมดุลได้บ้างภายหลังการชดเชย แต่ไม่ดีเท่ากับการชดเชยที่ใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ สาเหตุที่การชดเชยฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ไม่สามารถรักษาสมดุลไว้ได้ภายหลังการชดเชย เนื่องจากการชดเชยที่อาศัยวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกดังกล่าวไม่มีการคำนวณค่ากระแสซีควเอนซ์ศูนย์ (zero sequence) เหมือนกับวิธี DQF ซึ่งในสถานะไม่สมดุลของระบบ จะมีค่ากระแสซีควเอนซ์ศูนย์เกิดขึ้น และถ้าไม่มีการชดเชยกระแสดังกล่าว ค่ากระแสซีควเอนซ์ศูนย์จึงยังปรากฏอยู่ ทำให้ระบบนั้นคงอยู่ในสถานะไม่สมดุล นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะชั่วคราว สังเกตได้ว่า เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส เริ่มขับโหลดที่เวลา 0.8 วินาที กระแส  $i_{cu}$ ,  $i_{cv}$  และ  $i_{cw}$  ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธี ดังรูปที่ 3.7 ค) ถึง 3.7 จ) เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่เวลาดังกล่าวด้วยเช่นกัน จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 0.9 วินาที ทั้งนี้เนื่องจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่นำเสนอ มีการปรับเปลี่ยนปริมาณฮาร์มอนิกที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ ตามการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแส  $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$  ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้กระแส  $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$  ภายหลังการชดเชย มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างฉับพลัน

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่นำเสนอในบทนี้ ระบบที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก 3 วิธี มีทั้งหมด 3 ระบบด้วยกัน โดยในส่วนแรกเป็นระบบที่อยู่ในสถานะสมดุลก่อนการชดเชย และในส่วนที่สองเป็นระบบที่อยู่ในสถานะไม่สมดุลก่อนการชดเชย

จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า วิธี DQF และ SWFA ให้ผลการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด จึงส่งผลให้กำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้มากที่สุดในทุกสภาวะของระบบที่มีการทดสอบ ในขณะที่การชดเชยที่อาศัยวิธี DQ ในการระบุเอกลักษณ์ให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกอยู่ในกรอบมาตรฐานของ IEEE Std. 519-1992 ในทุกสภาวะของระบบที่มีการทดสอบ แต่ผลการกำจัดฮาร์มอนิกไม่ดีเมื่อเทียบกับการชดเชยที่อาศัยวิธี DQF และ SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ ทั้งนี้เนื่องจากวิธี DQ ใช้วงจรกรองผ่านสูงในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิก ออกจากองค์ประกอบมูลฐาน ซึ่งการใช้วงจรดังกล่าวไม่สามารถแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความถี่ตัดของวงจรดังกล่าวเท่ากับ 5 เฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นค่าที่ได้ทดสอบด้วยการลองผิดลองถูก แล้วพบว่าสามารถแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิก ออกจากองค์ประกอบมูลฐานได้ค่อนข้างดี ถ้าพิจารณาการรักษาภาวะสมดุลหลังการชดเชย สังเกตได้ว่า การชดเชยที่ใช้วิธี DQF ระบุเอกลักษณ์ สามารถทำให้ระบบที่อยู่ในสภาวะไม่สมดุลก่อนการชดเชย กลับสู่สภาวะสมดุลหลังการชดเชยได้ ส่วนการชดเชยที่อาศัยวิธี DQ ในการระบุเอกลักษณ์สามารถรักษาภาวะสมดุลหลังการชดเชยได้เช่นกัน แต่ไม่ดีเท่ากับวิธี DQF ส่วนการชดเชยที่ใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ไม่สามารถรักษาภาวะสมดุลได้เลย ทั้งนี้เนื่องมาจากวิธี SWFA ไม่มีการคำนวณกระแสซีเคเวนซ์ศูนย์ ซึ่งทำให้วงจรกรองกำลังแยกที่ไฟไม่สามารถฉีดกระแสชดเชยในส่วนนี้ได้ จากผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์ในการชี้วัดสมรรถนะของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก โดยมีค่า %THD<sub>1</sub> และค่า %unbalance หลังการชดเชยเป็นตัวบ่งชี้ เกณฑ์ดังกล่าวได้รับการแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 ส่วนตารางที่ 3.5 แสดงคุณภาพสมรรถนะของการใช้วิธีระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี ซึ่งอาจสรุปได้ว่าการชดเชยที่อาศัยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด และสามารถรักษาภาพสมดุลของระบบสามเฟสภายหลังการชดเชยได้อีกด้วย ถ้าพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ในสภาวะชั่วคราว ของระบบต่าง ๆ ที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก 3 วิธี พบว่า การชดเชยฮาร์มอนิกที่อาศัยวิธีการระบุเอกลักษณ์วิธีต่าง ๆ ให้ผลการชดเชยเป็นที่น่าพอใจถึงแม้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบอย่างฉับพลัน การระบุเอกลักษณ์ทั้ง 3 วิธี ยังสามารถให้ข้อมูลฮาร์มอนิกที่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะโหลดของระบบได้อย่างดี แต่ระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี ต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธี ซึ่งได้แทรกการอธิบายไว้แล้วในแต่ละหัวข้อ

ตารางที่ 3.4 เกณฑ์ในการชี้วัดสมรรถนะการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก

เกณฑ์	ค่า %THD	ค่า %unbalance
ดีมาก	$THD \leq 10^{-4} \approx 0\%$	$unbalance \leq 10^{-4} \approx 0\%$
ดี	$10^{-4} \approx 0\% < THD < 5\%$	$10^{-4} \approx 0\% < unbalance < 5\%$
ใช้ไม่ได้	$THD \geq 5\%$	$unbalance \geq 5\%$

ตารางที่ 3.5 สมรรถนะของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกในแต่ละวิธี

สถานะโหลดของระบบ	วิธี DQ	วิธี SWFA	วิธี DQF
	สมรรถนะในด้านการกำจัดฮาร์โมนิก		
วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว	ดี	ดีมาก	ดีมาก
วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ	ดี	ดีมาก	ดีมาก
ระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุล	ดี	ดี	ดี
สถานะโหลดของระบบ	สมรรถนะในด้านการรักษาภาวะสมดุลหลังกำจัดฮาร์โมนิก		
ระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุล	ดี	ใช้ไม่ได้	ดี

## สรุป

ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกที่นำเสนอในบทนี้ เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกแต่ละวิธี ซึ่งดัชนีชี้วัดสมรรถนะดังกล่าวพิจารณาจากค่า %THD และค่า %unbalance หลังการชดเชย ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า วิธี DQF เป็นวิธีการระบุเอกลักษณ์ที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี DQ และ SWFA วิธี DQF ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถให้ข้อมูลฮาร์โมนิกที่มีความถูกต้องมากที่สุด นำไปสู่การกำจัดฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบได้ดีที่สุด รวมถึงสามารถรักษาภาวะสมดุลหลังการชดเชยได้อย่างดี

## บทที่ 4

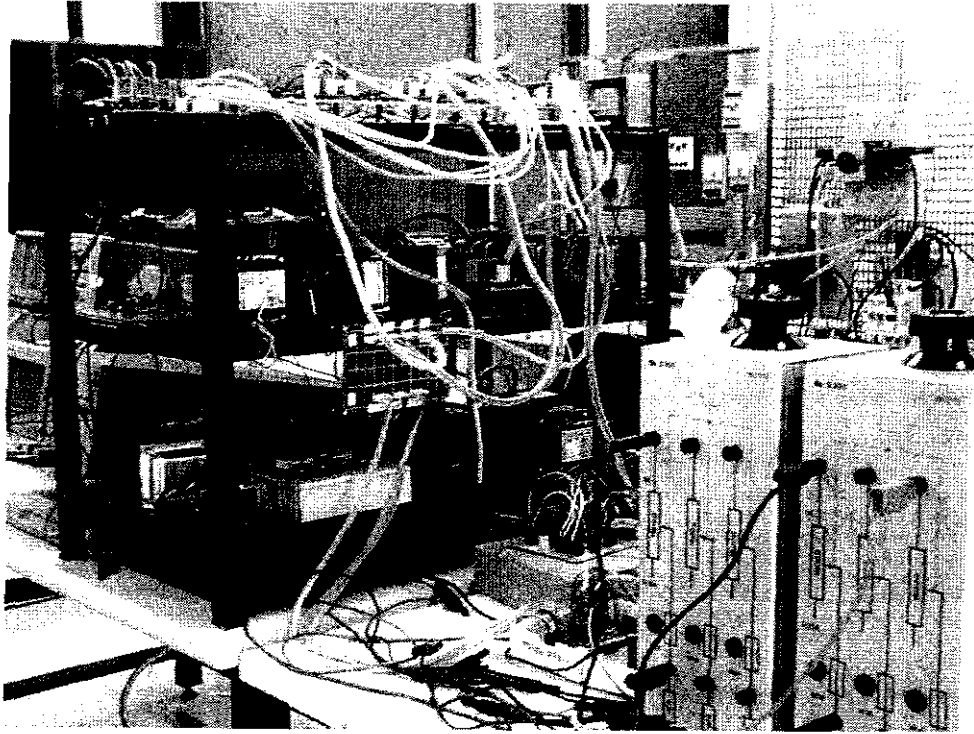
### ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก

#### กล่าวนำ

บทนี้นำเสนอเนื้อหาผลการทดสอบ และอภิปรายผล วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก DQF ได้รับการอนุมัติลงบนหน่วยประมวลผลสัญญาณ DSP รุ่น eZdsp™ F2812 วงจรรอกกำลังแอกทีฟที่มีรูปแบบเป็นวงจรขยายกำลัง มีอัตราพิกัด 150 วัตต์ ที่สามารถให้การตอบสนองทางความถี่ราบเรียบมากที่สุด ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ข. กลไกการกำจัดฮาร์มอนิก จึงมีลำดับขั้นดังนี้ คือ เริ่มต้นจากการนำผลวัดกระแสแต่ละเฟสไปผ่านกระบวนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ซึ่งดำเนินการโดย DSP eZdsp™ F2812 จากนั้นจึงนำกระแสชดเชยกำลังต่ำจาก DSP ไปผ่านการขยายกำลัง และฉีดกระแสชดเชยที่ขยายกำลังแล้วเข้าสู่ระบบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นของระบบที่ใช้ทดสอบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นตัวแทนของโหลดทางไฟฟ้ากำลัง เช่น เครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น

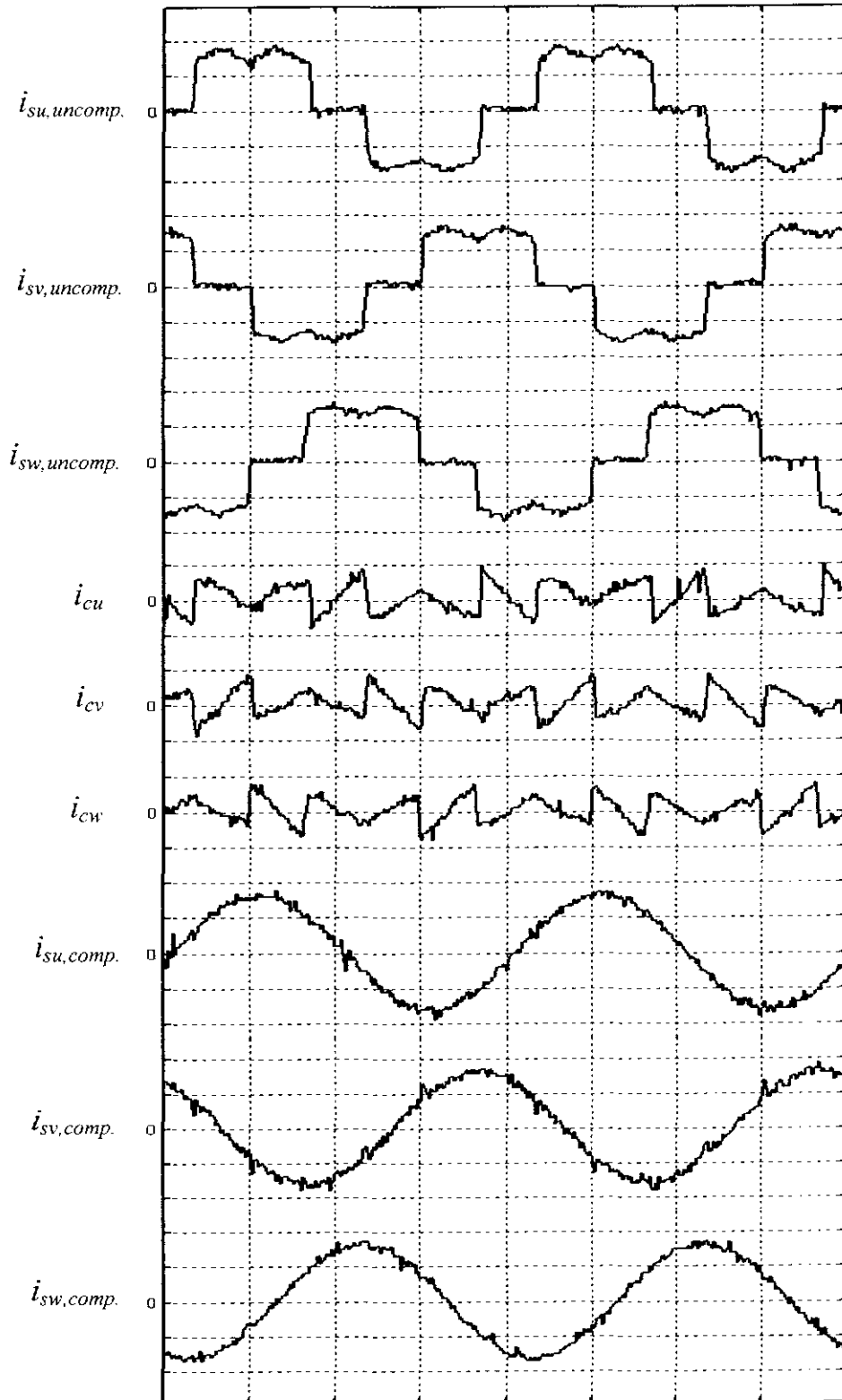
#### ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก ที่นำเสนอในหัวข้อนี้ ระบบที่ใช้ในการทดสอบมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดหนึ่งชุดเป็นความต้านทาน การทดสอบดังกล่าวมีการลดพิกัดแรงดันไฟฟ้าของระบบสามเฟส จาก 220 โวลต์อาร์เอ็มเอสในแต่ละเฟส เหลือเพียง 60 โวลต์อาร์เอ็มเอส ทั้งนี้เพื่อลดพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟ และเพื่อความปลอดภัย ความต้านทานหนึ่งชุดที่เป็นโหลดของวงจรเรียงกระแสมีขนาด 400 โอห์ม รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพของระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อการทดสอบนี้ ผลการทดสอบของระบบได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 สเกลแกนนอนของรูปที่ 4.2 เป็น 5 มิลลิวินาทีต่อช่อง ในขณะที่สเกลแกนตั้งเป็น 0.2 แอมแปร์ต่อช่อง จากรูปดังกล่าว กระแสไฟฟ้าก่อนการชดเชย ( $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$ ) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ โดยที่ค่า %THD<sub>i</sub> ในแต่ละเฟส ดูได้จากตารางที่ 4.1 ค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 28.28 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายหลังการชดเชยฮาร์มอนิก รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าหลังการชดเชย ( $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$ ) มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์บริสุทธิ์อย่างมาก ข้อมูลด้าน %THD<sub>i</sub> ในแต่ละเฟส และ %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชย ดูได้จากตารางที่ 4.1 ค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 2.64 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนมีการชดเชย เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการชดเชยของเฟส u ไปวิเคราะห์หาสเปกตรัม เพื่อดูปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงไว้



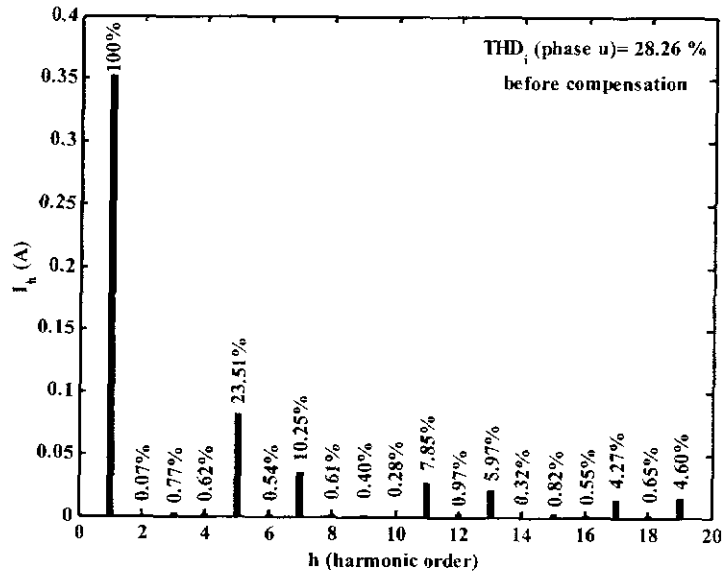
รูปที่ 4.1 ระบบที่ใช้ทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกของงานวิจัย

ในรูปที่ 4.3 แกนนอนของรูปดังกล่าว คือ ลำดับฮาร์มอนิก ( $h$ ) แกนตั้ง คือ ค่ากระแสสูงสุดแต่ละลำดับฮาร์มอนิก ( $I_n$ ) จากรูปที่ 4.3 สังเกตได้ว่า ก่อนการชดเชยฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 7 11 13 17 และ 19 มีปริมาณมากอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับปริมาณฮาร์มอนิกที่ลำดับอื่น ๆ และมีค่าเกินกรอบมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 แต่ภายหลังการชดเชย ปริมาณฮาร์มอนิกที่ลำดับต่าง ๆ เหล่านี้มีค่าลดลงอย่างมาก โดยปริมาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีค่าลดลงจาก 23.51 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 0.17 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 7 ลดลงจาก 10.25 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.23 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 11 ลดลงจาก 7.85 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.43 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 13 ลดลงจาก 5.97 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.34 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 17 ลดลงจาก 4.27 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.62 เปอร์เซ็นต์ และลำดับที่ 19 ลดลงจาก 4.60 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งภายหลังการชดเชย ปริมาณฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ และค่า %THD<sub>i</sub> อยู่ในกรอบมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 ส่วนผลการวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อดูปริมาณฮาร์มอนิกสำหรับเฟส  $v$  และ  $w$  จะมีลักษณะในทำนองเดียวกับเฟส  $u$  จึงไม่ได้นำเสนอไว้ ณ ที่นี้ และเมื่อพิจารณาความสมดุลก่อนและหลังการชดเชย สังเกตได้ว่า ในสภาวะก่อนการชดเชยมีความไม่สมดุลเกิดขึ้นเล็กน้อย โดยดูได้จากค่า %unbalance ในตารางที่ 4.1 มีค่าเท่ากับ 6.85 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายหลังการชดเชยปรากฏว่าค่า %unbalance มีค่าเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายถึง ภายหลังการชดเชยระบบ

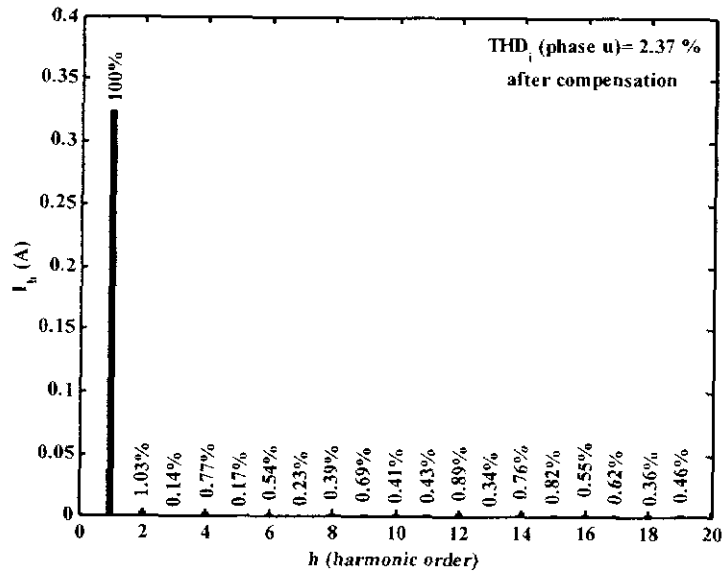


รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว  
(สเกลในแกนนอนเท่ากับ 5 ms/div. แกนตั้งเท่ากับ 0.2 A/div.)





ก) ก่อนการชดเชย



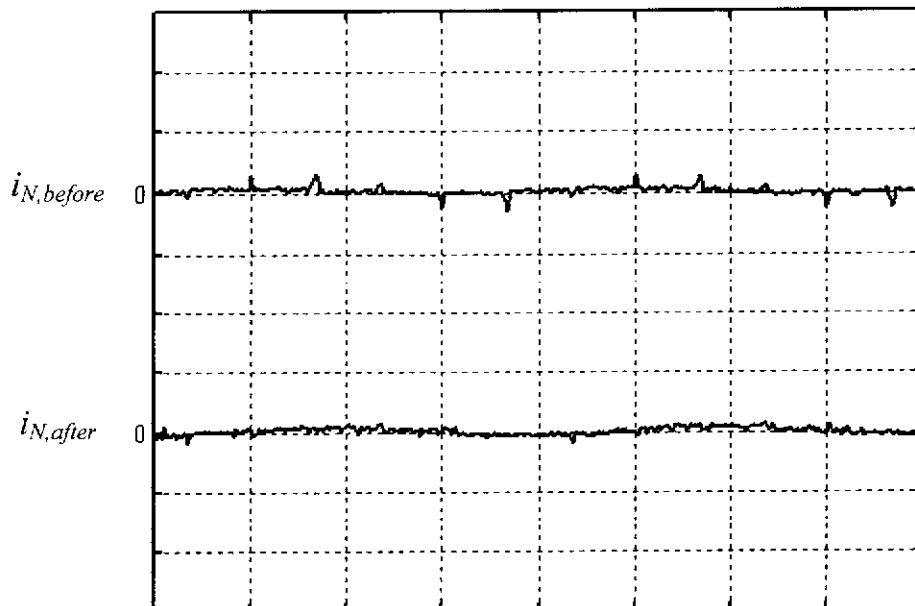
ข) หลังการชดเชย

รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเฟส u ก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลด  
ของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

อยู่ในสถานะสมดุล ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกใช้วิธี DQF ซึ่งเป็นวิธีที่มีการคำนวณกระแสเชิงอนุพันธ์ ดังนั้นกระแสอ้างอิงที่คำนวณได้จะรวมผลการชดเชยกระแสเชิงอนุพันธ์ดังกล่าวด้วย จึงส่งผลให้ระบบภายหลังการชดเชยอยู่ในสถานะสมดุล นอกจากนี้ในงานวิจัยมีการตรวจวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลก่อนการชดเชย ( $i_{N,before}$ ) และหลังการชดเชย ( $i_{N,after}$ ) ซึ่งจากการตรวจวัดพบว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลภายหลังการชดเชย ดังผลการตรวจวัดที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 อาจกล่าวได้ว่า ผลการทดสอบทางปฏิบัติในกรณีนี้ ให้ผลดีที่น่าพึงพอใจมาก ตลอดจนผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในสถานะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

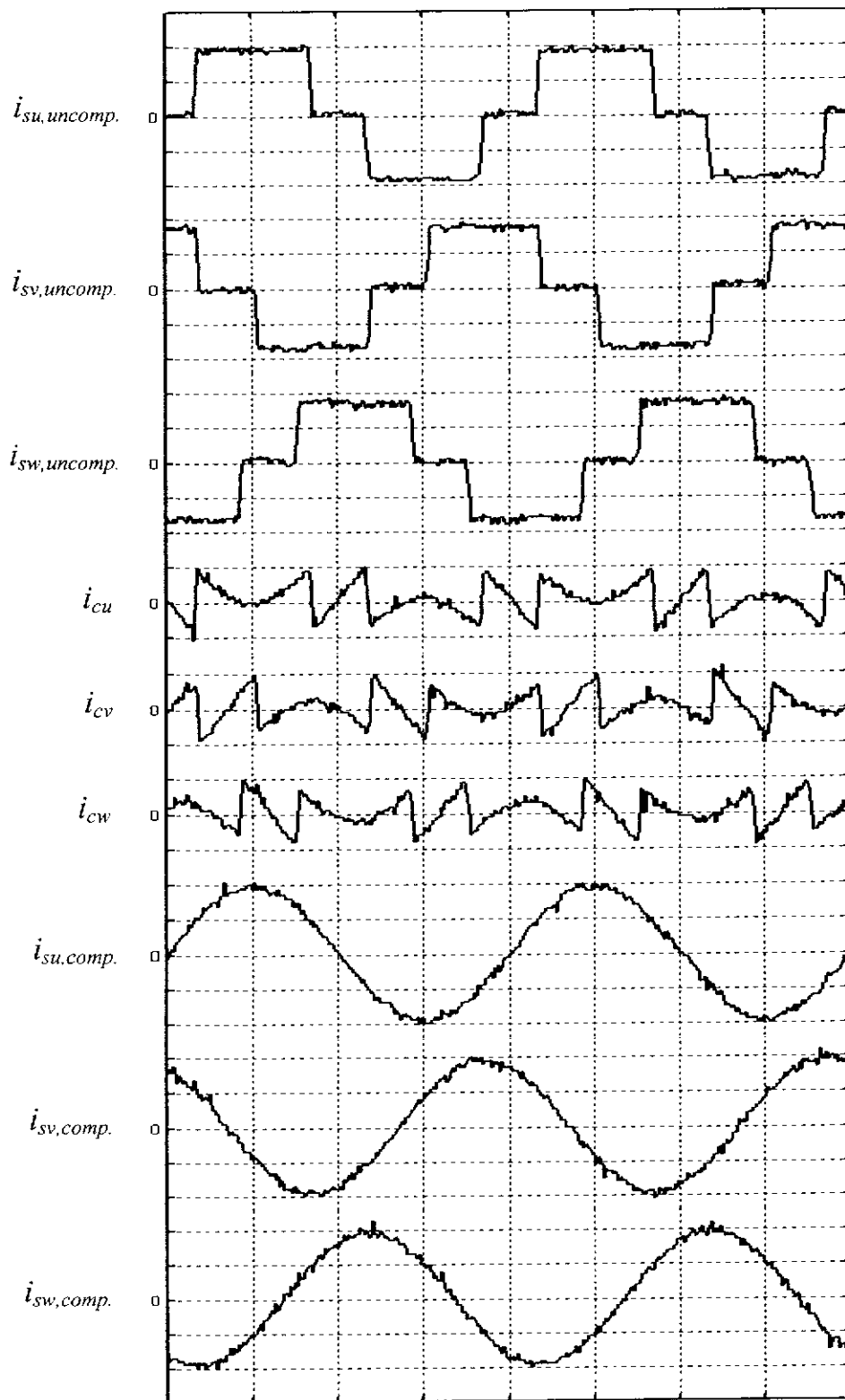
สถานะของระบบ	%THD, เฟส u	%THD, เฟส v	%THD, เฟส w	%THD, เฉลี่ย	$i_{su}$ (rms)	$i_{sv}$ (rms)	$i_{sw}$ (rms)	unbalance (%)
ก่อนการชดเชย	28.26	28.31	28.28	28.28	0.26	0.24	0.23	6.85
หลังการชดเชย	2.37	2.43	3.06	2.64	0.23	0.23	0.23	0



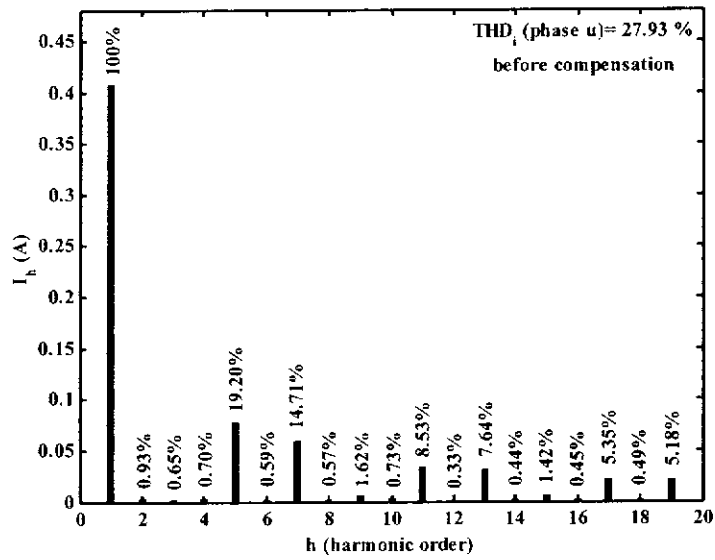
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นกระแสในสายนิวทรัลก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดเป็นความต้านทาน (สเกลในแกนนอนเท่ากับ 5 ms/div. แกนตั้งเท่ากับ 0.2 A/div.)

### ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

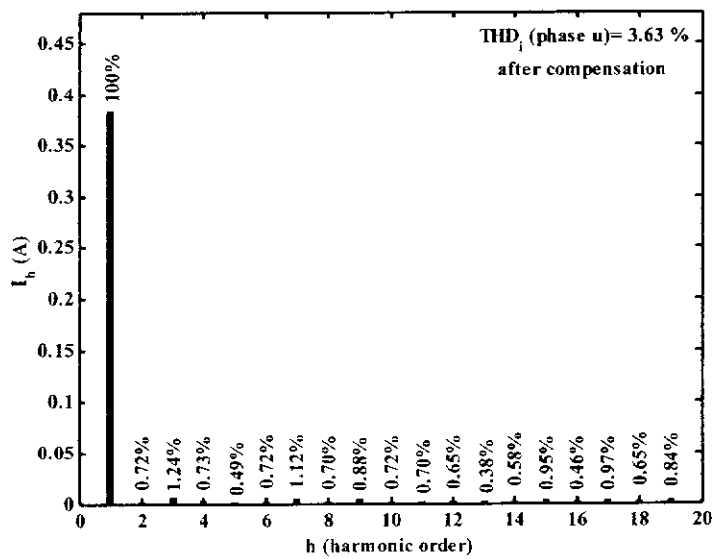
ระบบที่ใช้ในการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในหัวข้อนี้ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดหนึ่งชุดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ พิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบเหมือนกันกับที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ความต้านทานที่ใช้เป็นโหลดให้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีขนาด 300 โอห์ม ในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำมีขนาด 1.95 เฮนรี รูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ที่บันทึกไว้จากการทดสอบ ได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ซึ่งสังเกตได้ว่ากระแสไฟฟ้าก่อนการชดเชยมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ มีค่า %THD, เฉลี่ยก่อนการชดเชยเท่ากับ 27.98 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.2 ภายหลังการชดเชยกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์อย่างมาก ซึ่งค่า %THD, เฉลี่ยหลังการชดเชยเท่ากับ 2.79 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะก่อนการชดเชย และเมื่อดำเนินการวิเคราะห์สเปกตรัม เพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิก ก่อนและหลังการชดเชยของเฟส u ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อก่อนหน้านี้ จะได้สเปกตรัมดังรูปที่ 4.6 โดยก่อนการชดเชยปริมาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 7 11 13 17 และ 19 มีค่าเกินขอบเขตมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 อยู่มากแต่หลังการชดเชย ปริมาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ลดลงจาก 19.20 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.49 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 7 ลดลงจาก 14.71 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 1.12 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 11 ลดลงจาก 8.53 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.70 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 13 ลดลงจาก 7.64 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.38 เปอร์เซ็นต์ ลำดับที่ 17 ลดลงจาก 5.35 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.97 เปอร์เซ็นต์ และลำดับที่ 19 ลดลงจาก 5.18 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.84 เปอร์เซ็นต์ จากผลดังกล่าวข้างต้น ปริมาณฮาร์มอนิกเหล่านี้ มีค่าลดลง และอยู่ในกรอบมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 ส่วนผลการวิเคราะห์สเปกตรัม เพื่อดูปริมาณฮาร์มอนิกสำหรับเฟส v และ w จะมีลักษณะในทำนองเดียวกันกับเฟส u จึงไม่นำเสนอไว้ ณ ที่นี้ และเมื่อพิจารณาความสมดุลของระบบ ก่อนและหลังการชดเชย สังเกตได้ว่าที่สภาวะก่อนการชดเชยระบบมีความไม่สมดุลเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย โดยดูได้จาก %unbalance มีค่าเท่ากับ 5.88 เปอร์เซ็นต์ ในตารางที่ 4.2 แต่ภายหลังการชดเชยระบบกลับเข้าสู่สภาวะสมดุล และมีค่า %unbalance ภายหลังการชดเชยเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกใช้วิธี DQF ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีนี้ ส่งผลให้ภายหลังการชดเชยระบบจะอยู่ในสภาวะสมดุล (รายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับการความสมดุลหลังการชดเชยที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีDQF ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 2) นอกจากนี้งานวิจัยได้ทำการวัดรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล ก่อนและหลังการชดเชย ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 4.7 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าภายหลังการชดเชย ไม่ปรากฏกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ  
(สเกลในแกนนอนเท่ากับ 5 ms/div. แกนตั้งเท่ากับ 0.2 A/div.)



ก) ก่อนการชดเชย

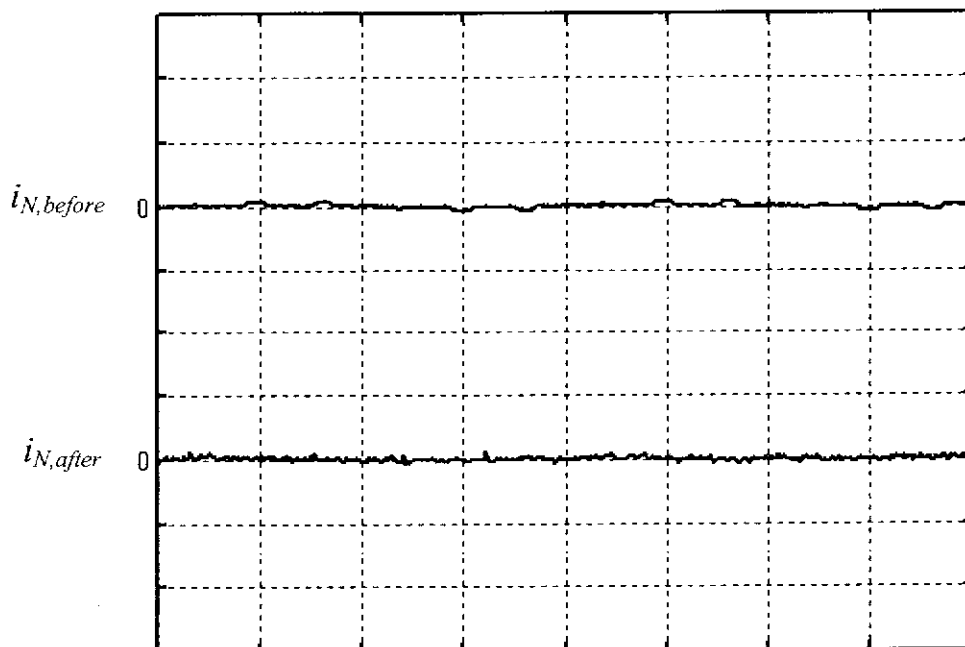


ข) หลังการชดเชย

รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเฟส u ก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในสถานะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

สถานะของระบบ	%THD <sub>i</sub> เฟส u	%THD <sub>i</sub> เฟส v	%THD <sub>i</sub> เฟส w	%THD <sub>i</sub> เฉลี่ย	$i_{su}$ (rms)	$i_{sv}$ (rms)	$i_{sw}$ (rms)	unbalance (%)
ก่อนการชดเชย	27.93	28.43	27.56	27.98	0.3	0.28	0.27	5.88
หลังการชดเชย	3.63	2.45	2.06	2.79	0.27	0.27	0.27	0



รูปที่ 4.7 รูปสัญญาณกระแสในสายนิวทรัลก่อนและหลังการชดเชยกรณี โหลดเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ (สเกลในแกนนอนเท่ากับ 5 ms/div. แกนตั้งเท่ากับ 0.2 A/div.)

### สรุป

ผลทดสอบในทางปฏิบัติ ของการใช้วิธี DQF ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ควบคู่กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นวงจรขยายกำลัง ให้ผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจอย่างมาก ทั้งในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โหลดที่ทดสอบดังกล่าวถือเป็นโหลด

แหล่งจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (current source nonlinear load, CSNL) เนื่องจากไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อการปรับเรียบแรงดัน ซึ่งก่อนการชดเชยค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยมีค่ามากกว่า IEEE Std. 519-1992 อยู่มากทั้งสองกรณี ภายหลังจากการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ปรากฏว่า รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงความเป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์อย่างมาก และค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ย หลังการชดเชยอยู่ในขอบเขตมาตรฐานของ IEEE Std. 519-1992 อาจกล่าวได้ว่า ในภาพรวมปริมาณฮาร์มอนิกลดลงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ภายหลังจากการชดเชยระบบจะกลับสู่สภาวะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ถึงแม้ว่าก่อนการชดเชยระบบมีความไม่สมดุลเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากข้อดี ของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ที่พิจารณาค่ากระแสซีแควนซ์ศูนย์ ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จากการอธิบายทั้งหมดข้างต้นจึงสรุปได้ว่า การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่สร้างขึ้น ประกอบกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธี DQF ให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ เพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบไฟฟ้าสามเฟส ทั้งนี้เนื่องจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและได้นำเสนอวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบใหม่ ที่มีโครงสร้างสองส่วนหลัก เป็นชุดระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการใหม่ของงานวิจัยนี้ กับวงจรขยายกำลังที่ทำให้การตอบสนองราบเรียบมากที่สุด ในทางความถี่ งานวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาค้นคว้าผลงานที่เคยปรากฏมาก่อนแล้ว พบว่า การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน กลุ่มแรกเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจผลรวมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ โดยไม่แสดงรายละเอียดอันดับของฮาร์มอนิก การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกประเภทนี้เหมาะกับการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ ส่วนกลุ่มที่สองเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่แสดงรายละเอียดอันดับของฮาร์มอนิก ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกประเภทนี้เหมาะกับการกำจัดฮาร์มอนิกบางอันดับ แต่เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ ดังนั้นจึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจผลรวมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบเพียงอย่างเดียว และจากการศึกษา พบว่า วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่นิยมใช้ในอดีตมีหลายวิธี วิธีการที่มีผู้สนใจประยุกต์ใช้กันกว้างขวางมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีการหมุนแกน (วิธี DQ) และวิธีวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (วิธี SWFA) วิธีการดังกล่าวนี้มีความน่าสนใจตรงที่รูปแบบ และหลักการของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกมีลักษณะที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง นั่นคือ วิธี DQ ใช้หลักการหมุนแกน เพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิกทั้งหมด บนแกน  $d$  และแกน  $q$  ส่วนวิธี SWFA ใช้หลักการคำนวณหาค่ากระแสมูลฐาน ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ ผสมผสานเทคนิควินโดว์เลื่อน และเมื่อได้ค่ากระแสมูลฐานแล้ว จะนำค่ากระแสดังกล่าวไปคำนวณหาปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบอีกต่อหนึ่ง รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสี่วิธีข้างต้นได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2 การพัฒนาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่สำหรับงานวิจัยนี้ ตั้งต้นจากการศึกษา และทำความเข้าใจเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในอดีต ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ถึงข้อดี และข้อเสียของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี วิธีระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ที่พัฒนาขึ้น เป็นการผสมผสานข้อดีของวิธี DQ และวิธี SWFA เข้าไว้ด้วยกัน จึงเรียกวิธีนี้ว่า วิธี DQF (DQ axis with Fourier) ข้อดีของวิธี DQ ที่นำมาใช้ คือ มีการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์ (zero sequence current) หรือ  $i_0$  ซึ่งกระแสดังกล่าวจะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุล เมื่อค่านึงกระแสลำดับศูนย์ จะส่งผลให้วงจร



กรองกำลังแอกทีฟสามารถลดกระแสชดเชยได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ระบบกลับมาอยู่ในสภาพสมดุลหลังกำจัดฮาร์มอนิก ส่วนข้อดีของวิธี SWFA คือ การคำนวณเพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิก ตามหลักการของวิธี SWFA เหมาะกับการใช้งานในเวลาจริง อีกทั้งมีความถูกต้องสูง ส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี DQF ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ได้อย่างถูกต้อง ใช้เวลาคำนวณสั้น และส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิก ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟทำได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ อีกทั้งภายหลังการกำจัดฮาร์มอนิก ที่ใช้วิธี DQF ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ส่งผลให้ระบบที่ไม่สมดุลก่อนกำจัดฮาร์มอนิก กลับสู่สภาวะสมดุลภายหลังกำจัดฮาร์มอนิก ซึ่งถ้าใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธี SWFA จะไม่สามารถทำให้ระบบกลับสู่สภาวะสมดุลหลังกำจัดฮาร์มอนิกได้เหมือนกับวิธี DQF นอกจากนี้วิธี DQF เป็นการผสมผสานข้อดีระหว่างวิธี DQ และวิธี SWFA แล้ว ยังเป็นวิธีที่แก้จุดด้อยของวิธี DQ และวิธี SWFA ด้วยเช่นกัน รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

การเปรียบเทียบประสิทธิผลของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF กับวิธีอื่น ๆ ในอดีตสองวิธี เปรียบเทียบโดยใช้ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก ที่พิจารณาแบบจำลองของวงจรกรองเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ที่กำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียว โดยยังไม่คำนึงถึงข้อจำกัดในทางปฏิบัติของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ดัชนีชี้วัดสมรรถนะของวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี พิจารณาจากค่า %THD และค่า %unbalance หลังการกำจัดฮาร์มอนิกเป็นสำคัญ การจำลองสถานการณ์ได้พิจารณาระบบ 3 รูปแบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแตกต่างกัน ได้แก่ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ และระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเหล่านี้ ไม่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุในการปรับเรียบแรงดัน จึงจัดเป็นโหลดในกลุ่มแหล่งจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (current-source nonlinear load, CSNL) ที่ทำให้เกิดเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกในระบบเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยนี้มีกรอบของการศึกษาวิจัยในด้านการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเป็นการ โดยเฉพาะ จึงยังไม่พิจารณาผลเนื่องจากแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชยในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว มีค่าเท่ากับ 28.65 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายหลังการชดเชยที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ SWFA และ DQF มีค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชย เท่ากับ 1.02 0 และ 0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ พบว่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชย มีค่าเท่ากับ 28.52 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายหลังการชดเชยที่อาศัยวิธี DQ SWFA และ DQF ในการระบุเอกลักษณ์ ฮาร์มอนิก มีค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชย เท่ากับ 0.93 0 และ 0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ระบบดังกล่าวสองระบบที่ใช้ในการ

จำลองสถานการณ์ ดังที่กล่าวข้างต้น เป็นระบบที่อยู่ในสถานะสมดุลก่อนการชดเชย แต่ในระบบสุดท้ายที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อกับโหลดไม่สมดุลในแต่ละเฟส โดยก่อนการชดเชย %THD<sub>เฉลี่ย</sub> และ %unbalance มีค่าเท่ากับ 28.39 และ 6.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และภายหลังการชดเชย ที่ใช้วิธี DQ ในการระบุเอกลักษณ์ พบว่า %THD<sub>เฉลี่ย</sub> และ %unbalance ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 2.84 และ 2.10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังปรากฏความไม่สมดุลอยู่บ้างเล็กน้อย และถ้าใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA %THD<sub>เฉลี่ย</sub> ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 1.76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในกรอบมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 แต่การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถทำให้ระบบอยู่ในสถานะสมดุลได้หลังการชดเชย โดยค่า %unbalance ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 10.03 เปอร์เซ็นต์ วิธีการสุดท้ายของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ คือ วิธี DQF โดย %THD<sub>เฉลี่ย</sub> และ %unbalance ภายหลังการชดเชยที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้ มีค่าเท่ากับ 1.60 และ 0.16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสองวิธีข้างต้น ดังนั้นจากผลดังกล่าว จึงอาจสรุปได้ว่า วิธี DQF เป็นวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ให้ประสิทธิผลสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี DQ และ SWFA โดยวิธี DQF ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถให้ข้อมูลฮาร์มอนิกที่มีความถูกต้องมากที่สุด นำไปสู่การกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบได้ดีที่สุด รวมถึงสามารถรักษาภาวะสมดุลหลังการกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างดี ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวทั้ง 3 ระบบได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 3

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบในทางปฏิบัติ เพื่อเป็นการยืนยันถึงสมรรถนะของวิธี DQF เมื่อใช้เป็นโครงสร้างหลักส่วนหนึ่งของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การทดสอบดำเนินการกับระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายกระแสให้ความต้านทาน และระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายกระแสให้ความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า วงจรปรุงแต่งสัญญาณ การ์ด DSP Texas Instruments-eZdsp™ F2812 ดำเนินงานที่พิกัด 60 โวลต์ อาร์เอ็มเอส 0.3 แอมป์อาร์เอ็มเอส ปริมาณฮาร์มอนิกที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์นั้นอยู่ในรูปของกระแสอ้างอิงสามเฟส กระแสอ้างอิงเหล่านี้ถูกส่งออกมาทางวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่มีความแยกชัด 16 บิต และส่งต่อให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ เพื่อสร้างกระแสชดเชยฮาร์มอนิกให้กับระบบ วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้วงจรขยายสัญญาณ 150 วัตต์ ที่อ้างอิงมาจากวารสาร Popular Electronics ย่านที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานวงจรกรองกำลังแอกทีฟ นี้อยู่ในช่วง 10 เฮิร์ตซ์ถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลทดสอบในทางปฏิบัติ ของการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบใหม่นี้ที่มีวิธี DQF ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ให้ผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจอย่างมาก ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว ค่า %THD<sub>เฉลี่ย</sub> ก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 28.28% และในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ค่า

%THD, เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 27.98% ซึ่งค่าทั้งสองมีค่ามากกว่าที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 แต่ภายหลังจากการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ปรากฏว่า รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงความเป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ทั้งสองกรณี และค่า %THD, เฉลี่ยหลังการชดเชยในกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และ โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 2.64 % และ 2.79% ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 โดยในภาพรวม ปริมาณฮาร์มอนิกลดลงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการเปรียบเทียบสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นวงจรขยายกำลัง กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน การเปรียบเทียบอาจพิจารณาในหลาย ๆ ด้านด้วยกัน เช่น ราคาที่ใช้ในการสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยพิจารณาเปรียบเทียบราคาที่พิกัดกำลังเท่ากัน ประสิทธิภาพการฉีดกระแสชดเชยในการกำจัดฮาร์มอนิก ซึ่งอาจดูจากค่า %THD, เฉลี่ย หลังการชดเชย การเปรียบเทียบสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟนี้ จะนำไปสู่การตัดสินใจในการเลือกใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อได้ข้อสรุปในการเปรียบเทียบข้างต้น ควรมีการพัฒนาวงจรกรองกำลังแอกทีฟต่อไป จนกว่าการฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิก จะมีสมรรถนะใกล้เคียงกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟอุดมคติที่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ทั้งหมดอย่างสมบูรณ์

2. ควรพัฒนาอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี DQF ให้สามารถใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังไฮบริด ที่เป็นการผสมผสานข้อดีระหว่างวงจรกรองกำลังพาสซีฟ และวงจรกรองกำลังแอกทีฟเข้าด้วยกัน อีกทั้งในปัจจุบัน ต้นทุนของวงจรกรองกำลังไฮบริดมีราคาถูกกว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จึงอาจส่งผลให้ในอนาคตมีการใช้วงจรกรองกำลังไฮบริดกันอย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุนี้ จึงควรพัฒนาอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี DQF เพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับได้ แบบแยกอันดับ เพื่อใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังไฮบริดได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ควรหาข้อสรุปเกี่ยวกับการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ ร่วมกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟ ว่าวงจรกรองประเภทใด เหมาะสมกับการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับใด ทั้งนี้อาจดูความเหมาะสมเกี่ยวกับต้นทุนการสร้างวงจรดังกล่าวด้วย

## บรรณานุกรม

- Abdel-Rahim, N., and Shaltout, A. (2002). Operation of single-phase induction motor as two-phase motor. **IEEE 28<sup>th</sup> Annual Conf. on Industrial Electronics Society (IECON02)**. 2: 967-972.
- Arrillaga, J., and Watson, N. R. (2003). **Power System Harmonics**. England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Chang, G. W., and Shee, T.-C. (2002). A Comparative Study of Active Power Filter Reference Compensation Approaches. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**. 2: 1017– 1021.
- Cheng, P.T., Bhattacharya, S. and Divan, D. M. (1996). Hybrid Solutions For Improving Passive Filter Performance in High Power Applications. **IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'96)**. 2: 911-917.
- El-Habrouk, M., and Darwish, M. K. (2001). Design and Implementation of a Modified Fourier Analysis Harmonic Current Computation Technique for Power Active Filter Using DSPs. **IEE Proc.-Electr. Power Appl.** 148 (1): 21-28.
- George, J. W. (2001). **Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design**. New York: Springer.
- Gu, H. J., and Gyu, H. C. (1998). New Active Power Filter with Simple Low Cost Structure without Tuned Filters. **IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC'98)**. 1: 217-222.
- IEEE Std. 141-1993. (1993). **IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution For Industrial Plants**.
- IEEE Std. 519-1992. (1993). **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**.
- Jung, G. H. and Cho, G. H. (1998). New Active Power Filter with Simple Low Cost Structure without Tuned Filters. **IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC'98)**. 1: 217-222.
- Laurene, V. F. (1999). **Applied numerical analysis using MATLAB**. United States of America: Prentice-Hall.

- Naewngerndee, N., Sukcharoen, C., and Kulworawanichpong, T. (2006). Simulation of Single-Phase Induction Motor Drives with Non-sinusoidal Power Supply. **WSEAS Transactions on Systems**. 5(5): 1029-1034.
- Ong, C. M. (1998). **Dynamic Simulation of Electric Machinery**. United States of America: Prentice-Hall.
- Takeda, M., Ikeda, K., Teramoto, A., and Aritsuka, T. (1988). Harmonic Current and Reactive Power Compensation with an Active Filter. **IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC '88)**. 2: 1174-1179.

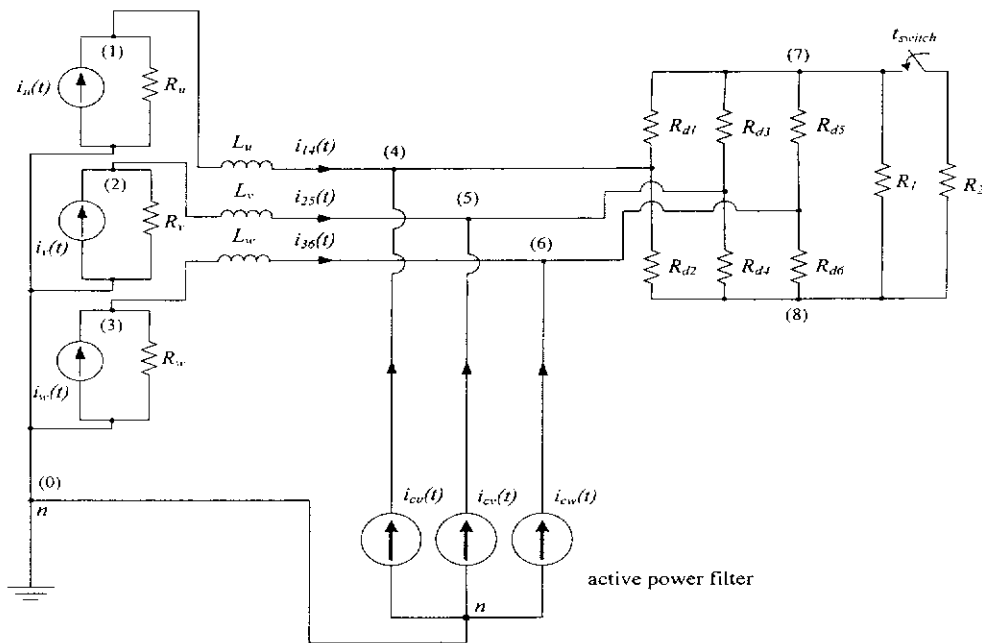
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

ก.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีวงจรรีจกกระแสสามเฟสต่อกับโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว

โครงสร้างของระบบที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้ มีแผนภาพดังที่แสดงไว้ในรูปที่ ก.1 และจากรูปดังกล่าวเมื่อใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในการพิจารณาโนดที่ (1) ถึง โนดที่ (8) จะได้สมการ โนดดังสมการที่ (ก-1) ถึง (ก-8) ตามลำดับต่อไปนี้



รูปที่ ก.1 แผนภาพวงจรไฟฟ้าของระบบที่มีวงจรรีจกกระแสต่อกับโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว

$$\frac{v_1(t)}{R_u} + \frac{1}{L_u} \int_{t_0}^t [v_1(t) - v_4(t)] dt + i_{14}(t_0) = i_u(t) \quad (\text{ก-1})$$

$$\frac{v_2(t)}{R_v} + \frac{1}{L_v} \int_{t_0}^t [v_2(t) - v_5(t)] dt + i_{25}(t_0) = i_v(t) \quad (\text{ก-2})$$

$$\frac{v_3(t)}{R_w} + \frac{1}{L_w} \int_{t_0}^t [v_3(t) - v_6(t)] dt + i_{36}(t_0) = i_w(t) \quad (ก-3)$$

$$\frac{1}{L_u} \int_{t_0}^t [v_4(t) - v_1(t)] dt + i_{41}(t_0) + \frac{v_4(t) - v_7(t)}{R_{d1}} + \frac{v_4(t) - v_8(t)}{R_{d2}} = i_{cu}(t) \quad (ก-4)$$

$$\frac{1}{L_v} \int_{t_0}^t [v_5(t) - v_2(t)] dt + i_{52}(t_0) + \frac{v_5(t) - v_7(t)}{R_{d3}} + \frac{v_5(t) - v_8(t)}{R_{d4}} = i_{cv}(t) \quad (ก-5)$$

$$\frac{1}{L_w} \int_{t_0}^t [v_6(t) - v_3(t)] dt + i_{63}(t_0) + \frac{v_6(t) - v_7(t)}{R_{d5}} + \frac{v_6(t) - v_8(t)}{R_{d6}} = i_{cw}(t) \quad (ก-6)$$

$$-\frac{v_4(t)}{R_{d1}} - \frac{v_5(t)}{R_{d3}} - \frac{v_6(t)}{R_{d5}} + \left[ \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d5}} + \frac{1}{R(t)} \right] v_7(t) - \frac{v_8(t)}{R(t)} = 0 \quad (ก-7)$$

$$-\frac{v_4(t)}{R_{d2}} - \frac{v_5(t)}{R_{d4}} - \frac{v_6(t)}{R_{d6}} - \frac{v_7(t)}{R(t)} + \left[ \frac{1}{R_{d2}} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{d6}} + \frac{1}{R(t)} \right] v_8(t) = 0 \quad (ก-8)$$

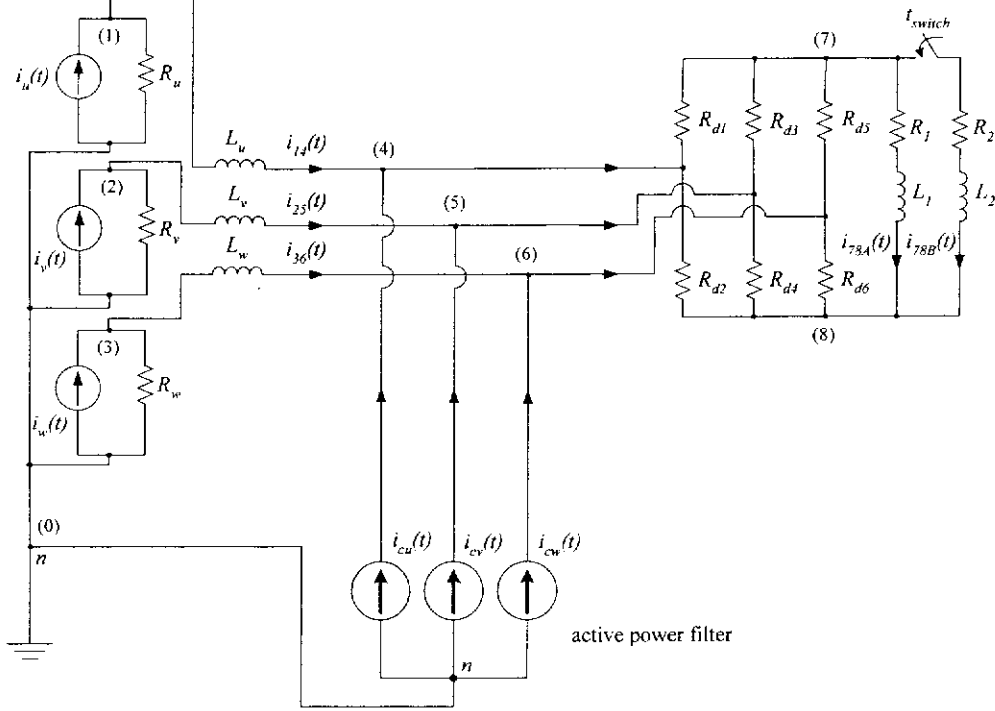
จากสมการที่ (ก-1) ถึง (ก-8) ข้างต้น  $v_i(t)$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่โหนด  $i$  โดยที่  $i$  มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 8 ในขณะที่  $i_{jk}(t)$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากโหนด  $j$  ไปโหนด  $k$  โดยที่  $j$  และ  $k$  มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 8 เช่นเดียวกัน ส่วนค่า  $R(t)$  ในสมการที่ (ก-7) และ (ก-8) เป็นค่าความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับเวลา ตามจังหวะการทำงานของสวิตช์ โดยที่  $R(t) = R_1 \Omega$  ในช่วงเวลา  $0 < t \leq t_{switch}$  วินาที และ  $R(t) = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) \Omega$  ในช่วงเวลา  $t_{switch} < t \leq t_f$  วินาที โดยที่  $t_f$  เป็นค่าตัวเลขที่เป็นค่าไฟไนต์ ใช้กำหนดเวลาที่สิ้นสุดการจำลองสถานการณ์

**ก.2** แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับโหลดความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

โครงสร้างของระบบที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้ มีแผนภาพดังที่แสดงไว้ในรูปที่ ก.2 ซึ่งสังเกตได้ว่าการต่อเชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ของโหนดที่ (1) ถึงโหนดที่ (6) จะเหมือนกับการต่อในวงจรไฟฟ้าของระบบในรูปที่ ก.1 ทุกประการ เพราะฉะนั้นเมื่อใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในการพิจารณาโหนดที่



(1) ถึง โหนดที่ (6) สำหรับระบบในรูปที่ ก.2 จะได้สมการ โหนดดังสมการที่ (ก-1) ถึง (ก-6) ซึ่งเหมือนกับการพิจารณาระบบในรูปที่ ก.1 แต่ข้อแตกต่างระหว่างระบบรูปที่ ก.1 และ ก.2 คือ ระหว่าง โหนดที่ (7) และ โหนดที่ (8) ระบบในรูปที่ ก.1 มีความต้านทานเพียงอย่างเดียว แต่ในรูปที่ ก.2 มีความ



รูปที่ ก.2 แผนภาพวงจรไฟฟ้าของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสต่อกับ โหลดความต้านทาน ที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

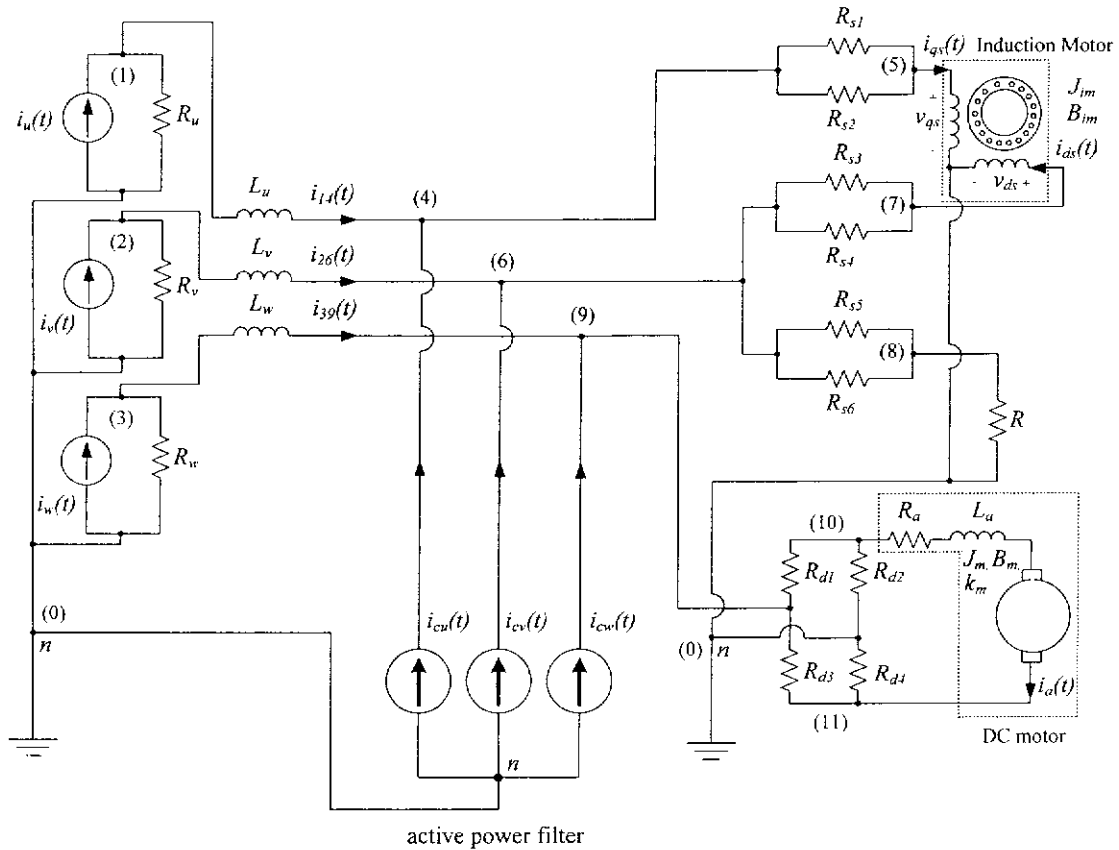
ต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นเมื่อใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในการพิจารณา โหนดที่ (7) และ โหนดที่ (8) ของระบบรูปที่ ก.2 จะได้ดังสมการที่ (ก-9) และ (ก-10) ตามลำดับ

$$\frac{v_7(t) - v_4(t)}{R_{d1}} + \frac{v_7(t) - v_5(t)}{R_{d3}} + \frac{v_7(t) - v_6(t)}{R_{d5}} + i_{78A}(t) + i_{78B}(t) = 0 \quad (\text{ก-9})$$

$$\frac{v_8(t) - v_4(t)}{R_{d2}} + \frac{v_8(t) - v_5(t)}{R_{d4}} + \frac{v_8(t) - v_6(t)}{R_{d6}} - i_{78A}(t) - i_{78B}(t) = 0 \quad (\text{ก-10})$$

ก.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

โครงสร้างของระบบที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้ มีแผนภาพดังที่แสดงไว้ในรูปที่ ก.3 และจากรูปดังกล่าวเมื่อใช้กฎกระแสของเกอ์ชอฟฟ์ในการพิจารณาโนดที่ (1) ถึง โนดที่ (11) สามารถสร้างสมการโนดได้ดังสมการที่ (ก-11) ถึง (ก-21) ตามลำดับต่อไปนี้



รูปที่ ก.3 แผนภาพทางวงจรไฟฟ้าระบบสามเฟสมีโหลดไม่สมดุลในแต่ละเฟส

$$\frac{v_1(t)}{R_u} + \frac{1}{L_u} \int_{t_0}^t [v_1(t) - v_4(t)] dt + i_{14}(t_0) = i_u(t) \tag{ก-11}$$

$$\frac{v_2(t)}{R_v} + \frac{1}{L_v} \int_{t_0}^t [v_2(t) - v_6(t)] dt + i_{26}(t_0) = i_v(t) \tag{ก-12}$$

$$\frac{v_3(t)}{R_w} + \frac{1}{L_w} \int_{t_0}^t [v_3(t) - v_9(t)] dt + i_{39}(t_0) = i_w(t) \tag{ก-13}$$

$$\frac{1}{L_u} \int_{t_0}^t [v_4(t) - v_1(t)] dt + i_{41}(t_0) + \frac{v_4(t) - v_5(t)}{R_{s1}} + \frac{v_4(t) - v_5(t)}{R_{s2}} = i_{cu}(t) \quad (\text{n-14})$$

$$\frac{v_5(t) - v_4(t)}{R_{s1}} + \frac{v_5(t) - v_4(t)}{R_{s2}} + i_{qs}(t) = 0 \quad (\text{n-15})$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{L_v} \int_{t_0}^t [v_6(t) - v_2(t)] dt + i_{62}(t_0) + \frac{v_6(t) - v_7(t)}{R_{s3}} \\ + \frac{v_6(t) - v_7(t)}{R_{s4}} + \frac{v_6(t) - v_8(t)}{R_{s5}} + \frac{v_6(t) - v_8(t)}{R_{s6}} = i_{cv}(t) \end{aligned} \quad (\text{n-16})$$

$$\frac{v_7(t) - v_6(t)}{R_{s3}} + \frac{v_7(t) - v_6(t)}{R_{s4}} + i_{ds}(t) = 0 \quad (\text{n-17})$$

$$\frac{v_8(t) - v_6(t)}{R_{s5}} + \frac{v_8(t) - v_6(t)}{R_{s6}} + \frac{v_8(t)}{R} = 0 \quad (\text{n-18})$$

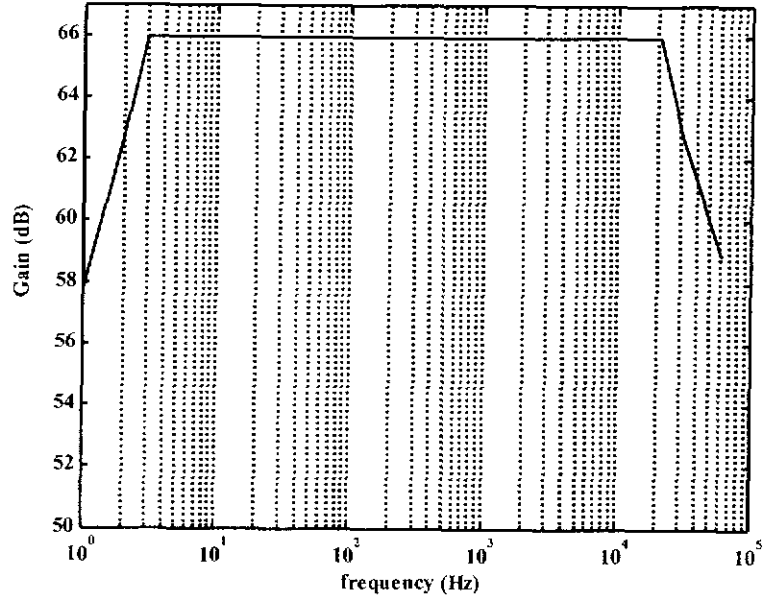
$$\frac{1}{L_w} \int_{t_0}^t [v_9(t) - v_3(t)] dt + i_{93}(t_0) + \frac{v_9(t) - v_{10}(t)}{R_{d1}} + \frac{v_9(t) - v_{11}(t)}{R_{d3}} = i_{cw}(t) \quad (\text{n-19})$$

$$\frac{v_{10}(t) - v_9(t)}{R_{d1}} + \frac{v_{10}(t)}{R_{d2}} + i_a(t) = 0 \quad (\text{n-20})$$

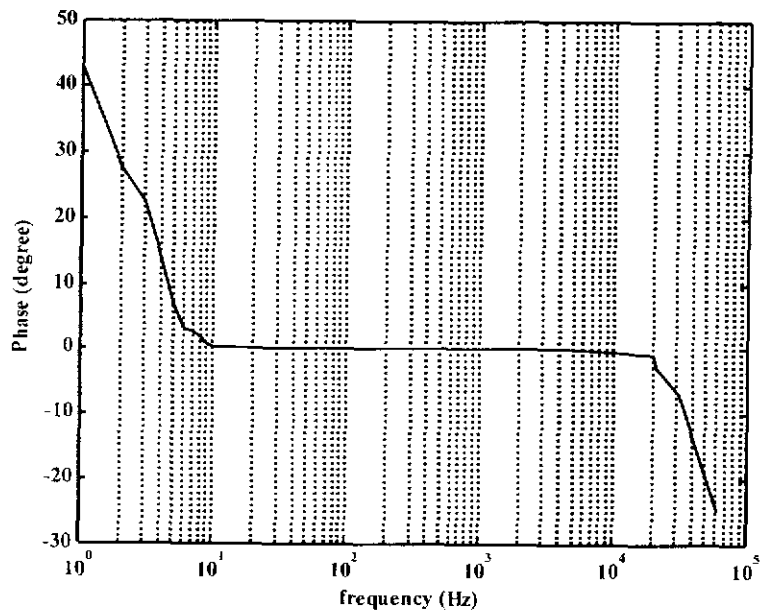
$$\frac{v_{11}(t) - v_9(t)}{R_{d3}} + \frac{v_{11}(t)}{R_{d4}} - i_a(t) = 0 \quad (\text{n-21})$$

ภาคผนวก ข.

การตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายกำลัง



ก) อัตราขยาย (เดซิเบล)



ข) เฟส (องศา)

รูปที่ ข.1 กราฟการตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายกำลัง

## ภาคผนวก ก.

### บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และผลงานการจดสิทธิบัตร

#### รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ

1. K-L. Areerak, T. Kulworawanichpong, and S. Sujitjorn, "Analytical Approach for Three-Phase, Four-Wire Active Power Filter Modeling", Proc. The 2005 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI) International Conference, Pattaya, Thailand, May 12-13, vol. 1, 2005, pp. 48-51.
2. T. Kulworawanichpong, K-L. Areerak, K-N. Areerak, and S. Sujitjorn, "Harmonic Identification for Active Power Filters Via Adaptive Tabu Search Method", LNCS (Lecture Notes in Computer Science) , Springer-Verlag Heidelberg, 2004 (online).
3. T. Kulworawanichpong, K-L. Areerak, and S. Sujitjorn, "Active Power Filter Design by a Simple Heuristic Search", LNCS (Lecture Notes in Computer Science) , Springer-Verlag Heidelberg, 2004 (online).

#### รายการจดสิทธิบัตร

1. สรวุฒิ สุจิตจร และ กองพล อารีรัมย์, "วิธีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และ ความถี่ในการสวิตซ์ของ ไอจีบีที สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ควบคุมกระแสด้วยวิธีฮิสเตอร์ซิส", 25 มีนาคม 2548, เลขที่คำขอ 099011.

## ประวัติผู้วิจัย

นาวาอากาศโท ดร. สราวุฒิ สุจิตจร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท (เกียรตินิยมอันดับ 1) จากโรงเรียนนายเรืออากาศ เมื่อ พ.ศ. 2527 และ PhD (Electronic and Electrical Engineering) จาก University of Birmingham, UK เมื่อ พ.ศ. 2530 ปัจจุบัน เป็นศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชำนาญด้าน control systems, applied signal processing, AI มีความชำนาญพิเศษด้านเครื่องสายไทย การเลี้ยงและฝึกสุนัข มีผลงานหนังสือและตำรา 3 รายการ บทความวิจัยกว่า 100 รายการ และได้จดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ไว้ 12 รายการ