

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกสำหรับวงจรองค์กำลังแอกทีฟ

นายกองพล อารีรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2549

**HARMONIC IDENTIFICATION FOR  
ACTIVE POWER FILTERS**

**Kongpol Areerak**

**A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree  
of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2006**

## การระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้สำหรับการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

(ศ. น.ท. ดร.สรวิชัย สุจิตจร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.โยธิน เปรมปราชญ์)

กรรมการ

(รศ. น.อ. ดร.สมโภชน์ ผิวเหลือง)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ชนัดชัช กุลวรรณพงษ์)

กรรมการ

(รศ. ดร.เสาวณีย์ รัตนพานี)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กองพล อารีรักษ์ : การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ  
(HARMONIC IDENTIFICATION FOR ACTIVE POWER FILTERS) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
ศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตจร, 162 หน้า

การกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า นับเป็นสิ่งสำคัญประเด็นหนึ่งสำหรับภาคอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากฮาร์มอนิกก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ ซึ่งส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหาย และทำงานผิดพลาด งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ ที่เรียกว่า วิธี DQF ทั้งนี้เนื่องจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การทดสอบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF พึ่งพาการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยมีการศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีการระบุเอกลักษณ์อื่น ๆ วิธีนี้ได้แก่ วิธี PQ DQ SD และ SWFA ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ วิธี DQF สามารถให้ข้อมูลฮาร์มอนิกที่มีความถูกต้องมากที่สุดนำไปสู่การกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบได้ดีที่สุด รวมถึงสามารถรักษาสภาวะสมดุลหลังการกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างดี นอกจากนี้ ได้ดำเนินการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในทางปฏิบัติของการใช้วิธี DQF ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ควบคู่กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นวงจรขยายสัญญาณ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นของระบบที่ใช้ทดสอบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสจ่ายกระแสให้ความต้านทานเพียงอย่างเดียว และวงจรเรียงกระแสสามเฟสจ่ายกระแสให้ความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งผลการทดสอบของทั้งสองกรณีเป็นที่น่าพึงพอใจอย่างมาก โดยรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงความเป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ และค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยภายหลังการชดเชยอยู่ในขอบเขตมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 ซึ่งในภาพรวมปริมาณฮาร์มอนิกลดลงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ภายหลังการชดเชย ระบบจะกลับสู่สภาวะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ถึงแม้ว่าก่อนการชดเชยระบบมีความไม่สมดุลบ้างเล็กน้อย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

KONGPOL AREERAK : HARMONIC IDENTIFICATION FOR ACTIVE  
POWER FILTERS. THESIS ADVISOR : PROF. SARAWUT SUJITJORN,  
Ph.D. 162 PP.

## HARMONIC IDENTIFICATION/HARMONIC ELIMINATION/ACTIVE POWER FILTER

Harmonics in power systems and their elimination are important issues of industry. Harmonics can be harmful to electrical devices, and cause malfunction to the devices. This research aims to provide a novel method for harmonic identification, which is named DQF. The harmonic identification is a very important step for harmonic elimination using an active power filter. This thesis presents the simulation results for the comparison purposes of the effectiveness of the harmonic identification methods namely DQF, PQ, DQ, SD, and SWFA, respectively. The simulation results indicate that the DQF method provides the most accurate identification, and leads to the best performance of harmonic elimination. Furthermore, the method leads to a balanced condition of the system after being compensated. The thesis also presents the experimental results of the DQF method working incorporatively with an active power filter of the type amplifier. The system under test carries a three-phase rectifier feeding a resistor, and a series resistor-inductor, respectively. The experimental results are highly satisfactory in that the current waveforms at the main source are nearly sinusoidal, and the average %THD<sub>i</sub> after compensation is confined within the IEEE Std. 519-1992. To sum up, the harmonic reduction is about 90%, and the compensated

system is under a balanced condition despite its slightly unbalanced condition before compensation.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2006

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Co-advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งกำลังใจ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นแบบอย่างที่ดี ในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลรวรานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจผู้วิจัยมาโดยตลอด

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณวิศวกรและเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือ

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงครอบครัวอารีรักษ์ทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัย ประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

กองพล อารีรักษ์

# สารบัญ

หน้า

|                                                                          |          |
|--------------------------------------------------------------------------|----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....                                                  | ก        |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....                                               | ข        |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                     | ง        |
| สารบัญ .....                                                             | จ        |
| สารบัญตาราง.....                                                         | ฉ        |
| สารบัญรูป.....                                                           | ฉ        |
| <b>บทที่</b>                                                             |          |
| <b>1 บทนำ.....</b>                                                       | <b>1</b> |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                                  | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย .....                                           | 2        |
| 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....                                                | 2        |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....                                              | 3        |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                       | 3        |
| 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ .....                                       | 3        |
| <b>2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>                   | <b>5</b> |
| 2.1 บทนำ.....                                                            | 5        |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก.....            | 5        |
| 2.3 สรุป.....                                                            | 8        |
| <b>3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับฮาร์มอนิก .....</b>                      | <b>9</b> |
| 3.1 บทนำ.....                                                            | 9        |
| 3.2 ความหมายของฮาร์มอนิก .....                                           | 9        |
| 3.3 นิยามของฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ.....                                      | 10       |
| 3.4 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (current distortion factor)..... | 11       |



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|          |                                                                                                                |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5      | แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....                                                                                      | 11        |
| 3.6      | ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก.....                                                                           | 13        |
| 3.7      | การกำจัดฮาร์มอนิก.....                                                                                         | 15        |
| 3.8      | ข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก.....                                                                            | 17        |
| 3.9      | สรุป.....                                                                                                      | 18        |
| <b>4</b> | <b>ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก.....</b>                                                     | <b>19</b> |
| 4.1      | บทนำ.....                                                                                                      | 19        |
| 4.2      | การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (วิธี PQ).....                                     | 19        |
| 4.3      | การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกน (วิธี DQ).....                                                     | 23        |
| 4.4      | การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีตรวจจับซิงโครนัส (วิธี SD).....                                               | 24        |
| 4.5      | การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (วิธี SWFA).....                            | 28        |
| 4.6      | สรุป.....                                                                                                      | 30        |
| <b>5</b> | <b>การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกนประกอบกับวิธีฟูริเยร์.....</b>                                   | <b>32</b> |
| 5.1      | บทนำ.....                                                                                                      | 32        |
| 5.2      | การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกนประกอบกับวิธีฟูริเยร์.....                                          | 32        |
| 5.3      | การลดเวลาการคำนวณ.....                                                                                         | 36        |
| 5.4      | สรุป.....                                                                                                      | 39        |
| <b>6</b> | <b>แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสำหรับจำลองสถานการณ์.....</b>                                                   | <b>40</b> |
| 6.1      | บทนำ.....                                                                                                      | 40        |
| 6.2      | แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับโหลด<br>ความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....             | 40        |
| 6.3      | แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับโหลด<br>ความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ..... | 46        |
| 6.4      | แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสสามเฟส<br>จ่ายกระแสให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....                 | 51        |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|          |                                                                                                                       |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.5      | แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุล<br>ในแต่ละเฟส.....                                       | 57         |
| 6.6      | สรุป.....                                                                                                             | 65         |
| <b>7</b> | <b>ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก .....</b>                                                                     | <b>66</b>  |
| 7.1      | บทนำ.....                                                                                                             | 66         |
| 7.2      | โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก.....                                                         | 66         |
| 7.3      | ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อโหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส<br>ที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....           | 67         |
| 7.4      | ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อโหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส<br>ที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ..... | 74         |
| 7.5      | ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อโหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส<br>ที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....                | 79         |
| 7.6      | ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุล<br>ในแต่ละเฟส.....                                       | 86         |
| 7.7      | ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับระบบที่ใช้ทดสอบในทางปฏิบัติ .....                                                            | 96         |
| 7.8      | สรุป.....                                                                                                             | 106        |
| <b>8</b> | <b>ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ.....</b>                                                                              | <b>107</b> |
| 8.1      | บทนำ.....                                                                                                             | 107        |
| 8.2      | อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....                                                                           | 107        |
| 8.2.1    | อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า.....                                                                                        | 107        |
| 8.2.2    | อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า.....                                                                                         | 109        |
| 8.3      | วงจรปรุงแต่งสัญญาณ .....                                                                                              | 110        |
| 8.3.1    | การออกแบบวงจรปรุงแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า.....                                                           | 111        |
| 8.3.2    | การออกแบบวงจรปรุงแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดกระแสไฟฟ้า.....                                                            | 114        |
| 8.4      | การ์ด DSP .....                                                                                                       | 115        |
| 8.5      | วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก .....                                                                               | 118        |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                                                          | หน้า       |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.6 ซอฟต์แวร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก .....                                       | 121        |
| 8.7 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ .....                                                            | 123        |
| <b>9 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก .....</b>                                               | <b>126</b> |
| 9.1 บทนำ .....                                                                           | 126        |
| 9.2 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็น<br>ความต้านทานเพียงอย่างเดียว .....          | 126        |
| 9.3 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็น<br>ความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ..... | 131        |
| 9.4 สรุป .....                                                                           | 135        |
| <b>10 สรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>                                                        | <b>137</b> |
| 10.1 สรุป .....                                                                          | 137        |
| 10.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต .....                                           | 141        |
| รายการอ้างอิง .....                                                                      | 144        |
| ภาคผนวก                                                                                  |            |
| ภาคผนวก ก. การคำนวณหาค่ากระแส $i_{78A}(kT)$ และ $i_{78B}(kT)$ .....                      | 148        |
| ภาคผนวก ข. การคำนวณหาค่ากระแส $i_a(kT)$ และ $\omega_m(kT)$ .....                         | 151        |
| ภาคผนวก ค. การคำนวณหาค่ากระแส $i_{qs}(kT)$ และ $i_{ds}(kT)$ .....                        | 155        |
| ภาคผนวก ง. วงจรขยายสัญญาณที่ใช้เป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟ .....                             | 158        |
| ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และผลงานการจดสิทธิบัตร .....                  | 160        |
| ประวัติผู้เขียน .....                                                                    | 162        |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                                                                    | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจผลรวมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ.....                             | 6    |
| 3.1 ข้อกำหนดของกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 .....                                                                            | 17   |
| 3.2 ข้อกำหนดของกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2.....                                                                                  | 18   |
| 7.1 ผลการจำลองสถานการณ์ในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว .....                           | 74   |
| 7.2 ผลการจำลองสถานการณ์ในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....                   | 79   |
| 7.3 ผลการจำลองสถานการณ์ในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....                                  | 85   |
| 7.4 ผลการจำลองสถานการณ์ในสภาวะที่ระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส .....                                                       | 91   |
| 7.5 เกณฑ์ในการชี้วัดสมรรถนะการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก .....                                                                                  | 95   |
| 7.6 สมรรถนะของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธี .....                                                                                    | 95   |
| 7.7 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ในสภาวะที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว .....       | 97   |
| 7.8 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ในสภาวะที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ..... | 97   |
| 7.9 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนในสภาวะที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว .....                           | 100  |
| 7.10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนในสภาวะที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....                  | 100  |
| 7.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ควบคู่กับสัญญาณรบกวนกรณีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....          | 103  |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่                                                                                                                                 | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 7.12 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ควบคู่กับสัญญาณรบกวนกรณีไหลคเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ..... | 103  |
| 8.1 รายละเอียดของพอร์ต P5 และ P9 ของ eZdsp™ F2812 .....                                                                                  | 116  |
| 8.2 รายละเอียดพอร์ตไอโอ P4 และ P8 ของ eZdsp™ F2812 .....                                                                                 | 117  |
| 8.3 รายละเอียดพอร์ตไอโอ P7 ของ eZdsp™ F2812 .....                                                                                        | 118  |
| 8.4 การเชื่อมต่อระหว่าง DAC712 กับพอร์ตไอโอของการ์ด DSP ที่ใช้ DAC712 สามตัว .....                                                       | 120  |
| 8.5 ขั้นตอนควบคุมการทำงานของไอซี DAC712 ตัวที่ 1.....                                                                                    | 120  |
| 8.6 ขั้นตอนควบคุมการทำงานของไอซี DAC712 ตัวที่ 2.....                                                                                    | 120  |
| 8.7 ขั้นตอนควบคุมการทำงานของไอซี DAC712 ตัวที่ 3.....                                                                                    | 121  |
| 9.1 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกในสถานะที่ไหลคของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีไหลคเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....                 | 130  |
| 9.2 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกในสถานะที่ไหลคของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีไหลคเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ .....               | 134  |

## สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า                                                                                                  |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.1    | แผนภาพแสดงการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ..... 2                                              |
| 3.1    | การเกิดฮาร์มอนิกจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น..... 12                                                     |
| 3.2    | วงจรรอกกำลังพาสซีฟ ..... 15                                                                           |
| 3.3    | วงจรรอกกำลังแอกทีฟ ..... 16                                                                           |
| 3.4    | วงจรรอกกำลังไฮบริด ..... 16                                                                           |
| 4.1    | แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ..... 22                                              |
| 4.2    | เวกเตอร์กระแสบนแกนหมุน d-q..... 23                                                                    |
| 4.3    | แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ ..... 25                                              |
| 4.4    | แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD ..... 27                                              |
| 4.5    | แผนภาพอธิบายการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_1$ และ $B_1$ ..... 29                                          |
| 4.6    | แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA..... 30                                             |
| 5.1    | แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ..... 33                                             |
| 5.2    | แผนภาพอธิบายการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_{0d}$ และ $A_{0q}$ ..... 34                                    |
| 5.3    | แผนภาพแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงด้วยวิธี DQF ..... 36                                    |
| 5.4    | แผนภูมิแสดงขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ..... 38                                      |
| 6.1    | โครงสร้างของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสต่อกับโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว..... 41                       |
| 6.2    | แผนภาพวงจรไฟฟ้าของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสต่อกับโหลดความต้านทาน<br>เพียงอย่างเดียว ..... 41            |
| 6.3    | แผนภาพวงจรไฟฟ้าของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสต่อกับโหลดความต้านทาน<br>ที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ..... 47 |
| 6.4    | แผนภาพวงจรไฟฟ้าแทนระบบที่มีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อเป็นโหลดของ<br>วงจรเรียงกระแสสามเฟส ..... 52        |
| 6.5    | โครงสร้างของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส ..... 58                                   |
| 6.6    | แผนภาพทางวงจรไฟฟ้าระบบสามเฟสมีโหลดไม่สมดุลในแต่ละเฟส ..... 59                                         |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                         | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 7.1 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิก.....                                                                            | 67   |
| 7.2 โครงสร้างของระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส<br>ที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว .....                          | 68   |
| 7.3 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกเมื่อระบบมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส<br>ที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว .....                                | 73   |
| 7.4 โครงสร้างของระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส<br>ที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....                  | 75   |
| 7.5 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกเมื่อระบบมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส<br>ที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....                        | 78   |
| 7.6 โครงสร้างของระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส<br>ที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....                                 | 80   |
| 7.7 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกเมื่อระบบมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส<br>ที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....                                       | 85   |
| 7.8 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส.....                                                                            | 87   |
| 7.9 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกเมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุล<br>ในแต่ละเฟส .....                                                           | 91   |
| 7.10 กระแสนิวทรัลก่อนและหลังการชดเชยเมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับ โหลด<br>แบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส.....                                              | 93   |
| 7.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์<br>ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....       | 98   |
| 7.12 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์<br>ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ..... | 99   |
| 7.13 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาผลจากสัญญาณรบกวน ในกรณีที่โหลดของ<br>วงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว .....                    | 101  |
| 7.14 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาผลจากสัญญาณรบกวน ในกรณีที่โหลดของ<br>วงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....               | 102  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                        | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 7.15 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ควบคู่กับสัญญาณรบกวนในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว .....      | 104  |
| 7.16 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ควบคู่กับสัญญาณรบกวนในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ..... | 105  |
| 8.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ .....                                                                    | 108  |
| 8.2 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า .....                                                                            | 108  |
| 8.3 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า .....                                                                             | 110  |
| 8.4 วงจรปรุงแต่งสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ .....                                                                                       | 111  |
| 8.5 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรปรุงแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า .....                                                                   | 113  |
| 8.6 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรปรุงแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดกระแสไฟฟ้า .....                                                                    | 115  |
| 8.7 การจัดเรียงพินสำหรับวงจรแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของ eZdsp™ F2812 .....                                                                         | 116  |
| 8.8 การจัดเรียงพินสำหรับพอร์ตไอโอของ eZdsp™ F2812 .....                                                                                       | 116  |
| 8.9 การเชื่อมต่อพอร์ตไอโอของการ์ด DSP กับไอซี DAC712 .....                                                                                    | 119  |
| 8.10 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกวิธี DQF บนการ์ด DSP .....                                                     | 122  |
| 8.11 แผนภาพแสดงโครงสร้างของระบบทดสอบ.....                                                                                                     | 123  |
| 8.12 กราฟการตอบสนองทางความถี่ของวงจรรขยายสัญญาณ .....                                                                                         | 124  |
| 9.1 ระบบที่ใช้ทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....                                                                               | 127  |
| 9.2 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว .....                                                                   | 128  |
| 9.3 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเฟส u ก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว.....                                | 129  |
| 9.4 รูปคลื่นกระแสในสายนิวทรัลก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดเป็นความต้านทาน .....                                                                 | 131  |
| 9.5 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ .....                                                             | 132  |
| 9.6 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเฟส u ก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ .....                      | 133  |



## สารบัญรูป (ต่อ)

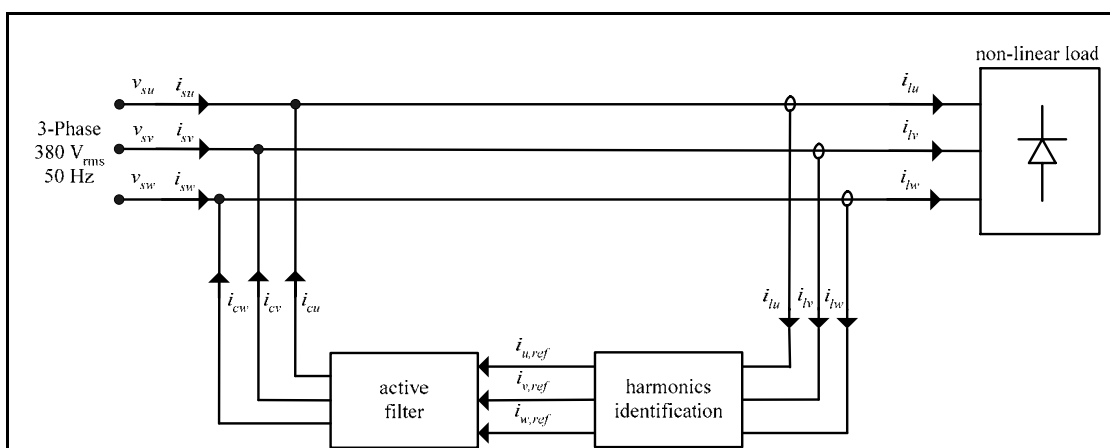
| รูปที่                                                                                                  | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 9.7 รูปสัญญาณกระแสในสายนิวทรัลก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดเป็น<br>ความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ..... | 135  |
| ง.1 แผนภาพวงจรขยายสัญญาณที่ใช้เป็นวงจรรอกำลังแอกทีฟ .....                                               | 159  |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ได้นำเทคโนโลยีคอนเวอร์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย ดังเช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ การหลอมโลหะ อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น คอนเวอร์เตอร์มีบทบาทสำคัญในการแปลงพลังงาน คอนเวอร์เตอร์ทำงานโดยใช้อุปกรณ์สวิตซิงกำลัง ซึ่งก่อให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า ฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือได้ว่าเป็น “มลพิษ” ในระบบไฟฟ้า และทำให้เกิดผลเสียหลายประการ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยส่วนหนึ่งทางด้านไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน จึงมุ่งเน้นการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก ดังเช่น การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ ซึ่งได้แก่ วงจรจูนและวงจรดีจูน การใช้วงจรกรองกำลังไฮบริด (Lin, Yang, and Tsai, 2002) และ การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ ที่ต้องอาศัยอุปกรณ์สวิตซิง ฉีดกระแสเพื่อหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ (Gu, and Gyu, 1998) วงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยส่วนใหญ่มีโครงสร้างเชิงระบบดังรูปที่ 1.1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟนี้ให้ผลดีในการกรอง มีความอ่อนตัวที่สามารถปรับแต่งให้ทำงานกับระบบใดๆ ได้ง่าย ตลอดจนประสบปัญหาน้อยจากสถานะเรโซแนนซ์ในระบบ ดังที่อาจสังเกตจากรูปที่ 1.1 ว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีส่วนประกอบหนึ่งสำหรับทำหน้าที่ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก (harmonic identifier) ซึ่งชุดระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกนี้จะต้องบ่งบอกได้ว่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบมีปริมาณเท่าใด เพราะฉะนั้นวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าอย่างได้ผล และจากการศึกษาค้นคว้าในเรื่องการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก พบว่า วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก แบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มด้วยกัน กลุ่มแรกเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจผลรวมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ โดยไม่แสดงรายละเอียดอันดับของฮาร์มอนิก กลุ่มที่สองเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่แสดงรายละเอียดอันดับของฮาร์มอนิก งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาวิธีการใหม่เพื่อระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยอาศัยพื้นฐานของงานวิจัยในอดีต นอกจากนี้ การสร้างชุดระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้การ์ด DSP ของบริษัท Texas Instruments รุ่น eZdsp™ F2812 สำหรับการประมวลผล การตรวจสอบผลการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกของวิธีการที่พัฒนาขึ้น จะดำเนินการศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีการต่าง ๆ ที่ปรากฏในงานวิจัยอื่นมาก่อนแล้ว



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 พัฒนาวิธีการใหม่สำหรับระบบเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก เพื่อใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

1.2.2 เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีต้นแบบสำหรับระบบเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

## 1.3 ข้อยกข้อยกเบื้องต้น

1.3.1 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยคอมพิวเตอร์ ใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองสถานการณ์

1.3.2 การทดสอบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ในการกำจัดฮาร์มอนิก ที่ใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ตามวิธีการที่พัฒนาขึ้นใหม่ จะทดสอบกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น ที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และโหลดที่มีความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยระบบที่ใช้ทดสอบเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย

1.3.3 พัฒนาเทคโนโลยีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก โดยอาศัยการ์ด DSP รุ่น eZdsp™ F2812

1.3.4 โหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นโหลดในกลุ่มแหล่งจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ที่ทำให้เกิดเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกเท่านั้น

1.3.5 ความไม่สมดุลของขนาดกระแสโหลด ที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก ด้วยคอมพิวเตอร์ อยู่ในย่าน 5 เปอร์เซ็นต์

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 การวิเคราะห์ และแก้ปัญหาฮาร์มอนิก มุ่งเน้นที่การปรับแก้กระแสฮาร์มอนิก

1.4.2 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก เพื่อใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ต้องกำจัดฮาร์มอนิกได้ตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพ สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามเฟส

1.5.2 ได้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพ

1.5.3 ได้ต้นแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกได้ตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 10 บท บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความจำเป็น และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงาน ส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

บทที่ 3 อธิบายความหมายของฮาร์มอนิก นิยามของฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก และผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก รวมถึงวิธีการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธีการต่าง ๆ นอกจากนี้มีการนำเสนอข้อกำหนด และมาตรฐานของฮาร์มอนิก ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 4 อธิบายวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสี่วิธี ได้แก่ วิธี PQ วิธี DQ วิธี SD และวิธี SWFA ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ปรากฏมาก่อนแล้ว

บทที่ 5 นำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ ที่เรียกว่า วิธี DQF ซึ่งการอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้ได้นำเสนอเป็นขั้นตอนอย่างละเอียด

บทที่ 6 นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก ที่มีอยู่ด้วยกัน 4 ระบบ โดยระบบแรกไหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสาม

เฟสที่มีโหนดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว ระบบที่สอง โหนดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหนดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ระบบที่สามโหนดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และในระบบสุดท้าย เป็นระบบไฟฟ้าที่ต่อโหนดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

บทที่ 7 กล่าวถึงผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก ที่ใช้วิธี DQF สำหรับการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิก โดยระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกมี 4 ระบบ ที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามที่อธิบายไว้ในบทที่ 6 นอกจากนี้การนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์มีการแทรกการวิเคราะห์ และอภิปรายผลไปพร้อมกัน

บทที่ 8 กล่าวถึงโครงสร้างฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก โครงสร้างฮาร์ดแวร์ดังกล่าวประกอบไปด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า วงจรปรั้งแต่งสัญญาณ การ์ด DSP รุ่น eZdsp™ F2812 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก และวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

บทที่ 9 นำเสนอผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก โดยทดสอบกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่สร้างขึ้น และใช้วิธีการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 ระบบที่ใช้ทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกมี 2 ระบบ ด้วยกัน ระบบแรกเป็นระบบไฟฟ้าที่มีโหนดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหนดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ระบบที่สองโหนดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นโหนดความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

บทที่ 10 เป็นบทสรุป และข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีด้วยกัน 5 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดที่มาของสมการการคำนวณค่ากระแส  $i_{78A}(kT)$  และ  $i_{78B}(kT)$  ที่ใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 6 ภาคผนวก ข. แสดงรายละเอียดที่มาของสมการการคำนวณค่ากระแส  $i_a(kT)$  และ  $\omega_m(kT)$  ที่ใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ ภาคผนวก ค. เป็นการนำเสนอวิธีการคำนวณ ค่ากระแส  $i_{qs}(kT)$  และ  $i_{ds}(kT)$  ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ ภาคผนวก ง. แสดงแผนภาพวงจรขยายสัญญาณที่ใช้เป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยอ้างอิงจากวารสาร Popular Electronics ภาคผนวกสุดท้าย คือ ภาคผนวก จ. เป็นการนำเสนอรายการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย และผลงานที่จดสิทธิบัตร ในระหว่างการทำวิจัยวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ การพัฒนาอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์สารมอริกที่มีประสิทธิภาพกว่าวิธีการเดิม สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกำลังแอกทีฟ และเนื่องจากงานวิจัยในเรื่องดังกล่าวมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน บทที่ 2 นี้จึงนำเสนอการสำรวจวรรณกรรมงานวิจัยที่มีปรากฏมาก่อนแล้ว เกี่ยวกับเรื่องการระบุเอกลักษณ์สารมอริก โดยผู้วิจัยจะเรียงลำดับปีงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปีงานวิจัยล่าสุดอย่างเป็นขั้นตอน รวมถึงอธิบายสาระสำคัญที่ได้จากการวิจัยในแต่ละบทความวิจัยตามที่คุณวิจัยได้รวบรวมไว้

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการระบุเอกลักษณ์สารมอริก

การระบุเอกลักษณ์สารมอริกตามที่คุณวิจัยได้ค้นคว้าจากงานวิจัยในอดีต พบว่า การระบุเอกลักษณ์สารมอริกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน กลุ่มแรกเป็นการระบุเอกลักษณ์สารมอริกที่สนใจผลรวมของสารมอริกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ โดยไม่แสดงรายละเอียดอันดับของสารมอริก ซึ่งการระบุเอกลักษณ์สารมอริกประเภทนี้เหมาะกับการกำจัดสารมอริกทั้งหมดในระบบ ส่วนในกลุ่มที่สองเป็นการระบุเอกลักษณ์สารมอริกที่แสดงรายละเอียดอันดับของสารมอริก ซึ่งการระบุเอกลักษณ์สารมอริกประเภทนี้เหมาะกับการกำจัดสารมอริกบางอันดับ และเนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ต้องการพัฒนาวิธีการระบุเอกลักษณ์สารมอริกวิธีการใหม่ สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกำลังแอกทีฟ ที่กำจัดสารมอริกทั้งหมดในระบบ การแสดงปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อนี้ จึงมุ่งเน้นที่การระบุเอกลักษณ์สารมอริกที่สนใจผลรวมของสารมอริกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ โดยไม่แสดงรายละเอียดอันดับของสารมอริก ซึ่งรายละเอียดได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจผลรวมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ

| ปีที่ตีพิมพ์<br>(ค.ศ.) | คณะผู้วิจัย                                   | สาระสำคัญของงานวิจัย                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1988                   | Takeda,<br>Ikeda,<br>Teramoto<br>and Aritsuka | ใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกน (วิธี DQ) ซึ่งเลือกการทำงานของวงจรรองกำลังแอกทีฟได้สาม โหมด คือ กำจัดกระแสฮาร์มอนิก ซดเซยกำลังรีแอกทีฟ และกำจัดกระแสลำดับเฟสลบ (negative-phase current) นอกจากนี้การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี DQ สามารถเลือกระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกบางอันดับก็ได้                    |
| 1990                   | Furuhashi,<br>Okuma, and<br>Uchikawa          | ใช้ทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power) ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก งานวิจัยนี้ได้กำหนดความหมายของกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งไว้ด้วย                                                                                                                                                                      |
| 1992                   | Lin, Chen<br>and Huang                        | ใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD (synchronous detection) สำหรับคำนวณหาค่ากระแสซดเซย ซึ่งรูปแบบของวิธี SD ที่นำเสนอมีสามรูปแบบด้วยกัน ได้แก่ รูปแบบกำลังไฟฟ้าเท่ากัน (equal power) รูปแบบกระแสเท่ากัน (equal current) และรูปแบบความต้านทานเท่ากัน (equal resistance) โดยพิจารณาระบบสามเฟสที่ไม่สมดุลด้วย |
| 1994                   | Chen, Lin<br>and Huang                        | ใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง (instantaneous power theory) สำหรับคำนวณหาค่ากระแสซดเซย โดยพิจารณาระบบสามเฟสที่ไม่สมดุลด้วย                                                                                                                                                             |
| 1994                   | Chen, Lin<br>and Huang                        | ใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD สำหรับคำนวณหาค่ากระแสซดเซย โดยพิจารณาระบบสามเฟสที่ไม่สมดุล                                                                                                                                                                                                             |
| 1994                   | Chen, Lin<br>and Huang                        | ใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD ในรูปแบบกระแสเท่ากัน สำหรับคำนวณหาค่ากระแสซดเซย โดยพิจารณา ระบบสามเฟสที่ไม่สมดุลด้วย                                                                                                                                                                                   |
| 1998                   | Peng, Ott, Jr.<br>and Adams                   | ใช้วิธีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งในรูปทั่วไป (generalized instantaneous reactive power) สำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ซึ่งวิธีนี้ไม่ต้องอาศัยการแปลงเมตริกซ์                                                                                                                                                                   |

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจผลรวมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ (ต่อ)

| ปีที่ตีพิมพ์<br>(ค.ศ.) | คณะผู้วิจัย                   | สาระสำคัญของงานวิจัย                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2000                   | Soares, Verdelho, and Marques | เปรียบเทียบวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกระหว่างวิธีทฤษฎีกำลังแอกทีฟและรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous active and reactive power) กับวิธีทฤษฎีกระแสแอกทีฟและกระแสรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous active and reactive current) โดยวิธีทฤษฎีกระแสแอกทีฟและรีแอกทีฟขณะหนึ่งให้ผลการระบุเอกลักษณ์ที่ดีกว่าในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักไม่เป็นไซน์บริสุทธิ์                                                                                                                                                                                                      |
| 2001                   | EI-Habrouk and Darwish        | ใช้วิธี sliding window Fourier (วิธี SWF) ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ซึ่งวิธีการนี้คำนวณเร็วกว่า FFT ปกติ โดยคำนวณเฉพาะองค์ประกอบมูลฐาน และไปหากลบออกจากกระแสทั้งหมดก็จะได้เฉพาะกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 2002                   | Chang, Chen and Chu           | ใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีโครงอ้างอิง a-b-c (a-b-c reference frame) โดยไม่ต้องอาศัยการแปลงเมตริกซ์ ด้วยเหตุนี้การคำนวณค่ากระแสชดเชยจึงไม่ซับซ้อน แต่ผลเสียประการหนึ่งสำหรับอัลกอริทึมนี้คือ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักไม่เป็นไซน์บริสุทธิ์ การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นค่อนข้างมาก                                                                                                                                                                                                                               |
| 2002                   | Chang, and Shee               | งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกทั้งหมด 6 วิธี ได้แก่ วิธีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง, วิธีกำลังไฟฟ้านับพลัน, วิธีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งในรูปทั่วไป, วิธี synchronous reference frame, วิธี SD และวิธีโครงอ้างอิง a-b-c การทดสอบอัลกอริทึมดังกล่าว ทดสอบกับ 2 ระบบ โดยทั้งสองระบบทดสอบในสถานะที่โหลดไม่สมดุล แต่ที่แตกต่างกันคือ ระบบที่หนึ่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุล แต่ระบบที่สองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จากผลการทดสอบพบว่าวิธี synchronous reference frame, วิธี SD และวิธีโครงอ้างอิง a-b-c ให้ผลการระบุเอกลักษณ์ได้ดีกว่าอีกสามวิธีที่เหลือ |



ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจผลรวมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ (ต่อ)

| ปีที่ตีพิมพ์<br>(ค.ศ.) | คณะผู้วิจัย                                 | สาระสำคัญของงานวิจัย                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2003                   | Jung, Kim,<br>Lim, Yang<br>and<br>Harashima | อัลกอริทึมที่ใช้สำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกของงานวิจัยนี้พัฒนามาจากวิธี SD รูปแบบกระแสเท่ากัน ซึ่งวิธีนี้แตกต่างจากวิธี SD ปกติ คือ มีการคำนวณกระแสแอกที่พมูลฐาน (fundamental reactive current) เพิ่มเติม โดยอัลกอริทึมที่ปรับปรุงนี้เหมาะสำหรับวงจรรอกกำลังไฮบริด ที่มีทั้งวงจรรอกกำลังแอกทีฟและพาสซีฟรวมกัน |

## 2.3 สรุป

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น เกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้วิจัยต้องศึกษาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีต่าง ๆ ในอดีต เนื่องจากความรู้ที่ได้จากการศึกษา จะส่งผลให้ผู้วิจัยมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธี และเป็นพื้นฐานที่สำคัญที่ช่วยให้ผู้วิจัยคิดค้นวิธีการระบุเอกลักษณ์วิธีการใหม่ สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟอย่างได้ผล โดยวิธีการใหม่ที่คิดค้นขึ้น เป็นการผสมผสานข้อดีของวิธีการระบุเอกลักษณ์ในอดีต ซึ่งวิธีการดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

#### 3.1 บทนำ

การศึกษา และวิจัยเรื่องฮาร์มอนิก มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ควรทำความเข้าใจความหมายของฮาร์มอนิก รวมถึงแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก และผลเสียของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิก เพื่อเป็นรากฐานสำหรับงานวิจัยในอนาคต นอกจากนี้ในหัวข้อสุดท้ายของบทนี้ ได้นำเสนอมาตรฐาน และข้อกำหนดสำหรับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการคิดค้นวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีใหม่ ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

#### 3.2 ความหมายของฮาร์มอนิก

ความหมายของฮาร์มอนิก คือ จำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) เช่น ระบบไฟฟ้าในประเทศไทย ใช้ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ เพราะฉะนั้นความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 จะมีค่าเท่ากับ 150 เฮิร์ตซ์ ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เท่ากับ 250 เฮิร์ตซ์ และการเกิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า เกิดจากผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ มารวมกัน ซึ่งผลที่ได้ทำให้รูปสัญญาณกระแสเกิดการบิดเบี้ยว ไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ การอธิบายการเกิดฮาร์มอนิกโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ทำได้โดยฟังก์ชันอนุกรมฟูรีเยร์ ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ (3-1) ดังนี้

$$i(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega_0 t) + B_h \sin(h\omega_0 t)] \quad (3-1)$$

ซึ่ง  $i(t)$  หมายถึง กระแสไฟฟ้าที่เขียนในรูปแบบของอนุกรมฟูรีเยร์

$$\text{โดยที่ } \omega_0 = 2\pi f_0, \quad A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \quad A_h = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(h\omega_0 t) dt$$

$$\text{และ } B_h = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \sin(h\omega_0 t) dt$$

ในสมการที่ (3-1)

$A_0$  คือ องค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง

$h$  คือ อันดับของฮาร์โมนิก

$f_0$  คือ ความถี่มูลฐาน (เฮิรตซ์)

$T$  คือ คาบของสัญญาณ (วินาที)

จากสมการที่ (3-1) สามารถปรับรูปสมการให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (3-2)

$$i(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (3-2)$$

โดยที่

$$I_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \quad (3-3)$$

$$\phi_h = \tan^{-1} \left( \frac{A_h}{B_h} \right) \quad (3-4)$$

ในสมการที่ (3-2) ถึงสมการที่ (3-4)

$I_h$  คือ ขนาดกระแสสูงสุดของฮาร์โมนิกที่อันดับ  $h$

$\phi_h$  คือ มุมเฟสของกระแสฮาร์โมนิกที่อันดับ  $h$

### 3.3 นิยามของฮาร์โมนิกแบบต่าง ๆ

*อินเตอร์ฮาร์โมนิก (interharmonic)* คือ ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่มูลฐาน

*คาแรคเตอร์ิสติกฮาร์โมนิก (characteristic harmonic)* คือ ฮาร์โมนิกที่ถูกสร้างขึ้นด้วย คอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้อุปกรณ์สวิตซ์สารกึ่งตัวนำ มีอันดับของฮาร์โมนิกเป็นไปตามสมการที่ (3-5)

$$h = kp \pm 1 \quad (3-5)$$

โดยที่  $h$  = อันดับของฮาร์โมนิก

$k$  = เลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...

$p$  = จำนวนพัลส์ของคอนเวอร์เตอร์

น้ำหนักแอมพลิจูดฮาร์โมนิก (*non-characteristic harmonic*) คือ ฮาร์โมนิกที่ถูกสร้างขึ้นด้วยคอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้อุปกรณ์สวิตช์สารกึ่งตัวนำ มีอันดับของฮาร์โมนิกไม่เป็นไปตามสมการที่ (3-5)

ทริเพิลฮาร์โมนิก (*tripler harmonic*) คือ ฮาร์โมนิกที่อันดับถูกหารด้วย 3 ลงตัว เช่น ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3, 6, 9,... ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับศูนย์ (zero sequence) ในกรณีระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย ฮาร์โมนิกกลุ่มนี้จะไหลรวมในสายนิวทรัล (George, 2001)

### 3.4 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (current distortion factor)

การวัดปริมาณฮาร์โมนิก จะอยู่ในรูปแบบผลรวมของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบที่เรียกว่า THD (Total harmonic distortion) ซึ่งค่า THD คำนวณได้จากสมการที่ (3-6) (IEEE Std. 519-1992, 1993) ดังนี้

$$THD = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{1,rms}}\right)^2 - 1} \quad (3-6)$$

จากสมการที่ (3-6)

$I_1$  คือ กระแสสูงสุดขององค์ประกอบความถี่มูลฐาน

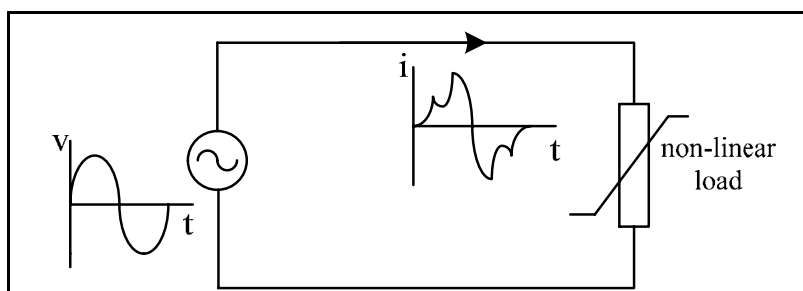
$I_{rms}$  คือ กระแสอาร์เอ็มเอส

$I_{1,rms}$  คือ กระแสอาร์เอ็มเอสขององค์ประกอบมูลฐาน

โดยทั่วไป มาตรฐานข้อกำหนดเกี่ยวกับฮาร์โมนิก จะระบุมาตรฐานโดยใช้ค่า THD เป็นตัวกำหนด ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับมาตรฐานฮาร์โมนิก ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.8

### 3.5 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก

ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนใหญ่เกิดจากโหลดที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (*non-linear load*) ซึ่งโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเหล่านี้ก่อให้เกิดกระแสที่มีลักษณะบิดเบี้ยว ไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ ถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดจะมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ ซึ่งอาจแทนได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การเกิดฮาร์มอนิกจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ที่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ดังต่อไปนี้

#### เตาหลอมไฟฟ้า (arc furnaces)

ส่วนใหญ่เตาหลอมไฟฟ้าจะพบมากในอุตสาหกรรมหลอมโลหะ โดยรูปสัญญาณกระแสของโหลดประเภทนี้จะไม่เป็นรายคาบ (IEEE Std. 519-1992, 1993) อีกทั้งฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเป็นทั้งฮาร์มอนิกที่มีอันดับเป็นจำนวนเต็ม และที่มีอันดับที่ไม่เป็นจำนวนเต็ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 จะพบมากในโหลดประเภทนี้

#### หลอดฟลูออเรสเซนต์

ฮาร์มอนิกที่เกิดจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ส่วนใหญ่เกิดจากบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งก่อให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 เป็นสำคัญ (Srianthumrong, 2003)

#### แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิง (switch mode power supply)

แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิง มีหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น คอมพิวเตอร์ เครื่องสแกนเนอร์ เป็นต้น (สุทธิชัย เปรมฤดีปริษาชาญ, 2544) โดยองค์ประกอบภายในของแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิง ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ ดังนั้นรูปสัญญาณกระแสที่ไหลเข้าอุปกรณ์นี้จึงมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลให้มี ฮาร์มอนิกเกิดขึ้น

#### ไซโคลคอนเวอร์เตอร์

ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ เป็นชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ปรับเปลี่ยนความถี่ได้ โดยอาศัยหลักการการสวิตซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น จะมีค่าต่ำกว่าความถี่มูลฐาน (50 เฮิรตซ์) และโดยทั่วไปจะเรียกความถี่ฮาร์มอนิกดังกล่าวว่า subharmonics (Srianthumrong, 2003)

#### *ตัวชดเชย VAR แบบสถิต (static VAR compensator)*

ตัวชดเชย VAR แบบสถิตมีหน้าที่ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า ปรับปรุงเสถียรภาพให้กับระบบ และคงค่าแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ ซึ่งหลักการโดยทั่วไปอาศัยการสวิตซ์ของเอสซีอาร์ เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟชดเชยให้กับระบบ การสวิตซ์ดังกล่าวเป็นตัวการสำคัญในการเกิดฮาร์โมนิก โดยเฉพาะอย่างยิ่งฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 และฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 (Arrillaga and Watson, 2003)

#### *โหลดไฟประหยัคพลังงาน*

โหลดไฟประเภทนี้ถูกออกแบบมาเพื่อประหยัคพลังงาน แต่ในทางกลับกันโหลดไฟดังกล่าวเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิกในระบบอย่างมาก เมื่อเทียบกับโหลดไส้ธรรมดา (IEEE Std. 519-1992, 1993)

#### *คอนเวอร์เตอร์*

วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่พบส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรม ได้แก่ อินเวอร์เตอร์ คอนเวอร์เตอร์ชนิดหกพัลส์ (6-pulse converter) และคอนเวอร์เตอร์ชนิดสิบสองพัลส์ (12-pulse converter) วงจรดังกล่าวมีหน้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งต้องอาศัยการสวิตซ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยอันดับฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น อธิบายได้ดังสมการที่ (3-5) (George, 2001)

### **3.6 ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์โมนิก**

ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ส่วนใหญ่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ฮาร์โมนิกเหล่านี้ถือได้ว่าเป็น “มลพิษ” ในระบบไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ผลกระทบเนื่องจากฮาร์โมนิกจึงเป็นปัญหาสำคัญประการหนึ่งที่ควรตระหนัก และหาหนทางแก้ไข โดยในหัวข้อนี้ได้อธิบายถึงผลเสียที่เกิดจากฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### *ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้า*

กระแสฮาร์โมนิกที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่ขดลวด และกำลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กมากขึ้น จึงทำให้มอเตอร์มีความร้อนสูง อีกทั้งเกิดการสั่นสะเทือนในขณะที่มอเตอร์หมุน ส่งผลให้เกิดเสียงรบกวนขึ้น ด้วยเหตุดังกล่าวจะทำให้มอเตอร์มีอายุการใช้งานสั้นลง (Arrillaga and Watson, 2003) นอกจากนี้กระแสฮาร์โมนิกยังส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายของพัลส์ในช่องอากาศ ซึ่งผลดังกล่าวจะทำให้มอเตอร์เกิดการกระตุกขณะเริ่มเดินเครื่อง (cogging) จึงทำให้การเริ่มเดินเครื่องไม่ราบเรียบเท่าที่ควร นอกจากนี้ยังส่งผลให้มอเตอร์มีการไต่ความเร็วอย่างเชื่องช้าเมื่อเริ่มเดินเครื่อง (crawling) อีกด้วย (IEEE Std. 519-1992, 1993)

### *ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลงไฟฟ้า*

ผลเสียเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกที่ส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีหลายประการ เช่น มีความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากค่ากำลังงานสูญเสียที่ขดลวดและค่ากำลังงานสูญเสียปลิกย่อยเนื่องจากฟลักซ์ (stray flux loss) มีค่าสูงขึ้น (IEEE Std. 519-1992, 1993) นอกจากนี้ อาจเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ระหว่างขดลวดในหม้อแปลง และตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์อย่างยิ่งในระบบ และมาตรฐานของ ANSI/IEEE standard. c57.12.00-1987 ได้กำหนดให้กระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไม่ควรเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ (George, 2001)

### *ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อสายเคเบิลกำลัง*

ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบสายส่ง จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) และปรากฏการณ์ความใกล้เคียง (proximity effect) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้มีความร้อนสูงขึ้น อาจทำให้ฉนวนของสายส่งชำรุดเสียหายได้ อีกทั้งความต้านทานในสายส่งจะมีค่ามากขึ้น จึงส่งผลให้ค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าเดิม (IEEE Std. 519-1992, 1993)

### *ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อตัวเก็บประจุ*

ระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปมีการต่อชุดตัวเก็บประจุ (capacitor bank) เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และเมื่อเกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าตัวเก็บประจุ จะทำให้ตัวเก็บประจุมีความร้อนสูง เนื่องจากเกิดกำลังงานสูญเสียที่ไดอิเล็กตริก นอกจากนี้การเกิดฮาร์มอนิก อาจทำให้อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเปลี่ยนไป ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลังได้ (George, 2001)

### *ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อมิเตอร์*

มิเตอร์วัดปริมาณทางไฟฟ้า เช่น วัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ได้รับผลกระทบอย่างมากจากการเกิดฮาร์มอนิกในระบบ (Indrajit, and Paul, 1989) เนื่องจากมิเตอร์ดังกล่าวถูกออกแบบเพื่อวัดปริมาณทางไฟฟ้าที่มีรูปสัญญาณเป็นไซน์บริสุทธิ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมาตรวัดวัตต์ชั่วโมง (watt-hour meter) จะมีความคลาดเคลื่อนในการบันทึกค่า เมื่อเกิดฮาร์มอนิกขึ้น (Elham, Clarence, and Adly, 1992) ซึ่งอาจส่งผลให้ผู้ใช้บริการจ่ายค่าไฟมากขึ้นกว่าความเป็นจริง

### *ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อรีเลย์*

การออกแบบอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น รีเลย์ ถูกออกแบบในเงื่อนไขที่ว่าสัญญาณแรงดัน และกระแสต้องมีรูปคลื่นไซน์ แต่เมื่อเกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบ สัญญาณดังกล่าวจะมีลักษณะบิดเบี้ยวไปจากเดิม ดังนั้นความถูกต้องแม่นยำในการใช้อุปกรณ์ดังกล่าวจึงมีค่าลดลงซึ่งผลดังกล่าวอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้ากำลัง และเกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ (Ho, and Liu, 2001)

### ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อฟิวส์

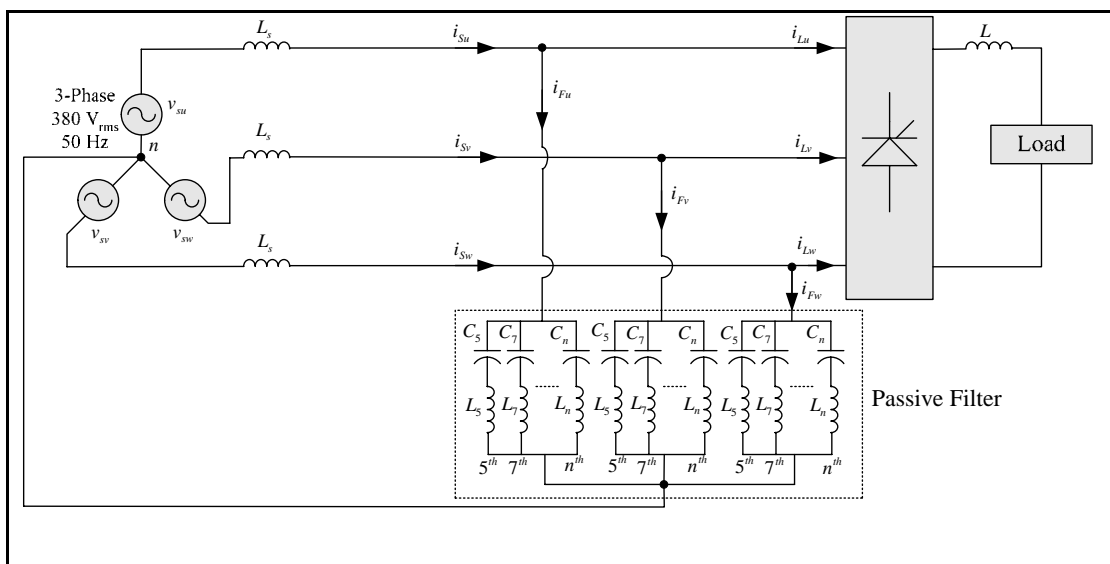
การเกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า กระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนอย่างมากในตัวฟิวส์ จากผลดังกล่าว ทำให้ฟิวส์ใช้เวลาในการหลอมละลายลดลง ซึ่งอาจส่งผลให้ฟิวส์หลอมละลาย ถึงแม้ว่ายังไม่เกิดความผิดปกติในระบบ

### ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบสื่อสาร

ฮาร์มอนิกส่งผลให้เกิดการรบกวนในระบบสื่อสาร เช่น ในระบบโทรศัพท์ ฮาร์มอนิกจะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณรบกวน ซึ่งทำให้มีเสียงรบกวนในขณะที่ใช้โทรศัพท์ นอกจากนี้ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นยังส่งผลให้คุณภาพการส่งสัญญาณลดลง ซึ่งทำให้การส่งข้อมูลข่าวสารมีการสูญหายได้

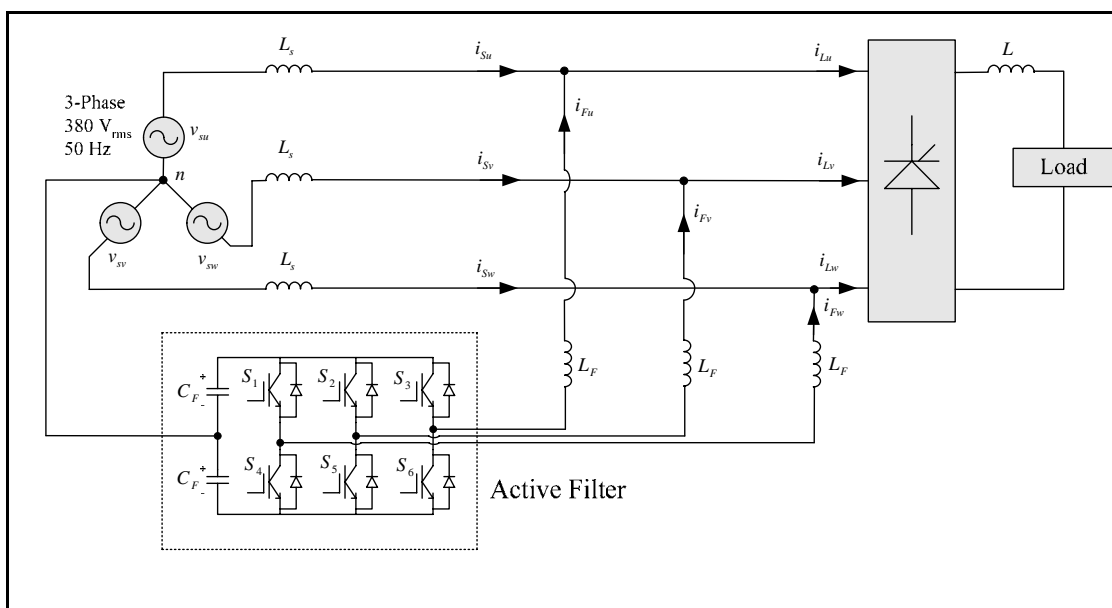
## 3.7 การกำจัดฮาร์มอนิก

การกำจัดฮาร์มอนิกในปัจจุบัน มีหลายวิธีด้วยกัน ดังเช่น การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ ที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 วงจรดังกล่าวง่ายต่อการออกแบบ และมีต้นทุนต่ำ แต่ข้อเสียของวงจรกรองกำลังพาสซีฟ มีอยู่หลายประการด้วยกัน เช่น ประสิทธิภาพของวงจรกรองขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก รวมถึงถ้าคุณลักษณะของโหลดที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกเปลี่ยนไป จะส่งผล

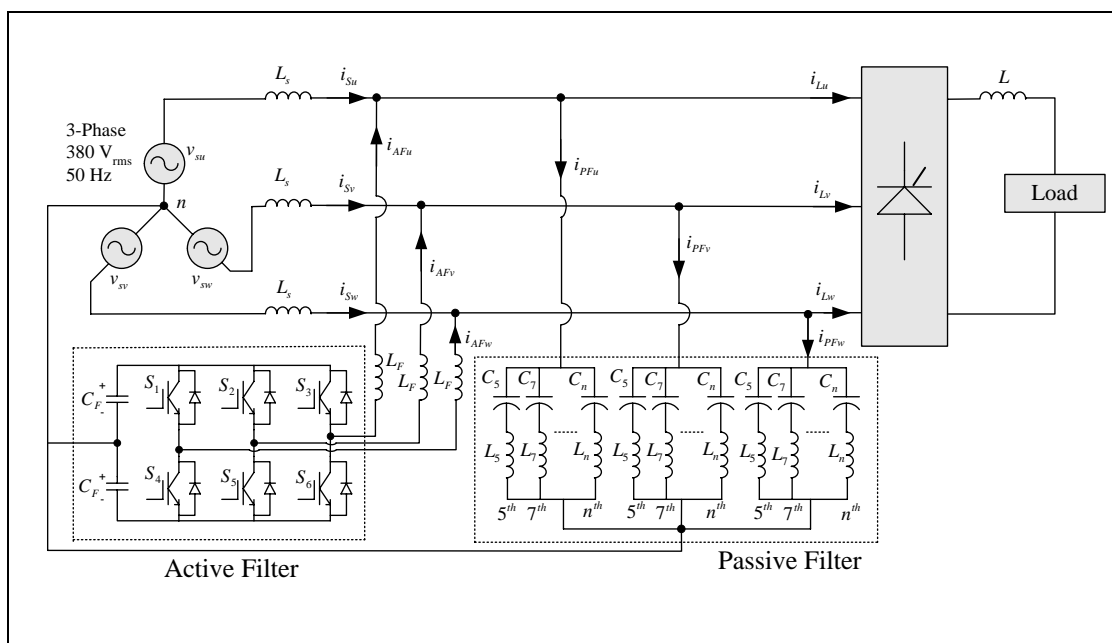


รูปที่ 3.2 วงจรกรองกำลังพาสซีฟ





รูปที่ 3.3 วงจรรอกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 3.4 วงจรรอกำลังไฮบริด

ให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกลดลง นอกจากนี้อาจเกิดสถานะเรโซแนนซ์ในระบบ เนื่องจากวงจรดังกล่าวใช้ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ มาต่อร่วมกัน (Cheng, Bhattacharya and Divan,

1996) ต่อมาการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแบบแอกทีฟ ที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ได้เข้ามามีบทบาทแทนที่วงจรกรองกำลังพาสซีฟ เนื่องจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย อีกทั้งวงจรกรองดังกล่าว ไม่ทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ของระบบ แต่ข้อเสียของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ คือ มีราคาแพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีพิกัดสูง (Jung and Cho, 1998) ต่อมาวงจรกรองกำลังไฮบริด ที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากวงจรกรองดังกล่าวเป็นการผสมผสานข้อดีระหว่างวงจรกรองกำลังพาสซีฟ และวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยต้นทุนของวงจรกรองกำลังไฮบริดมีราคาถูกกว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Singh, Singh, Chandra and Al-Haddad, 1999) แต่เนื่องจากในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นที่การกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ จึงสนใจหลักการการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพียงอย่างเดียว

### 3.8 ข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก

มาตรฐานในการกำหนดปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่มี 2 ประเภท ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดของกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

| $I_{sc}/I_L$ | $I_h/I_L$ , %- General distribution systems (120V-69kV) |                  |                  |                  |             | TDD (%) |
|--------------|---------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|---------|
|              | $h < 11$                                                | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $h \geq 35$ |         |
| <20          | 4.0                                                     | 2.0              | 1.5              | 0.6              | 0.3         | 5       |
| 20-50        | 7.0                                                     | 3.5              | 2.5              | 1.0              | 0.5         | 8       |
| 50-100       | 10                                                      | 4.5              | 4.0              | 1.5              | 0.7         | 12      |
| 100-1000     | 12                                                      | 5.5              | 5.0              | 2.0              | 1.0         | 15      |
| >1000        | 15                                                      | 7.0              | 6.0              | 2.5              | 1.4         | 20      |

Above current distortion limits are for odd harmonics.  
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonics limits.  
For all power generation equipment, distortion limits are those with  $I_{sc}/I_L < 20$ .  
 $I_{sc}$  is the maximum short circuit current at the point of common coupling "PCC".  
 $I_L$  is the fundamental frequency 15- or 30- minute load current at PCC.  
TDD is the total demand distortion (THD normalized by  $I_L$ ).

ตารางที่ 3.2 ข้อกำหนดของกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2

| h                                        | 3   | 5    | 7    | 9    | 11   | 13   | 15 - 39     |
|------------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|-------------|
| Max, I <sub>h</sub> , A                  | 2.3 | 1.14 | 0.77 | 0.40 | 0.33 | 0.21 | 0.15 – 15/h |
| Equipment input current ≤ 16 A per phase |     |      |      |      |      |      |             |

### 3.9 สรุป

รายละเอียดที่นำเสนอในบทนี้ เป็นพื้นฐานความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิก ซึ่งได้อธิบายตั้งแต่ความหมายของฮาร์มอนิก รวมไปถึงแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่สำคัญ และผลเสียเนื่องจากฮาร์มอนิก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหัวข้อที่ 3.4 ได้นำเสนอวิธีการคำนวณค่า THD เพื่อบ่งบอกปริมาณฮาร์มอนิกโดยรวมที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุดอกลักษณะฮาร์มอนิกเพื่อการกำจัดฮาร์มอนิก อีกทั้งการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้อ้างอิงมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 ที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

## บทที่ 4

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

#### 4.1 บทนำ

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า และจากการศึกษาวิจัยในอดีต พบว่า การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มด้วยกัน คือ การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ และการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกบางอันดับ ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค้นคว้าวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่สำหรับกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ เนื้อหาในบทนี้จึงทบทวนอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีที่ได้แก่ วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power theory) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วิธี PQ (Akagi, Ogasawara, and Kim, 1999), วิธีการหมุนแกน (d-q axis หรือแกน direct และแกน quadrature) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วิธี DQ (Takeda, Ikeda, Teramoto, and Aritsuka, 1988) แต่เป็นที่รู้จักกันอีกชื่อหนึ่งว่า วิธีการอ้างอิงซิงโครนัส (synchronous reference frame), วิธีตรวจจับซิงโครนัส (synchronous detection) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วิธี SD (Chen, Lin, and Huang, 1994) และวิธีวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (sliding window Fourier analysis) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วิธี SWFA (EI-Habrouk, and Darwish, 2001) ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวใช้สำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ

#### 4.2 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (วิธี PQ)

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ 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 (4-1) และแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าสามเฟส คือ  $v_u$ ,  $v_v$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

และ  $v_w$  เป็นแรงดันไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์ ( $v_\alpha$ ,  $v_\beta$  และ  $v_0$ ) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-2) หลังจากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดังกล่าวมาคำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟ (active power) และกำลังรีแอกทีฟ (reactive power) ดังสมการที่ (4-3) และสมการที่ (4-4) ตามลำดับ จากสมการที่ (4-4) เมื่อทำการคำนวณค่าดีเทอร์มิแนนต์ จะได้กำลังรีแอกทีฟบนแกน  $\alpha$ ,  $\beta$  และ 0 ( $q_\alpha$ ,  $q_\beta$  และ  $q_0$ ) ดังสมการที่ (4-5)

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$P = \bar{v}_{\alpha\beta 0} \cdot \bar{i}_{\alpha\beta 0} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (4-3)$$

$$\bar{q}_{\alpha\beta 0} = \bar{v}_{\alpha\beta 0} \times \bar{i}_{\alpha\beta 0} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ v_\alpha & v_\beta & v_0 \\ i_\alpha & i_\beta & i_0 \end{vmatrix} \quad (4-4)$$

$$\begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\beta i_0 - v_0 i_\beta \\ v_0 i_\alpha - v_\alpha i_0 \\ v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

ค่ากำลังแอกทีฟที่คำนวณได้จากสมการที่ (4-3) ประกอบไปด้วยองค์ประกอบสองส่วนคือ องค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง ( $\bar{p}$ ) และองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ ( $\bar{p}$ ) ดังสมการที่ (4-6) ส่วนค่ากำลังรีแอกทีฟที่คำนวณได้จากสมการที่ (4-5) ประกอบไปด้วยองค์ประกอบสองส่วน เช่นเดียวกัน โดยแสดงไว้ดังสมการที่ (4-7) ถึงสมการที่ (4-9) ปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ ปรากฏในรูปองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ เพราะฉะนั้นการแยกปริมาณฮาร์มอนิก ทำได้โดยนำค่ากำลังแอกทีฟ และกำลังรีแอกทีฟที่คำนวณได้ ผ่านวงจรกรองผ่านสูง (high-pass filter) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 หลังจากนั้นคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกแอกทีฟบนแกน  $\alpha$ ,  $\beta$  และ 0 ( $i_{ph(\alpha\beta 0)}$ ) ดังสมการที่ (4-10) และคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกรีแอกทีฟบนแกน  $\alpha$ ,  $\beta$  และ 0

( $i_{qh(\alpha\beta 0)}$ ) ดังสมการที่ (4-11) (Peng, Ott, Jr and Adams, 1998) จากสมการที่ (4-10) เมื่อกระจายเทอมผลคูณเชิงสเกลาร์ (dot product) จะได้ดังสมการที่ (4-12) และจากสมการที่ (4-11) เมื่อกระจายเทอมผลคูณเชิงเวกเตอร์ (cross product) จะได้ดังสมการที่ (4-13)

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (4-6)$$

$$q_\alpha = \bar{q}_\alpha + \tilde{q}_\alpha \quad (4-7)$$

$$q_\beta = \bar{q}_\beta + \tilde{q}_\beta \quad (4-8)$$

$$q_0 = \bar{q}_0 + \tilde{q}_0 \quad (4-9)$$

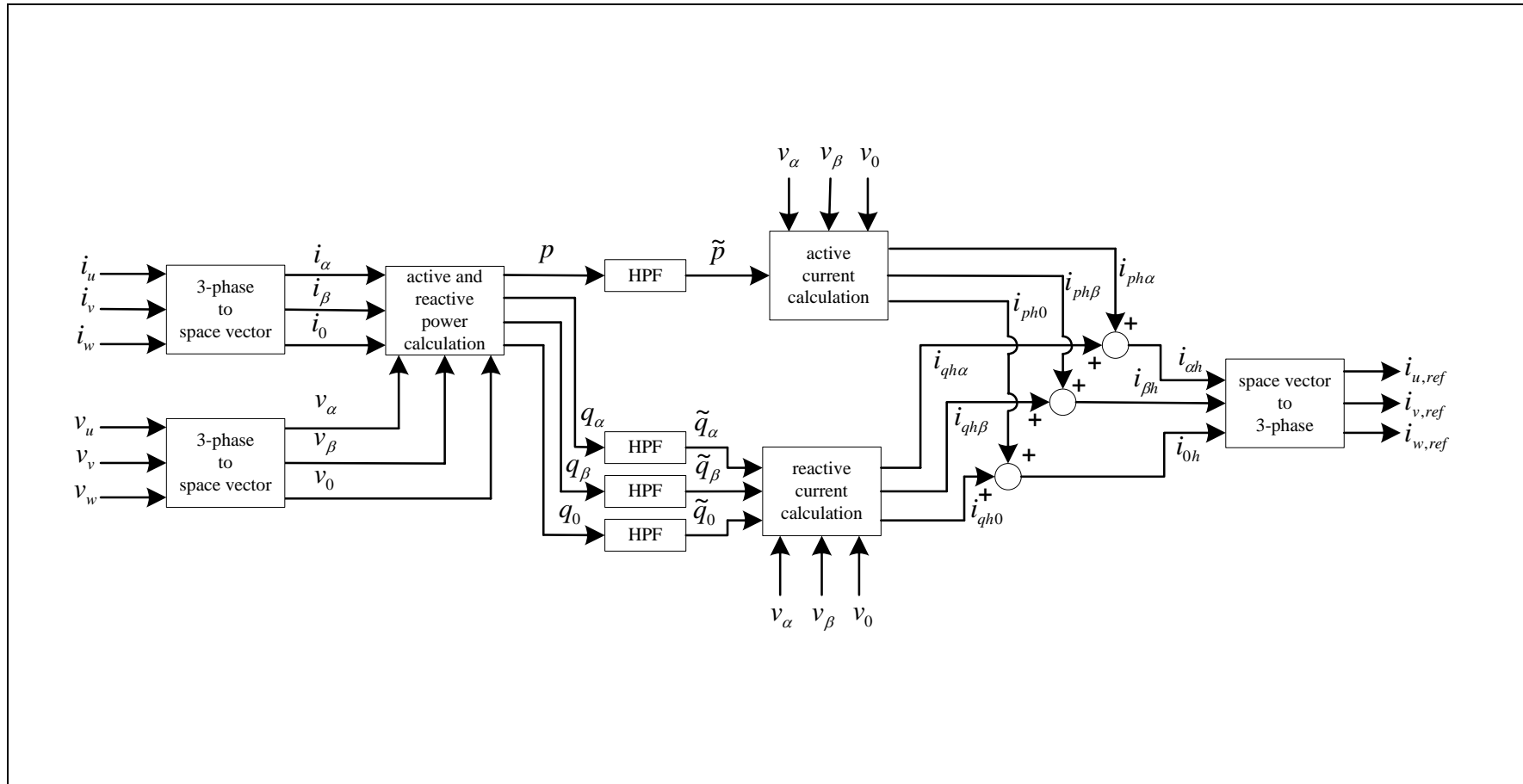
$$\bar{i}_{ph(\alpha\beta 0)} = \frac{\tilde{p}}{\bar{v}_{\alpha\beta 0} \cdot \bar{v}_{\alpha\beta 0}} \cdot \bar{v}_{\alpha\beta 0} \quad (4-10)$$

$$\bar{i}_{qh(\alpha\beta 0)} = \frac{\tilde{q}_{\alpha\beta 0} \times \bar{v}_{\alpha\beta 0}}{\bar{v}_{\alpha\beta 0} \cdot \bar{v}_{\alpha\beta 0}} \quad (4-11)$$

$$\begin{bmatrix} i_{pha} \\ i_{ph\beta} \\ i_{ph0} \end{bmatrix} = \frac{\tilde{p}}{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

$$\begin{bmatrix} i_{qha} \\ i_{qh\beta} \\ i_{qh0} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \begin{bmatrix} v_0 \tilde{q}_\beta - v_\beta \tilde{q}_0 \\ v_\alpha \tilde{q}_0 - v_0 \tilde{q}_\alpha \\ v_\beta \tilde{q}_\alpha - v_\alpha \tilde{q}_\beta \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

การคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกบนแกน  $\alpha$ ,  $\beta$  และ 0 ( $i_{ah}$ ,  $i_{\beta h}$  และ  $i_{0h}$ ) เกิดจากผลรวมของกระแสฮาร์มอนิกแอกทีฟ และกระแสฮาร์มอนิกรีแอกทีฟ ดังสมการที่ (4-14) ถึงสมการที่ (4-16) ดังนี้



รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ

$$i_{ah} = i_{pha} + i_{qha} \quad (4-14)$$

$$i_{bh} = i_{ph\beta} + i_{qh\beta} \quad (4-15)$$

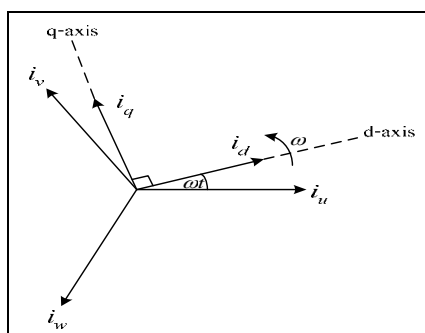
$$i_{0h} = i_{ph0} + i_{qh0} \quad (4-16)$$

ในขั้นสุดท้ายของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้ คือ การคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟ ( $i_{u,ref}$ ,  $i_{v,ref}$  และ  $i_{w,ref}$ ) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-17) จากกระบวนการทั้งหมดสำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้ ได้อธิบายเป็นแผนภาพไว้ดังรูปที่ 4.1

$$\begin{bmatrix} i_{u,ref} \\ i_{v,ref} \\ i_{w,ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{0h} \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

### 4.3 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกน (วิธี DQ)

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ ในขั้นต้นอาศัยการแปลงค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส คือ  $i_u$ ,  $i_v$  และ  $i_w$  เป็นกระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์ (space vector) บนแกน  $\alpha$ ,  $\beta$  และ 0 ( $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  และ  $i_0$ ) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-1) หลังจากนั้นจะนำค่ากระแสบนแกน  $\alpha$  ( $i_\alpha$ )



รูปที่ 4.2 เวกเตอร์กระแสบนแกนหมุน d-q



และแกน  $\beta$  ( $i_\beta$ ) ไปอยู่บนแกนหมุน d-q ( $i_d$  และ  $i_q$ ) ด้วยเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-18) จากสมการดังกล่าวค่า  $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (เรเดียน/วินาที) ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเพื่อต้องการทราบฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบจะกำหนดให้  $\omega$  เท่ากับ ความถี่มูลฐานของระบบ ด้วยเหตุนี้เวกเตอร์กระแสไฟฟ้า  $i_d$  และ  $i_q$  จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความถี่มูลฐาน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 โดยในประเทศไทย ความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ หรือ 314.16 เรเดียน/วินาที จากรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาบนแกนหมุน d-q กระแสที่ความถี่มูลฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรงในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสสลับ ด้วยเหตุนี้การแยกองค์ประกอบระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกนหมุน d-q ( $i_{dh}$  และ  $i_{qh}$ ) และกระแสที่ความถี่มูลฐาน ทำได้โดยใช้วงจรกรอง

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

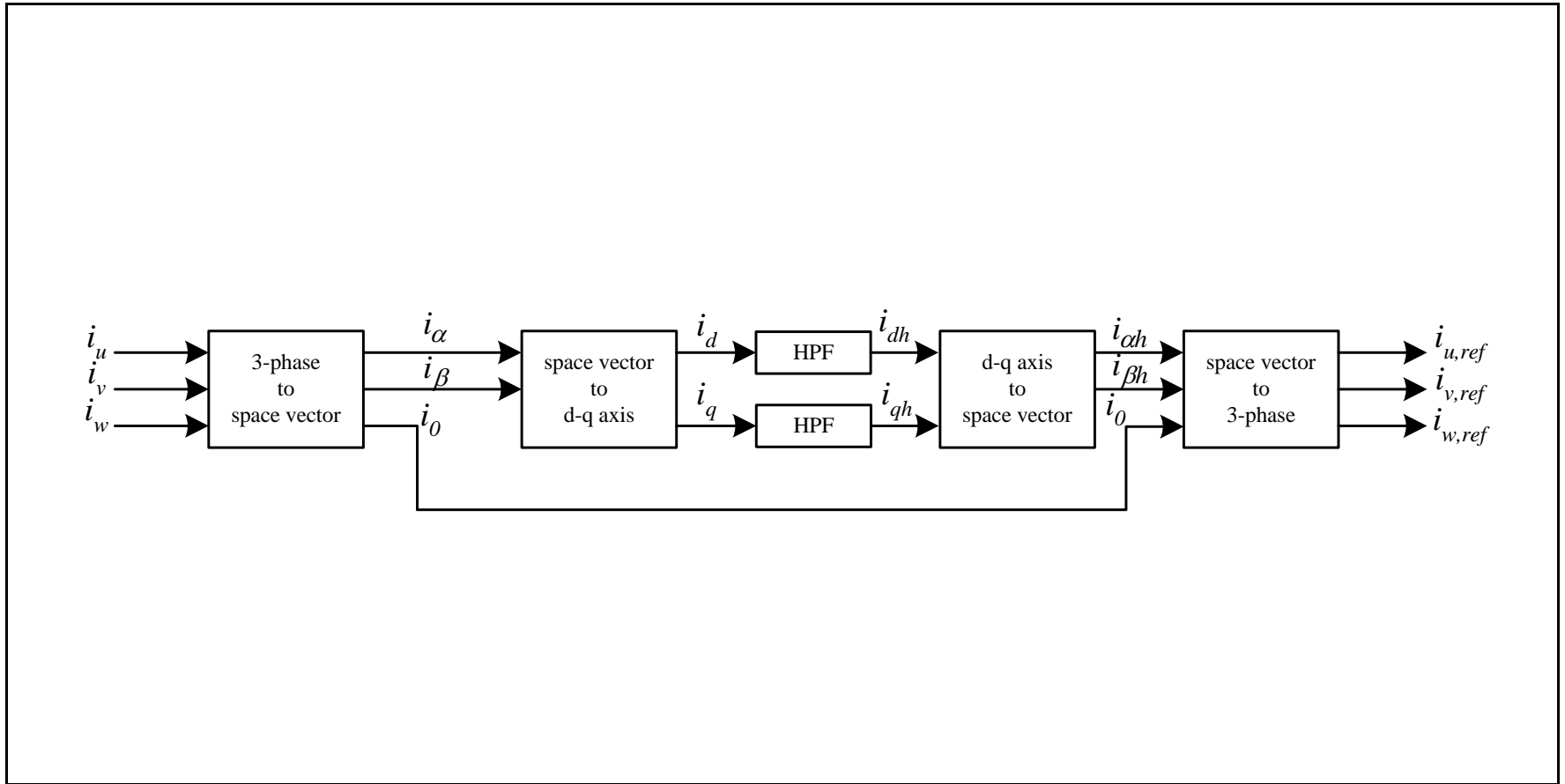
$$\begin{bmatrix} i_{ch} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

ผ่านสูง (high-pass filter) หลังจากนั้นแปลงค่ากระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d-q กลับเป็นกระแสฮาร์มอนิกบนแกน  $\alpha$  และแกน  $\beta$  ( $i_{ch}$  และ  $i_{\beta h}$ ) ดังสมการที่ (4-19) ส่วนกระแสสเปซเวกเตอร์บนแกน 0 ( $i_0$ ) จะนำไปใช้ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ( $i_{u.ref}$ ,  $i_{v.ref}$  และ  $i_{w.ref}$ ) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-20) จากกระบวนการทั้งหมดสำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้ได้อธิบายเป็นแผนภาพไว้ดังรูปที่ 4.3

$$\begin{bmatrix} i_{u.ref} \\ i_{v.ref} \\ i_{w.ref} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ch} \\ i_{\beta h} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

#### 4.4 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีตรวจจับซิงโครนัส (วิธี SD)

วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้ อาศัยการคำนวณค่ากำลังแอกทีฟ (active power) ในแต่ละเฟส ซึ่งสมการของกระแสในแต่ละเฟสแสดงไว้ดังสมการที่ (4-21) ถึงสมการที่ (4-23) วิธี



รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ

SD นี้ สมมติให้กระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสอยู่ในสภาพสมดุลหลังนิคกระแสชดเชยด้วย วงจรกรองกำลังแอกทีฟ ดังสมการที่ (4-24) เมื่อ  $I_{mu}$ ,  $I_{mv}$  และ  $I_{mw}$  คือ ค่ากระแสขดในแต่ละเฟส

$$i_{mu}(t) = I_{mu} \sin(\omega t + \phi) \quad (4-21)$$

$$i_{mv}(t) = I_{mv} \sin(\omega t + \phi - 120^\circ) \quad (4-22)$$

$$i_{mw}(t) = I_{mw} \sin(\omega t + \phi - 240^\circ) \quad (4-23)$$

$$I_{mu} = I_{mv} = I_{mw} \quad (4-24)$$

เนื่องจากกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสอยู่ในสภาวะสมดุล การคำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟ ในแต่ละเฟสจึงคำนวณได้จากสมการที่ (4-25) ถึง (4-27) ตามลำดับ

$$P_u = \frac{P_{dc} E_u}{E_{tot}} \quad (4-25)$$

$$P_v = \frac{P_{dc} E_v}{E_{tot}} \quad (4-26)$$

$$P_w = \frac{P_{dc} E_w}{E_{tot}} \quad (4-27)$$

ซึ่ง  $E_u$ ,  $E_v$  และ  $E_w$  คือ ค่าแรงดันขดในแต่ละเฟส ในขณะที่  $E_{tot}$  คือ ผลรวมของ  $E_u$ ,  $E_v$  และ  $E_w$  ที่ แสดงไว้ในสมการที่ (4-28) ส่วนค่า  $P_{dc}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย และการคำนวณหาค่ากระแสที่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-29) ถึง (4-31) ตามลำดับ

$$E_{tot} = E_u + E_v + E_w \quad (4-28)$$

$$i_{mu}(t) = \frac{2e_u(t)P_u}{E_u^2} \quad (4-29)$$

ซึ่ง  $e_u(t)$ ,  $e_v(t)$  และ  $e_w(t)$  คือ แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสที่เวลา  $t$  ใด ๆ หลังจากคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส การคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ( $i_{u,ref}$ ,  $i_{v,ref}$  และ  $i_{w,ref}$ ) สามารถได้จากสมการที่ (4-32) ถึง (4-34) โดยที่  $i_{Lu}(t)$ ,  $i_{Lv}(t)$

$$i_{mv}(t) = \frac{2e_v(t)P_v}{E_v^2} \quad (4-30)$$

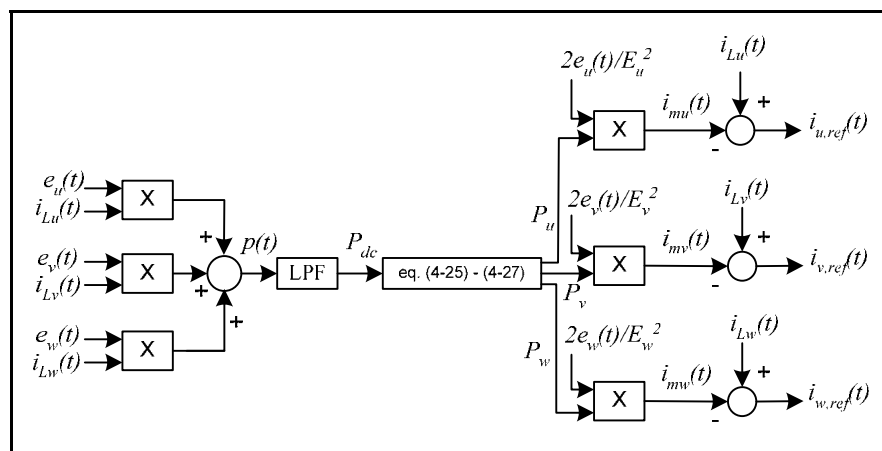
$$i_{mw}(t) = \frac{2e_w(t)P_w}{E_w^2} \quad (4-31)$$

และ  $i_{Lw}(t)$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าโหลดในแต่ละเฟส โดยค่ากระแสดังกล่าวประกอบไปด้วยกระแสฮาร์มอนิก และกระแสที่องค์ประกอบความถี่มูลฐาน เพราะฉะนั้นกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในแต่ละเฟส จึงคำนวณได้จากสมการที่ (4-32) ถึง (4-34) ซึ่งกระแสดังกล่าวเป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เพื่อลดกระแสชดเชยฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ

$$i_{u,ref}(t) = i_{Lu}(t) - i_{mu}(t) \quad (4-32)$$

$$i_{v,ref}(t) = i_{Lv}(t) - i_{mv}(t) \quad (4-33)$$

$$i_{w,ref}(t) = i_{Lw}(t) - i_{mw}(t) \quad (4-34)$$



รูปที่ 4.4 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD

กระบวนการทั้งหมดสำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD ตามที่ได้นำเสนอข้างต้นแสดงเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจากรูปสังเกตได้ว่า การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าขณะใด ๆ ( $p(t)$ ) ของโหลดเกิดจากผลรวมของการนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าโหลดคูณกับค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส และเมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้างกล่าวผ่านวงจรกรองแบบผ่านต่ำ (low pass filter) จะได้ค่า  $P_{dc}$  ซึ่งใช้ในการคำนวณ สำหรับสมการที่ (4-25) ถึง (4-27)

#### 4.5 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (วิธี SWFA)

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA อาศัยการคำนวณจากสมการของอนุกรมฟูริเยร์ ซึ่งการคำนวณจะดำเนินการเฉพาะค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน ( $i_1$ ) ดังสมการที่ (4-35) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์  $A_1$  และ  $B_1$  คำนวณได้จากสมการที่ (4-36) และ (4-37) ตามลำดับ จากสมการดังกล่าว  $T$  คือ ค่าเวลาในการซีกตัวอย่าง (วินาที),  $\omega$  คือ ความถี่มูลฐาน (เรเดียน/วินาที),  $N$  คือ จำนวนจุดข้อมูลในการคำนวณต่อหนึ่งคาบ และ  $N_0$  คือ ตำแหน่งของจุดข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ หลัง

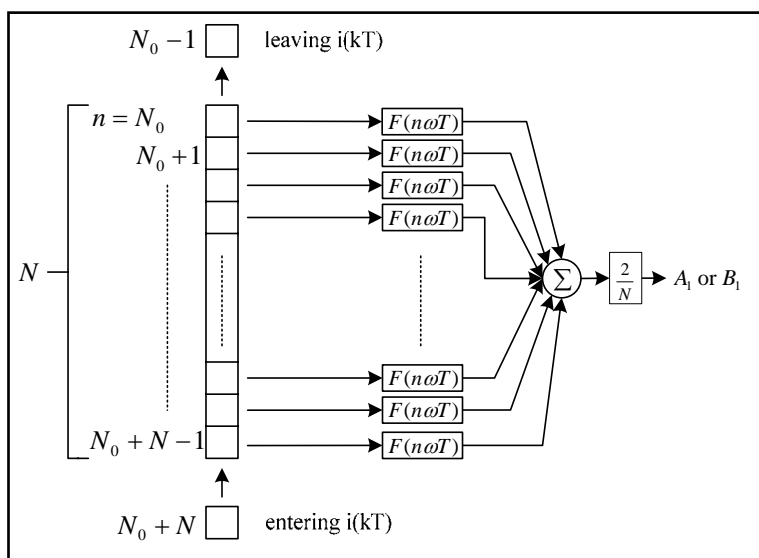
$$i_1(kT) = A_1 \cos(\omega kT) + B_1 \sin(\omega kT) \quad (4-35)$$

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(nT) \cos(n\omega T) \quad (4-36)$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(nT) \sin(n\omega T) \quad (4-37)$$

จากคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณไปหักลบออกจากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก ( $i$ ) ดังสมการที่ (4-38) จะได้กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ ( $i_h$ ) โดยในขั้นแรกจะรับข้อมูลกระแส  $i$  จำนวนหนึ่งคาบ ซึ่งมีทั้งหมด  $N$  ข้อมูล หลังจากนั้นทำการคำนวณค่า  $A_1$  และ  $B_1$  จากสมการที่ (4-36) และ (4-37) เพื่อคำนวณค่ากระแส  $i_1$  จากสมการที่ (4-35) ค่าสัมประสิทธิ์  $A_1$  และ  $B_1$  ที่ได้จากการคำนวณในช่วงแรกนี้จะถูกเก็บเป็นข้อมูลในรูปแบบของแถวลำดับดังรูปที่ 4.5 ซึ่งในรูปดังกล่าว  $F(n\omega T) = \cos(n\omega T)$  ในกรณีคำนวณค่า  $A_1$  และ  $F(n\omega T) = \sin(n\omega T)$  ในกรณีคำนวณค่า  $B_1$  กระบวนการดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นเป็นการคำนวณเพื่อกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก 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 (4-39) และ (4-40) ตามลำดับ โดยที่  $A_1^{(old)}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์  $A_1$  ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้อยู่ และ  $B_1^{(old)}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์  $B_1$  ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้อยู่เช่นเดียวกัน จากกระบวนการดังกล่าวทั้งหมดข้างต้น มีการคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในทุกรอบของการรับข้อมูลกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับ  $T$  วินาที



รูปที่ 4.5 แผนภาพอธิบายการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_1$  และ  $B_1$

$$i_h = i - i_1 \tag{4-38}$$

$$A_1^{(new)} = A_1^{(old)} + \frac{2}{N} \{i[(N_0 + N)T] \cos[(N_0 + N)\omega T] - i[(N_0 - 1)T] \cos[(N_0 - 1)\omega T]\} \tag{4-39}$$

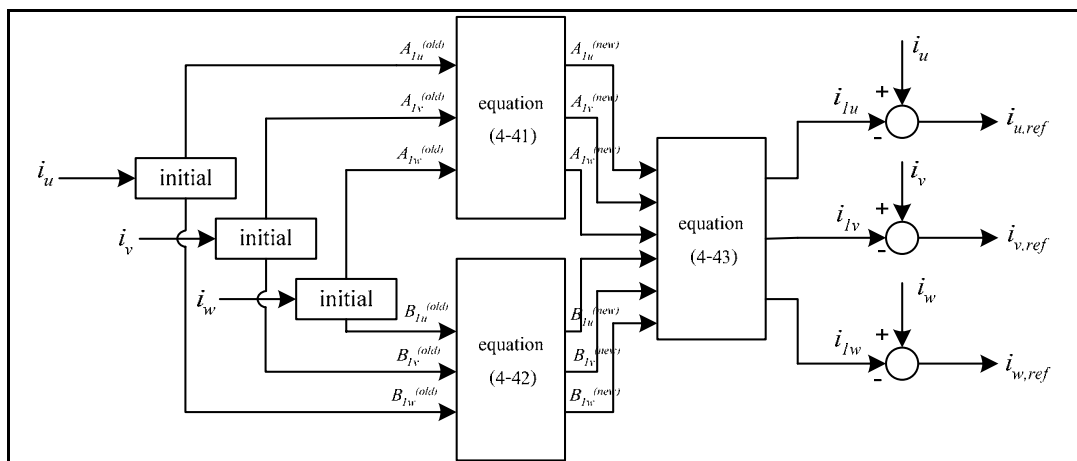
$$B_1^{(new)} = B_1^{(old)} + \frac{2}{N} \{i[(N_0 + N)T] \sin[(N_0 + N)\omega T] - i[(N_0 - 1)T] \sin[(N_0 - 1)\omega T]\} \tag{4-40}$$

จากการอธิบายข้างต้น เป็นการคำนวณสำหรับหนึ่งเฟส การนำวิธี SWFA นี้ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_1$  และ  $B_1$  กับระบบไฟฟ้าสามเฟส ทำได้โดยใช้สมการที่ (4-41) และ (4-42) ตามลำดับ ส่วนการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานทั้งสามเฟสคำนวณได้จากสมการที่ (4-43) การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธี SWFA สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส แสดงเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ 4.6

$$\begin{bmatrix} A_{1u}^{(new)} \\ A_{1v}^{(new)} \\ A_{1w}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1u}^{(old)} \\ A_{1v}^{(old)} \\ A_{1w}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_u[(N_0 - 1)T] \\ i_v[(N_0 - 1)T] \\ i_w[(N_0 - 1)T] \end{bmatrix} \cos[(N_0 - 1)\omega T] \\ + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_u[(N_0 + N)T] \\ i_v[(N_0 + N)T] \\ i_w[(N_0 + N)T] \end{bmatrix} \cos[(N_0 + N)\omega T] \quad (4-41)$$

$$\begin{bmatrix} B_{1u}^{(new)} \\ B_{1v}^{(new)} \\ B_{1w}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{1u}^{(old)} \\ B_{1v}^{(old)} \\ B_{1w}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_u[(N_0 - 1)T] \\ i_v[(N_0 - 1)T] \\ i_w[(N_0 - 1)T] \end{bmatrix} \sin[(N_0 - 1)\omega T] \\ + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_u[(N_0 + N)T] \\ i_v[(N_0 + N)T] \\ i_w[(N_0 + N)T] \end{bmatrix} \sin[(N_0 + N)\omega T] \quad (4-42)$$

$$\begin{bmatrix} i_{1u}(kT) \\ i_{1v}(kT) \\ i_{1w}(kT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1u} & B_{1u} \\ A_{1v} & B_{1v} \\ A_{1w} & B_{1w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega kT) \\ \sin(\omega kT) \end{bmatrix} \quad (4-43)$$



รูปที่ 4.6 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA

#### 4.6 สรุป

ความรู้เกี่ยวกับอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกทั้งสี่วิธีที่ได้รับการทบทวนไว้ เป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการดำเนินงานระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก เพื่อใช้งานกับวงจรกรองกำลัง แอक्तिฟ สำหรับกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ พื้นฐานความเข้าใจที่เกิดขึ้น จะนำไปสู่

การคิดค้นวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกวิธีการใหม่เพื่อให้มีประสิทธิภาพดีกว่าเดิม ในงานวิจัย  
วิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้ใช้ข้อดีในแต่ละวิธีมาผสมผสานกันจนเกิดขึ้นเป็นวิธีการระบุเอกลักษณ์  
ฮาร์โมนิกวิธีการใหม่ ดังที่นำเสนอไว้ในบทที่ 5



## บทที่ 5

### การระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกนประกอบกับวิธีฟูรีเยร์

#### 5.1 บทนำ

การระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกนประกอบกับวิธีฟูรีเยร์ (DQ axis with Fourier) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วิธี DQF เป็นวิธีการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทิฟ ในการกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย วิธี DQF เป็นการผสมผสานข้อดีของวิธี DQ และวิธี SWFA ซึ่งทำให้วิธี DQF เป็นวิธีการระบุนอกลักษณะที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการระบุนอกลักษณะทั้งสี่วิธีที่พบทวนไว้ในบทที่ 4 บทนี้จึงนำเสนอขั้นตอนการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF อย่างละเอียด รวมถึงชี้ประเด็นจุดเด่นของวิธี DQ และวิธี SWFA ที่ผู้วิจัยได้นำมาใช้ร่วมกันในวิธี DQF นอกจากนี้เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการลดเวลาการคำนวณ สำหรับการระบุนอกลักษณะด้วยวิธี DQF ด้วยเช่นกัน

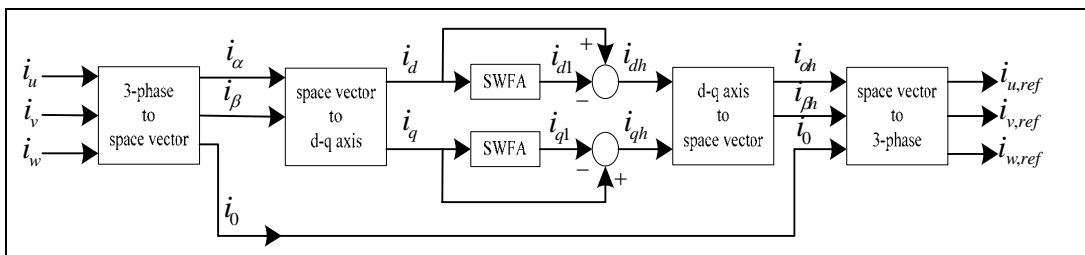
#### 5.2 การระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกนประกอบกับวิธีฟูรีเยร์

การระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ในขั้นตอนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส คือ  $i_u$ ,  $i_v$  และ  $i_w$  เป็นกระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์ ( $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  และ  $i_0$ ) ดังสมการที่ (5-1) ต่อจากนั้นแปลงค่ากระแสบนแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ( $i_\alpha$  และ  $i_\beta$ ) ไปอยู่บนแกนหมุน d-q ( $i_d$  และ  $i_q$ ) ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5-2) ในสมการดังกล่าวค่า  $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (เรเดียน/วินาที) การระบุนอกลักษณะ

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

ฮาร์มอนิกเพื่อต้องการทราบฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ จะกำหนดให้  $\omega$  เท่ากับ ความถี่มูลฐานของระบบ ด้วยเหตุนี้เวกเตอร์กระแสไฟฟ้า  $i_d$  และ  $i_q$  จึงหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความถี่มูลฐาน การคำนวณตามกระบวนการดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นของวิธี DQF ในช่วงแรกนี้จะเหมือนกับวิธี DQ ทุกประการ และถ้าพิจารณาบนแกนหมุน d-q กระแสที่มีความถี่มูลฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรง ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสสลับ การแยกองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง ซึ่งเป็นกระแสที่มีความถี่มูลฐานออกจากองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับจะแตกต่างกับวิธี DQ ที่ใช้วงจรกรองผ่านสูง โดยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธี DQF จะแยกองค์ประกอบดังกล่าวโดยใช้หลักการของวิธี SWFA ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.1 ซึ่งค่ากระแสความถี่มูล



รูปที่ 5.1 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF

ฐานที่ได้ มีความถูกต้องแม่นยำว่าการใช้วงจรกรองผ่านสูง การใช้วิธี SWFA ในที่นี้เริ่มต้นจากการพิจารณาความสัมพันธ์ออยเลอร์-ฟูริเยร์ (Euler-Fourier formulas) ดังสมการที่ (5-3) ซึ่งมีองค์ประกอบสองเทอม คือ เทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง และเทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ เมื่อกระแสที่มีความถี่มูลฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรง การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF จึงคำนวณเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์  $A_0$  เท่านั้น ซึ่งการคำนวณหาค่า  $A_0$  สามารถได้จากการแทนค่า  $h = 0$  ในสมการที่ (5-4) เพราะฉะนั้นจากรูปที่ 5.1 ค่า

$$i(kT) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega kT) + B_h \sin(h\omega kT)] \tag{5-3}$$

$$A_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(nT) \cos(nh\omega T) \tag{5-4}$$

กระแสไฟฟ้าที่มีความถี่มูลฐานบนแกน d ( $i_{d1}$ ) และค่ากระแสไฟฟ้าที่มีความถี่มูลฐานบนแกน q ( $i_{q1}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-5) และ (5-6) ตามลำดับ ค่า  $A_{0d}$  และ  $A_{0q}$  จากสมการดังกล่าวคำนวณได้จาก

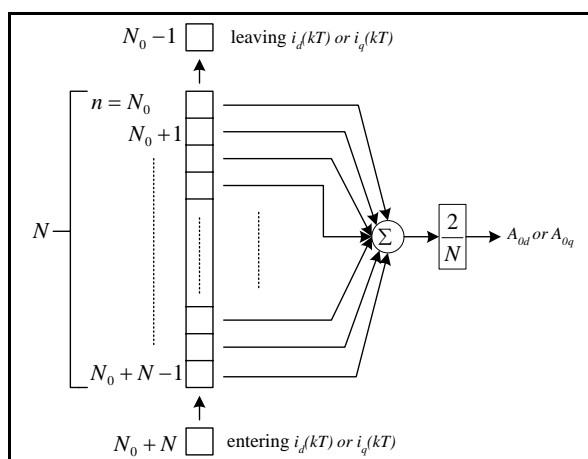
$$i_{d1}(kT) = \frac{A_{0d}}{2} \quad (5-5)$$

$$i_{q1}(kT) = \frac{A_{0q}}{2} \quad (5-6)$$

$$A_{0d} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_d(nT) \quad (5-7)$$

$$A_{0q} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_q(nT) \quad (5-8)$$

$$\begin{bmatrix} A_{0d}^{(new)} \\ A_{0q}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{0d}^{(old)} \\ A_{0q}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_d[(N_0-1)T] \\ i_q[(N_0-1)T] \end{bmatrix} + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_d[(N_0+N)T] \\ i_q[(N_0+N)T] \end{bmatrix} \quad (5-9)$$



รูปที่ 5.2 แผนภาพอธิบายการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_{0d}$  และ  $A_{0q}$

สมการที่ (5-7) และ (5-8) ซึ่งการคำนวณเริ่มด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นของ  $A_{0d}$  และ  $A_{0q}$  โดยรับข้อมูลกระแส  $i_d$  และ  $i_q$  มาหนึ่งคาบ ซึ่งมีทั้งหมด  $N$  ข้อมูล มาคำนวณตามสมการที่ (5-7) และ (5-8) หลังจากนั้นเก็บค่าดังกล่าวในรูปแบบของแถวลำดับดังรูปที่ 5.2 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 (5-9) โดยที่  $A_{0d}^{(old)}$  คือ ค่า

สัมประสิทธิ์  $A_{0d}$  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 (5-10) และ (5-11) จะได้กระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบบนแกนหมุน d-q ( $i_{dh}$  และ  $i_{qh}$ ) หลังจากนั้นแปลงค่ากระแส ฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d-q กลับเป็นกระแสฮาร์มอนิกบนแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ( $i_{ch}$  และ  $i_{\beta h}$ ) ดังสมการที่ (5-12) ส่วนกระแส  $i_0$  จะนำไปใช้ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามเฟส ( $i_{u,ref}$ ,  $i_{v,ref}$  และ  $i_{w,ref}$ ) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (5-13)

$$i_{dh} = i_d - i_{d1} \quad (5-10)$$

$$i_{qh} = i_q - i_{q1} \quad (5-11)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ch} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

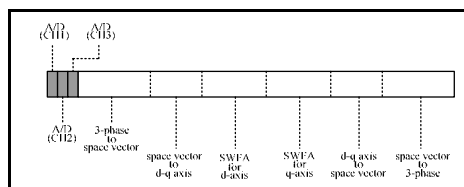
$$\begin{bmatrix} i_{u,ref} \\ i_{v,ref} \\ i_{w,ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ch} \\ i_{\beta h} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (5-13)$$

จากกระบวนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ตามที่ได้อธิบายข้างต้น สังเกตได้ว่า ในช่วงแรกของการคำนวณ และในช่วงสุดท้ายของการคำนวณ จะเหมือนกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ ทุกประการ ทั้งนี้เนื่องจากข้อดีของการคำนวณตามวิธี DQ มีการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าในลำดับศูนย์ (zero sequence) หรือ  $i_0$  ซึ่งกระแสดังกล่าวจะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุล เมื่อคำนึงถึงค่ากระแสลำดับศูนย์ จะส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามเฟสสามารถฉีดกระแสชดเชยได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ระบบกลับมาอยู่ในสภาพสมดุลได้ หลังกำจัดฮาร์มอนิก ซึ่งรายละเอียดในส่วนนี้ได้นำเสนอไว้ในส่วนของผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในบท

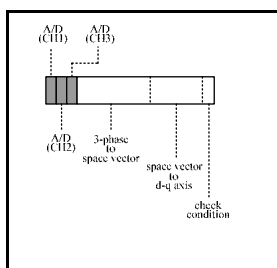
ที่ 7 ประเด็นที่แตกต่างกันระหว่างวิธี DQ และวิธี DQF อยู่ที่การแยกองค์ประกอบสัญญาณ กระแสตรงออกจากองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ โดยวิธี DQF ได้นำข้อดีของวิธี SWFA มาใช้ ในส่วนนี้ แทนการใช้วงจรกรองผ่านสูงตามวิธี DQ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการคำนวณตามหลักการของวิธี SWFA เหมาะกับการใช้งานในเวลาจริง อีกทั้งมีความถูกต้องสูง เมื่อเทียบกับการใช้วงจรกรองผ่านสูง นอกจากนี้เมื่อระบบมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนไปจากเดิม รูปแบบของกระแสฮาร์มอนิกจะ เปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน สถานการณ์ดังกล่าวอาจส่งผลให้การออกแบบวงจรกรองผ่านสูงตามวิธี DQ ต้องดำเนินการใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับรูปแบบของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น แต่ในทางกลับกัน การแยกองค์ประกอบดังกล่าวโดยใช้วิธี SWFA สามารถใช้ได้กับรูปแบบกระแสฮาร์มอนิกได้ทุก รูปแบบ โดยไม่ขึ้นอยู่กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้เสนอวิธีการลดเวลาการ คำนวณของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF โดยได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.3 ต่อจากนี้

### 5.3 การลดเวลาการคำนวณ

จากการอธิบายวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ข้างต้น ถ้าพิจารณาสมการที่ (5-9) อาจสังเกตได้ว่า เมื่อข้อมูลกระแสบนแกน d และแกน q ค่าเก่าและค่าใหม่มีค่าเท่ากัน นั่นก็คือ  $A_{0d}^{(new)}$



(ก) แผนภาพแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อไม่มีการตรวจสอบเงื่อนไข

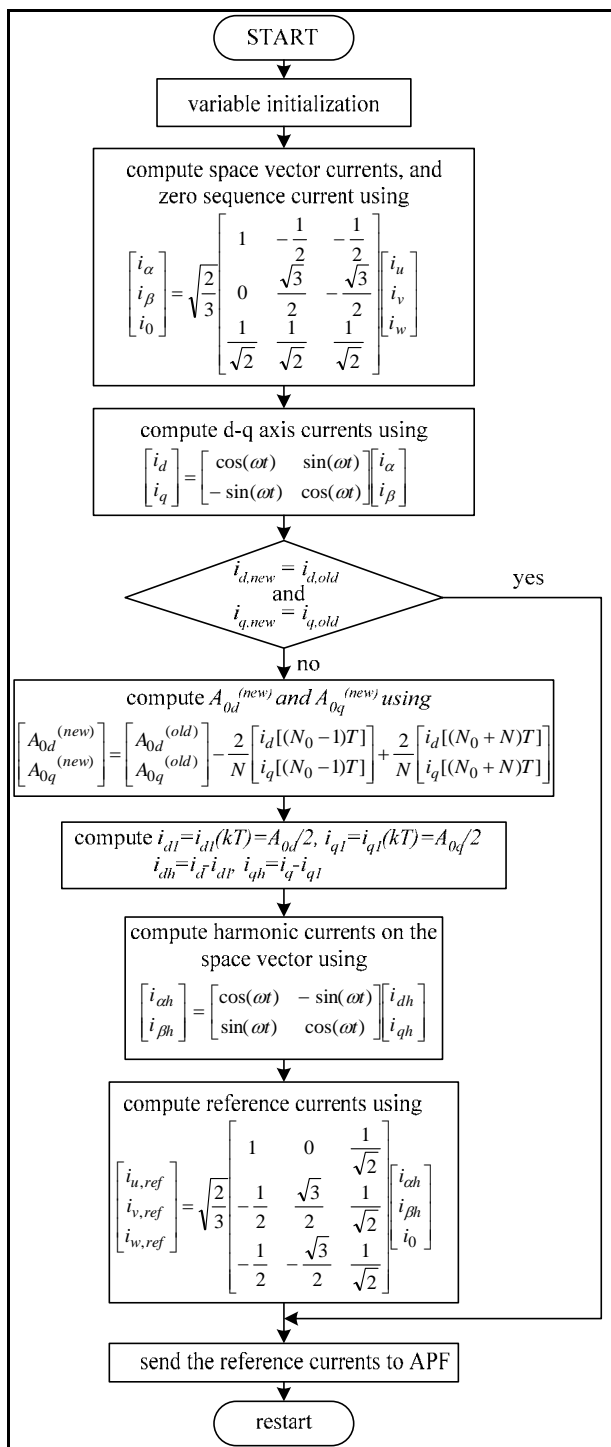


(ข) แผนภาพแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อมีการตรวจสอบเงื่อนไข

รูปที่ 5.3 แผนภาพแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงด้วยวิธี DQF

เท่ากับ  $A_{0d}^{(old)}$  และ  $A_{0q}^{(new)}$  เท่ากับ  $A_{0q}^{(old)}$  จะไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว ดังนั้นค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสที่จ่ายให้วงจรรองกำลังแอกทีฟ จึงสามารถใช้ค่าเดิมได้ จากการอธิบายข้างต้น เมื่อพิจารณาเวลาในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟดูได้จากรูปที่ 5.3 ซึ่งรูปดังกล่าวเป็นการแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณในหนึ่งรอบการรับข้อมูล โดยในรูปที่ 5.3 (ก) แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณในกรณีที่ไม่มีการตรวจสอบเงื่อนไขการเท่ากันของกระแสบนแกน d และแกน q ส่วนรูปที่ 5.3 (ข) แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณในกรณีที่มีการตรวจสอบเงื่อนไขการเท่ากันของกระแสบนแกน d และแกน q จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าเมื่อเงื่อนไขการเท่ากันเป็นจริง ก็ไม่มีความจำเป็นต้องคำนวณตามขั้นตอนที่เหลือ เหตุการณ์ลักษณะเช่นนี้พบได้ส่วนมากในวงรอบการรับข้อมูลแต่ละครั้ง เมื่อดำเนินการเช่นนี้จะช่วยลดเวลาในการคำนวณลงได้ ทั้งนี้อาจพิจารณาได้จาก ขั้นตอนการคำนวณที่มี 13 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- ขั้นที่ 1 กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับการระบุเอกลักษณ์
- ขั้นที่ 2 แปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสเป็นกระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์บนแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ตามสมการที่ (5-1)
- ขั้นที่ 3 แปลงค่ากระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์บนแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ไปอยู่บนแกนหมุน d-q ตามสมการที่ (5-2)
- ขั้นที่ 4 ตรวจสอบเงื่อนไขบนแกน d และแกน q โดยมีเงื่อนไขดังนี้  
 ถ้าค่ากระแส  $i_d$  ค่าใหม่ เท่ากับ ค่ากระแส  $i_d$  ค่าเก่า และ  
 ถ้าค่ากระแส  $i_q$  ค่าใหม่ เท่ากับ ค่ากระแส  $i_q$  ค่าเก่า  
 เป็นจริง ให้ข้ามขั้นตอนการคำนวณขั้นที่ 5 ถึง 12 ไปดำเนินการขั้นที่ 13
- ขั้นที่ 5 คำนวณค่า  $A_{0d}^{(new)}$  ตามสมการที่ (5-9)
- ขั้นที่ 6 คำนวณค่า  $i_{d1}$  ตามสมการที่ (5-5)
- ขั้นที่ 7 คำนวณค่า  $i_{dh}$
- ขั้นที่ 8 คำนวณค่า  $A_{0q}^{(new)}$  ตามสมการที่ (5-9)
- ขั้นที่ 9 คำนวณค่า  $i_{q1}$  ตามสมการที่ (5-6)
- ขั้นที่ 10 คำนวณค่า  $i_{qh}$
- ขั้นที่ 11 แปลงค่า  $i_{dh}$  และ  $i_{qh}$  เป็น  $i_{\alpha h}$  และ  $i_{\beta h}$  ตามสมการที่ (5-12)
- ขั้นที่ 12 คำนวณค่า  $i_{u,ref}$ ,  $i_{v,ref}$  และ  $i_{w,ref}$  ตามสมการที่ (5-14)
- ขั้นที่ 13 ได้กระแสอ้างอิงให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 5.4 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF

ทั้ง 13 ขั้นตอนนี้ สามารถแทนได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 5.4 จากขั้นตอนดังกล่าวสังเกตได้ว่า หน่วยประมวลผลไม่ต้องดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนที่ 5 ถึง 12 หากเงื่อนไขที่ตรวจสอบเป็นจริง หน่วยประมวลผลสามารถนำช่วงเวลาดังกล่าวไปใช้ประโยชน์เพื่อกิจกรรมอื่นใดได้

## 5.4 สรุป

วิธี DQF สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก ตามที่ได้นำเสนอในบทนี้ เป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ จากการผสมผสานข้อดีของวิธี DQ และวิธี SWFA เข้าไว้ด้วยกัน ข้อดีของวิธี DQ คือ มีการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์ ซึ่งส่งผลให้การฉีดกระแสชดเชยของวงจรรองกำลัง แยกที่ฟในระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุลเป็นไปอย่างเหมาะสม สามารถนำระบบให้กลับมาอยู่ในสภาพสมดุล หลังการกำจัดฮาร์โมนิก 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 ซึ่งส่งผลให้การกำจัดฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุล ไม่สามารถทำให้ระบบกลับมาอยู่ในสภาพสมดุลได้ภายหลังการกำจัดฮาร์โมนิก รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ รวมถึงข้อดี และข้อเสียของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกในแต่ละวิธีจะนำเสนอไว้ในบทที่ 7 ซึ่งเป็นผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกที่อาศัยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกในแต่ละวิธีเปรียบเทียบกัน



## บทที่ 6

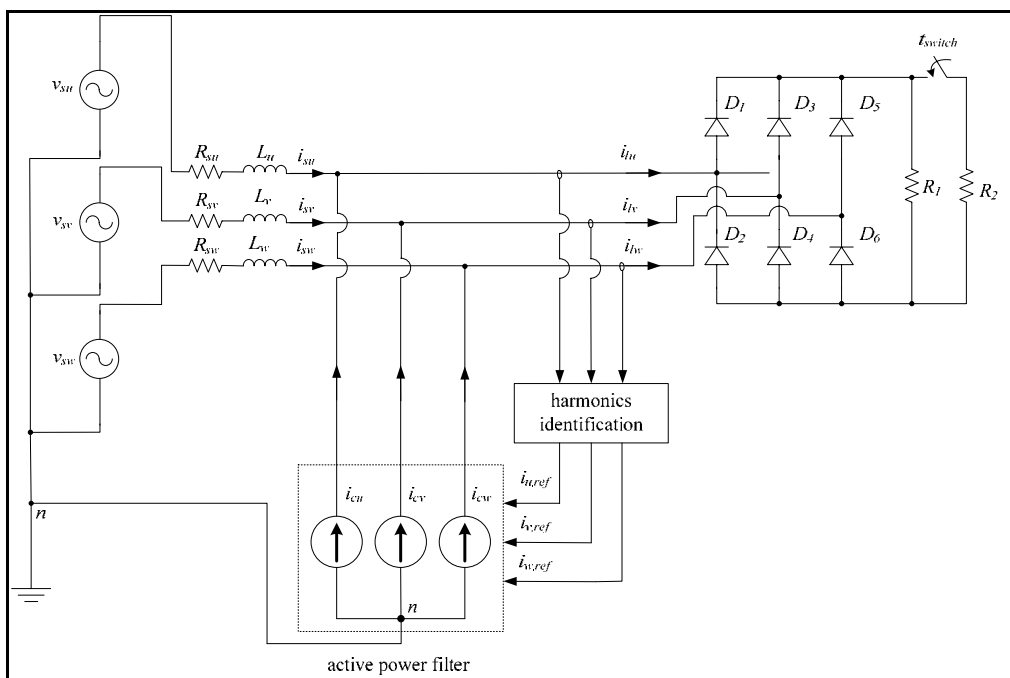
### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสำหรับจำลองสถานการณ์

#### 6.1 บทนำ

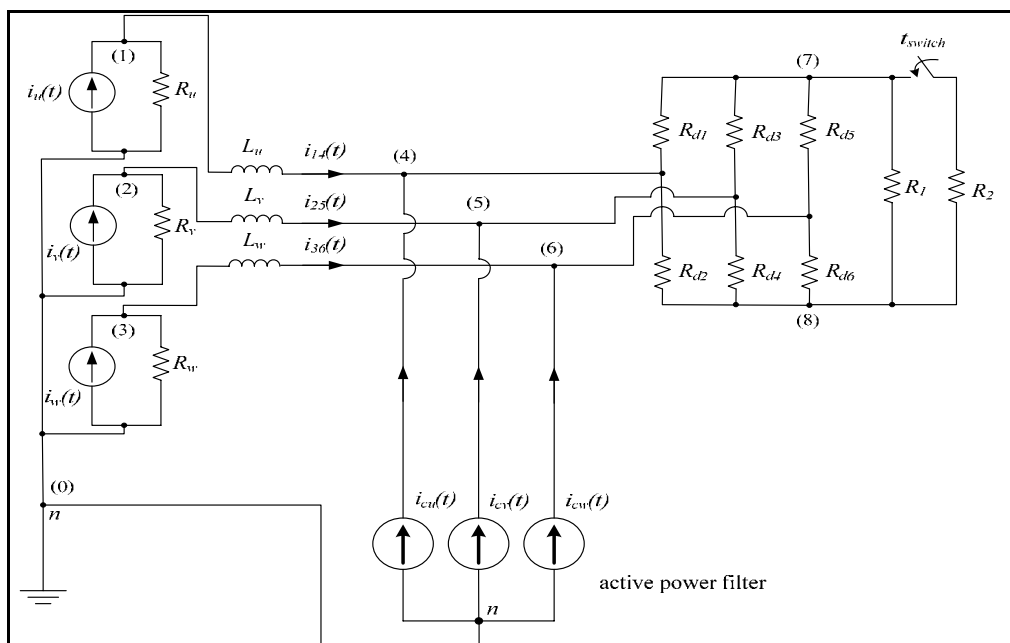
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสำหรับใช้ในการจำลองสถานการณ์ที่นำเสนอในบทนี้ มีทั้งหมด 4 ระบบด้วยกัน กล่าวคือ ระบบแรกมีวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว ระบบที่สองเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับโหลดความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ระบบที่สามเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และระบบสุดท้ายเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule) ในการคำนวณเชิงตัวเลข แบบจำลองเหล่านี้ได้นำไปใช้เพื่อการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก ดังมีผลการดำเนินงานในรายละเอียดได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 7

#### 6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว

โครงสร้างของระบบที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้ มีแผนภาพดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 ระบบดังแผนภาพเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับวงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอด โดยโหลดของวงจรเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว ในสถานะเริ่มต้นโหลดดังกล่าวมีค่าความต้านทาน  $R_1$  และที่เวลาเท่ากับ  $t_{switch}$  มีการสับโหลด  $R_2$  ต่อเพิ่มขนานกับ  $R_1$  ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงผลในสถานะชั่วคราวเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน นอกจากนี้ในรูปที่ 6.1 สังเกตได้ว่า แบบจำลองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ที่ฉีดกระแสชดเชย ( $i_{cu}, i_{cv}$  และ  $i_{cw}$ ) เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกในระบบ ค่าของกระแสชดเชยดังกล่าวได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก 5 วิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธี PQ วิธี DQ วิธี SD วิธี SWFA และวิธี DQF เหตุผลที่ใช้แบบจำลองของวงจรกรองเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ที่กำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ เพราะการดำเนินงานมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเท่านั้น โดยยัง



รูปที่ 6.1 โครงสร้างของระบบที่มีวงจรถ่ายกระแสต่อกับโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 6.2 แผนภาพวงจรไฟฟ้าของระบบที่มีวงจรถ่ายกระแสต่อกับโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว

ไม่พิจารณาด้านประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองในทางปฏิบัติ นอกจากนี้แบบจำลองของไดโอดสำหรับวงจรเรียงกระแสใช้เป็นตัวต้านทาน  $R_{d1}$  ถึง  $R_{d6}$  ในช่วงนำกระแสพิจารณาว่า  $R_{d1} = R_{d2} = R_{d3} = R_{d4} = R_{d5} = R_{d6} = 0.5 \Omega$  ส่วนในช่วงหยุดนำกระแส ได้กำหนดให้  $R_{d1} = R_{d2} = R_{d3} = R_{d4} = R_{d5} = R_{d6} = 160 \text{ k}\Omega \approx \infty \Omega$  นอกจากนี้ในรูปที่ 6.2 ได้ใช้หลักการแปลงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ให้เป็นแหล่งจ่ายกระแสเพื่อการวิเคราะห์แบบโนด จากรูปที่ 6.2 เมื่อใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในการพิจารณาโนดที่ (1) ถึงโนดที่ (8) จะได้สมการโนดดังสมการที่ (6-1) ถึง (6-8) ตามลำดับต่อไปนี้

$$\frac{v_1(t)}{R_u} + \frac{1}{L_u} \int_{t_0}^t [v_1(t) - v_4(t)] dt + i_{14}(t_0) = i_u(t) \quad (6-1)$$

$$\frac{v_2(t)}{R_v} + \frac{1}{L_v} \int_{t_0}^t [v_2(t) - v_5(t)] dt + i_{25}(t_0) = i_v(t) \quad (6-2)$$

$$\frac{v_3(t)}{R_w} + \frac{1}{L_w} \int_{t_0}^t [v_3(t) - v_6(t)] dt + i_{36}(t_0) = i_w(t) \quad (6-3)$$

$$\frac{1}{L_u} \int_{t_0}^t [v_4(t) - v_1(t)] dt + i_{41}(t_0) + \frac{v_4(t) - v_7(t)}{R_{d1}} + \frac{v_4(t) - v_8(t)}{R_{d2}} = i_{cu}(t) \quad (6-4)$$

$$\frac{1}{L_v} \int_{t_0}^t [v_5(t) - v_2(t)] dt + i_{52}(t_0) + \frac{v_5(t) - v_7(t)}{R_{d3}} + \frac{v_5(t) - v_8(t)}{R_{d4}} = i_{cv}(t) \quad (6-5)$$

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

$$-\frac{v_4(t)}{R_{d1}} - \frac{v_5(t)}{R_{d3}} - \frac{v_6(t)}{R_{d5}} + \left[ \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d5}} + \frac{1}{R(t)} \right] v_7(t) - \frac{v_8(t)}{R(t)} = 0 \quad (6-7)$$

$$-\frac{v_4(t)}{R_{d2}} - \frac{v_5(t)}{R_{d4}} - \frac{v_6(t)}{R_{d6}} - \frac{v_7(t)}{R(t)} + \left[ \frac{1}{R_{d2}} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{d6}} + \frac{1}{R(t)} \right] v_8(t) = 0 \quad (6-8)$$

จากสมการที่ (6-1) ถึง (6-8) 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 (6-7) และ (6-8) เป็นค่าความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับเวลาตามจังหวะการทำงานของสวิตช์ 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 จากการใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์พิจารณาที่โหนดต่าง ๆ 8 โหนด จะได้สมการทั้งหมด 8 สมการ ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (6-1) ถึง (6-8) ซึ่งสมการต่าง ๆ เหล่านี้อยู่ในโดเมนเวลาต่อเนื่อง (continuous time domain) โดยเฉพาะสมการที่ (6-1) ถึง (6-6) มีเทอมอินทิเกรตอยู่ในสมการ และเมื่อแปลงโดเมนเวลาต่อเนื่องไปเป็นโดเมนเวลาเต็มหน่วย (discrete time domain) และทำการประมาณค่าเทอมอินทิเกรตโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู สำหรับสมการที่ (6-1) ถึง (6-6) จะได้ผลการดำเนินงานเป็นสมการที่ (6-9) ถึง (6-14) ตามลำดับ

$$\begin{aligned} \left[ \frac{1}{R_u} + \frac{T}{2L_u} \right] v_1(kT) - \frac{T}{2L_u} v_4(kT) &= i_u(kT) - \frac{T}{2L_u} v_1(k-1)T \\ &+ \frac{T}{2L_u} v_4(k-1)T - i_{14}(k-1)T \end{aligned} \quad (6-9)$$

$$\begin{aligned} \left[ \frac{1}{R_v} + \frac{T}{2L_v} \right] v_2(kT) - \frac{T}{2L_v} v_5(kT) &= i_v(kT) - \frac{T}{2L_v} v_2(k-1)T \\ &+ \frac{T}{2L_v} v_5(k-1)T - i_{25}(k-1)T \end{aligned} \quad (6-10)$$

$$\begin{aligned} \left[ \frac{1}{R_w} + \frac{T}{2L_w} \right] v_3(kT) - \frac{T}{2L_w} v_6(kT) &= i_w(kT) - \frac{T}{2L_w} v_3(k-1)T \\ &+ \frac{T}{2L_w} v_6(k-1)T - i_{36}(k-1)T \end{aligned} \quad (6-11)$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{T}{2L_u} v_1(kT) + \left[ \frac{T}{2L_u} + \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d2}} \right] v_4(kT) - \frac{1}{R_{d1}} v_7(kT) \\
& - \frac{1}{R_{d2}} v_8(kT) = i_{cu}(kT) + \frac{T}{2L_u} v_1(k-1)T - \frac{T}{2L_u} v_4(k-1)T - i_{41}(k-1)T
\end{aligned} \tag{6-12}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{T}{2L_v} v_2(kT) + \left[ \frac{T}{2L_v} + \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d4}} \right] v_5(kT) - \frac{1}{R_{d3}} v_7(kT) \\
& - \frac{1}{R_{d4}} v_8(kT) = i_{cv}(kT) + \frac{T}{2L_v} v_2(k-1)T - \frac{T}{2L_v} v_5(k-1)T - i_{52}(k-1)T
\end{aligned} \tag{6-13}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{T}{2L_w} v_3(kT) + \left[ \frac{T}{2L_w} + \frac{1}{R_{d5}} + \frac{1}{R_{d6}} \right] v_6(kT) - \frac{1}{R_{d5}} v_7(kT) \\
& - \frac{1}{R_{d6}} v_8(kT) = i_{cw}(kT) + \frac{T}{2L_w} v_3(k-1)T - \frac{T}{2L_w} v_6(k-1)T - i_{63}(k-1)T
\end{aligned} \tag{6-14}$$

จากสมการที่ (6-9) ถึง (6-14) เป็นสมการที่ผ่านการประมาณเทอมอินทิเกรต โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู และผ่านการแปลงเป็นเชิงเลข (digitize) จากโดเมนเวลาต่อเนื่องดังสมการที่ (6-1) ถึง (6-6) เป็นโดเมนเวลาเต็มหน่วย โดยเปลี่ยนตัวแปร  $t$  ของสมการในโดเมนเวลาต่อเนื่องเป็น  $kT$  สำหรับสมการในโดเมนเวลาเต็มหน่วย ซึ่งค่า  $T$  คือ ขั้นตอนเวลาการจำลองผล (simulation time step) ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้  $T$  มีค่าเท่ากับ 100 ไมโครวินาที จากสมการที่ (6-7) ถึง (6-14) เมื่อจัดเทอมให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ จะได้ดังสมการที่ (6-15) จากสมการดังกล่าว  $\mathbf{x}_k$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าโนดต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ ซึ่งแสดงไว้ดังสมการที่ (6-16) เมื่อระบบที่พิจารณามี 8 โหนด  $\mathbf{x}_k$  จึงเป็นเวกเตอร์  $8 \times 1$  ส่วนค่าเมตริกซ์  $\mathbf{A}$  ในสมการที่ (6-15) เป็นเมตริกซ์จัตุรัสขนาด  $8 \times 8$  และเขียนแสดงตามการแบ่งส่วนดังสมการที่ (6-17) โดยค่า  $\mathbf{A}_1$ ,  $\mathbf{A}_2$ ,  $\mathbf{A}_3$  และ  $\mathbf{A}_4$  เป็นเมตริกซ์จัตุรัสขนาด  $4 \times 4$  ซึ่งมีรายละเอียดแสดงไว้ในสมการที่ (6-18) ถึง (6-21) ตามลำดับ ปริมาณ  $R(kT)$  ที่ปรากฏในสมการที่ (6-21) จะต้องพิจารณาเงื่อนไขของ  $R(t)$  ในโดเมนเวลาต่อเนื่อง ดังที่อธิบายผ่านมาแล้ว ส่วนค่า  $\mathbf{I}_k$  ที่เป็นเวกเตอร์  $8 \times 1$  แสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าโนดต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ แสดงไว้ดังสมการที่ (6-22) ส่วนค่าต่าง ๆ ในเวกเตอร์  $\mathbf{x}_{k-1}$  ซึ่งเป็นเวกเตอร์ขนาด  $8 \times 1$  แสดงไว้ดังสมการที่ (6-23) ค่าต่าง ๆ ในสมการดังกล่าว คือ แรงดันไฟฟ้าโนดต่าง ๆ ที่เป็นค่าใน

$$\mathbf{A}\mathbf{x}_k = \mathbf{I}_k - \mathbf{B}\mathbf{x}_{k-1} - \mathbf{C}_{k-1} \tag{6-15}$$

$$\mathbf{x}_k = [v_1(kT) \ v_2(kT) \ v_3(kT) \ v_4(kT) \ v_5(kT) \ v_6(kT) \ v_7(kT) \ v_8(kT)]^T \quad (6-16)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_3 & \mathbf{A}_4 \end{bmatrix} \quad (6-17)$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_u} + \frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & -\frac{T}{2L_u} \\ 0 & \frac{1}{R_v} + \frac{T}{2L_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_w} + \frac{T}{2L_w} & 0 \\ -\frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d2}} + \frac{T}{2L_u} \end{bmatrix} \quad (6-18)$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{T}{2L_v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T}{2L_w} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_{d1}} & -\frac{1}{R_{d2}} \end{bmatrix} \quad (6-19)$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{T}{2L_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{T}{2L_w} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_{d1}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_{d2}} \end{bmatrix} \quad (6-20)$$

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{T}{2L_v} & 0 & -\frac{1}{R_{d3}} & -\frac{1}{R_{d4}} \\ 0 & \frac{1}{R_{d5}} + \frac{1}{R_{d6}} + \frac{T}{2L_w} & -\frac{1}{R_{d5}} & -\frac{1}{R_{d6}} \\ -\frac{1}{R_{d3}} & -\frac{1}{R_{d5}} & \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d5}} + \frac{1}{R(kT)} & -\frac{1}{R(kT)} \\ -\frac{1}{R_{d4}} & -\frac{1}{R_{d6}} & -\frac{1}{R(kT)} & \frac{1}{R_{d2}} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{d6}} + \frac{1}{R(kT)} \end{bmatrix} \quad (6-21)$$

$$\mathbf{I}_k = [i_u(kT) \quad i_v(kT) \quad i_w(kT) \quad i_{cu}(kT) \quad i_{cv}(kT) \quad i_{cw}(kT) \quad 0 \quad 0]^T \quad (6-22)$$

$$\mathbf{x}_{k-1} = [v_1(k-1)T \quad v_2(k-1)T \quad v_3(k-1)T \quad v_4(k-1)T \quad v_5(k-1)T \quad v_6(k-1)T \quad v_7(k-1)T \quad v_8(k-1)T]^T \quad (6-23)$$

อดีตที่ได้จากการคำนวณในรอบการคำนวณก่อนหน้าหนึ่งรอบ ส่วนค่า  $\mathbf{B}$  และ  $\mathbf{C}_{k-1}$  ได้รับการนำเสนอไว้ในสมการที่ (6-24) และ (6-25) ตามลำดับ โดยเมตริกซ์  $\mathbf{B}$  เป็นเมตริกซ์จัตุรัสขนาด  $8 \times 8$  ส่วนเวกเตอร์  $\mathbf{C}_{k-1}$  เป็นเวกเตอร์ขนาด  $8 \times 1$

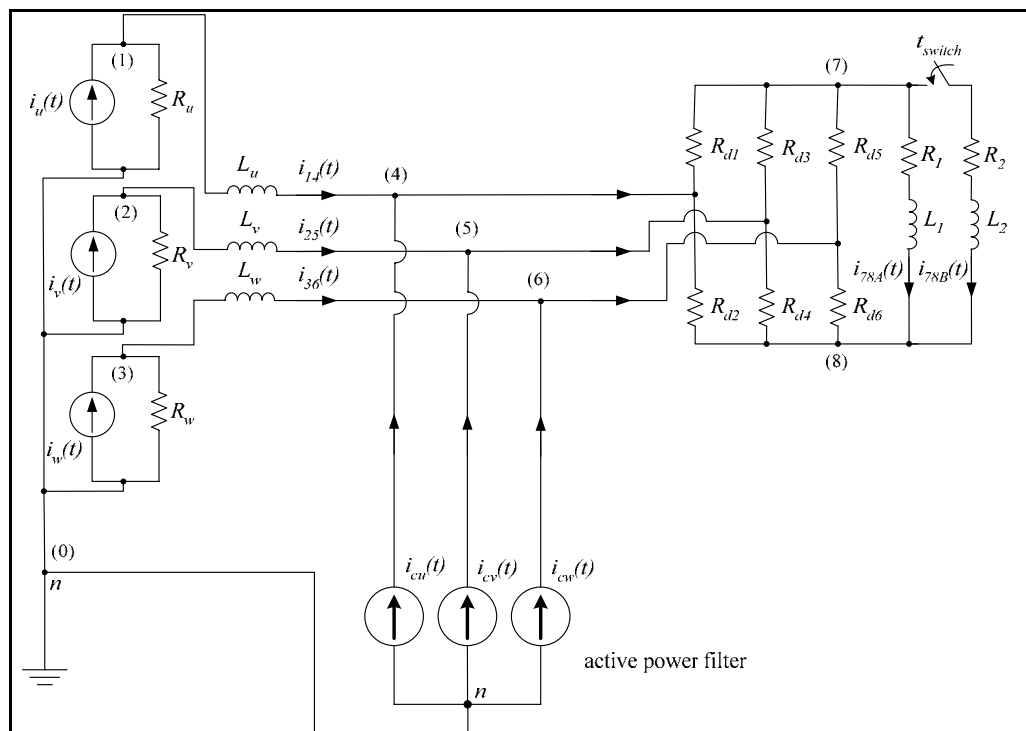
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & -\frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T}{2L_v} & 0 & 0 & -\frac{T}{2L_v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T}{2L_w} & 0 & 0 & -\frac{T}{2L_w} & 0 & 0 \\ -\frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & \frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T}{2L_v} & 0 & 0 & \frac{T}{2L_v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{T}{2L_w} & 0 & 0 & \frac{T}{2L_w} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6-24)$$

$$\mathbf{C}_{k-1} = [i_{14}(k-1)T \quad i_{25}(k-1)T \quad i_{36}(k-1)T \quad i_{41}(k-1)T \quad i_{52}(k-1)T \quad i_{63}(k-1)T \quad 0 \quad 0]^T \quad (6-25)$$

### 6.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับโหลดความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

โครงสร้างของระบบที่กล่าวถึงตามหัวข้อนี้ มีแผนภาพดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.3 วงจรเรียงกระแสมีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งในรูปได้แทนไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นความต้านทาน  $R_{d1}$  ถึง  $R_{d6}$  และที่เวลาเท่ากับ  $t_{switch}$  มีการสับโหลดความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำชุดที่สอง ( $R_2$  และ  $L_2$ ) ต่อเพิ่มขนานกับชุดที่หนึ่ง ( $R_1$  และ  $L_1$ ) ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงผลในสภาวะชั่วครู่เมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด การพิจารณาค่าความต้านทาน  $R_{d1}$  ถึง  $R_{d6}$  ที่ใช้แทนไดโอด พิจารณาเหมือนกับหัวข้อที่ 6.2 นอกจากนี้

ในรูปที่ 6.3 สังเกตได้ว่าการต่อเชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ของโนดที่ (1) ถึงโนดที่ (6) จะเหมือนกับการต่อในวงจรไฟฟ้าของระบบในรูปที่ 6.2 ทุกประการ เพราะฉะนั้นเมื่อใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในการพิจารณาโนดที่ (1) ถึงโนดที่ (6) สำหรับระบบในรูปที่ 6.3 จะได้สมการ โนดดังสมการที่ (6-1) ถึง (6-6) ซึ่งเหมือนกับการพิจารณาระบบในรูปที่ 6.2 แต่ข้อแตกต่างระหว่างระบบรูปที่ 6.2 และ 6.3 คือ ระหว่างโนดที่ (7) และ โนดที่ (8) ระบบในรูปที่ 6.2 มีความต้านทานเพียงอย่างเดียว แต่ในรูปที่



รูปที่ 6.3 แผนภาพวงจรไฟฟ้าของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสต่อกับโหลดความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

6.3 มีความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นเมื่อใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในการพิจารณาโนดที่ (7) และ โนดที่ (8) ของระบบรูปที่ 6.3 จะได้ดังสมการที่ (6-26) และ (6-27) ตามลำดับ ค่ากระแส  $i_{78B}(t)$  ในสมการดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 0 ในช่วงเวลา  $0 < t \leq t_{switch}$  วินาที สมการที่ (6-26) และ (6-27) เป็นสมการที่อยู่ในโดเมนเวลาต่อเนื่อง ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการแปลงเป็นเชิงเลขจะได้สมการในโดเมนเวลาเต็มหน่วยดังสมการที่ (6-28) และ (6-29) (ค่าต่าง ๆ ที่มีอักษร



$$\frac{v_7(t) - v_4(t)}{R_{d1}} + \frac{v_7(t) - v_5(t)}{R_{d3}} + \frac{v_7(t) - v_6(t)}{R_{d5}} + i_{78A}(t) + i_{78B}(t) = 0 \quad (6-26)$$

$$\frac{v_8(t) - v_4(t)}{R_{d2}} + \frac{v_8(t) - v_5(t)}{R_{d4}} + \frac{v_8(t) - v_6(t)}{R_{d6}} - i_{78A}(t) - i_{78B}(t) = 0 \quad (6-27)$$

$$\begin{aligned} \frac{v_7(kT) - v_4(kT)}{R_{d1}} + \frac{v_7(kT) - v_5(kT)}{R_{d3}} + \frac{v_7(kT) - v_6(kT)}{R_{d5}} \\ + i_{78A}(kT) + i_{78B}(kT) = 0 \end{aligned} \quad (6-28)$$

$$\begin{aligned} \frac{v_8(kT) - v_4(kT)}{R_{d2}} + \frac{v_8(kT) - v_5(kT)}{R_{d4}} + \frac{v_8(kT) - v_6(kT)}{R_{d6}} \\ - i_{78A}(kT) - i_{78B}(kT) = 0 \end{aligned} \quad (6-29)$$

$$\begin{aligned} i_{78A}(kT) = \frac{T}{R_1T + 2L_1} v_7(kT) - \frac{T}{R_1T + 2L_1} v_8(kT) \\ + \frac{2L_1}{R_1T + 2L_1} i_{78A}(k-1)T + \frac{T}{R_1T + 2L_1} v_{L1}(k-1)T \end{aligned} \quad (6-30)$$

$$\begin{aligned} i_{78B}(kT) = \frac{T}{R_2T + 2L_2} v_7(kT) - \frac{T}{R_2T + 2L_2} v_8(kT) \\ + \frac{2L_2}{R_2T + 2L_2} i_{78B}(k-1)T + \frac{T}{R_2T + 2L_2} v_{L2}(k-1)T \end{aligned} \quad (6-31)$$

$t$  จะเป็นสมการในเวลาต่อเนื่องแต่ถ้าปรากฏอักษร  $k$  และ  $T$  จะเป็นสมการในเวลาเต็มหน่วย) สมการที่ใช้ในการคำนวณค่ากระแส  $i_{78A}(kT)$  และ  $i_{78B}(kT)$  แสดงไว้ในสมการที่ (6-30) และ (6-31) ตามลำดับ  $v_{L1}(k-1)T$  และ  $v_{L2}(k-1)T$  คือ ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  และ  $L_2$  ในรอบการคำนวณก่อนหน้า (รายละเอียดที่มาของสมการที่ (6-30) และ (6-31) แสดงไว้ในภาคผนวก ก.) ปริมาณ  $i_{78B}(kT)$  ที่ปรากฏในสมการที่ (6-28) และ (6-29) จะต้องพิจารณาตามเงื่อนไขทางเวลา  $t_{switch}$  ของ  $i_{78B}(t)$  ดังที่อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้นี้ เมื่อนำ  $i_{78A}(kT)$  จากสมการที่ (6-30) และ  $i_{78B}(kT)$  จากสมการที่ (6-31) แทนลงในสมการที่ (6-28) และ (6-29) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6-32) และ (6-33) ซึ่งเป็นสมการสำหรับโนดที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$\begin{aligned}
& -\frac{v_4(kT)}{R_{d1}} - \frac{v_5(kT)}{R_{d3}} - \frac{v_6(kT)}{R_{d5}} \\
& + \left[ \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d5}} + \frac{T}{R_1T + 2L_1} + \frac{T}{R_2T + 2L_2} \right] v_7(kT) \\
& + \left[ -\frac{T}{R_1T + 2L_1} - \frac{T}{R_2T + 2L_2} \right] v_8(kT) + \frac{2L_1}{R_1T + 2L_1} i_{78A}(k-1)T \\
& + \frac{2L_2}{R_2T + 2L_2} i_{78B}(k-1)T + \frac{Tv_{L1}(k-1)T}{R_1T + 2L_1} + \frac{Tv_{L2}(k-1)T}{R_2T + 2L_2} = 0
\end{aligned} \tag{6-32}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{v_4(kT)}{R_{d2}} - \frac{v_5(kT)}{R_{d4}} - \frac{v_6(kT)}{R_{d6}} + \left[ -\frac{T}{R_1T + 2L_1} - \frac{T}{R_2T + 2L_2} \right] v_7(kT) \\
& + \left[ \frac{1}{R_{d2}} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{d6}} + \frac{T}{R_1T + 2L_1} + \frac{T}{R_2T + 2L_2} \right] v_8(kT) \\
& - \frac{2L_1}{R_1T + 2L_1} i_{78A}(k-1)T - \frac{2L_2}{R_2T + 2L_2} i_{78B}(k-1)T \\
& - \frac{Tv_{L1}(k-1)T}{R_1T + 2L_1} - \frac{Tv_{L2}(k-1)T}{R_2T + 2L_2} = 0
\end{aligned} \tag{6-33}$$

การวิเคราะห์หาสมการที่โนดต่าง ๆ สำหรับระบบตามแผนภาพวงจรในรูปที่ 6.3 จะได้ว่าสมการสำหรับโนดที่ (1) ถึง โหนดที่ (6) ปรากฏดังสมการที่ (6-9) ถึง (6-14) ในหัวข้อที่ 6.2 ส่วนสมการสำหรับโนดที่ (7) และ โหนดที่ (8) เป็นสมการที่ (6-32) และ (6-33) ตามลำดับ สมการต่าง ๆ ดังกล่าวอาจจัดในรูปสมการเมตริกซ์ดังสมการที่ (6-34) ซึ่ง  $\mathbf{x}_k$  เป็นเวกเตอร์แรงดัน แสดงไว้ดังสมการที่ (6-16) เมตริกซ์  $\mathbf{A}$  ในสมการที่ (6-34) เป็นเมตริกซ์จัตุรัสขนาด  $8 \times 8$  มีการแบ่งส่วนดังสมการที่ (6-17) โดยค่า  $\mathbf{A}_1$ ,  $\mathbf{A}_2$ ,  $\mathbf{A}_3$  และ  $\mathbf{A}_4$  เป็นเมตริกซ์จัตุรัสขนาด  $4 \times 4$  ซึ่งมีรายละเอียดแสดงไว้ในสมการที่ (6-35) ถึง (6-38) ตามลำดับ ส่วนค่า  $\mathbf{I}_k$ ,  $\mathbf{x}_{k-1}$  และ  $\mathbf{B}$  แสดงไว้ดังสมการที่ (6-22), (6-23) และ (6-24) ตามลำดับ ส่วนค่า  $\mathbf{C}_{k-1}$  และ  $\mathbf{D}_{k-1}$  แสดงไว้ในสมการที่ (6-39) และ (6-40) ตามลำดับ

$$\mathbf{Ax}_k = \mathbf{I}_k - \mathbf{Bx}_{k-1} - \mathbf{C}_{k-1} - \mathbf{D}_{k-1} \tag{6-34}$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_u} + \frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & -\frac{T}{2L_u} \\ 0 & \frac{1}{R_v} + \frac{T}{2L_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_w} + \frac{T}{2L_w} & 0 \\ -\frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d2}} + \frac{T}{2L_u} \end{bmatrix} \quad (6-35)$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{T}{2L_v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T}{2L_w} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_{d1}} & -\frac{1}{R_{d2}} \end{bmatrix} \quad (6-36)$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{T}{2L_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{T}{2L_w} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_{d1}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_{d2}} \end{bmatrix} \quad (6-37)$$

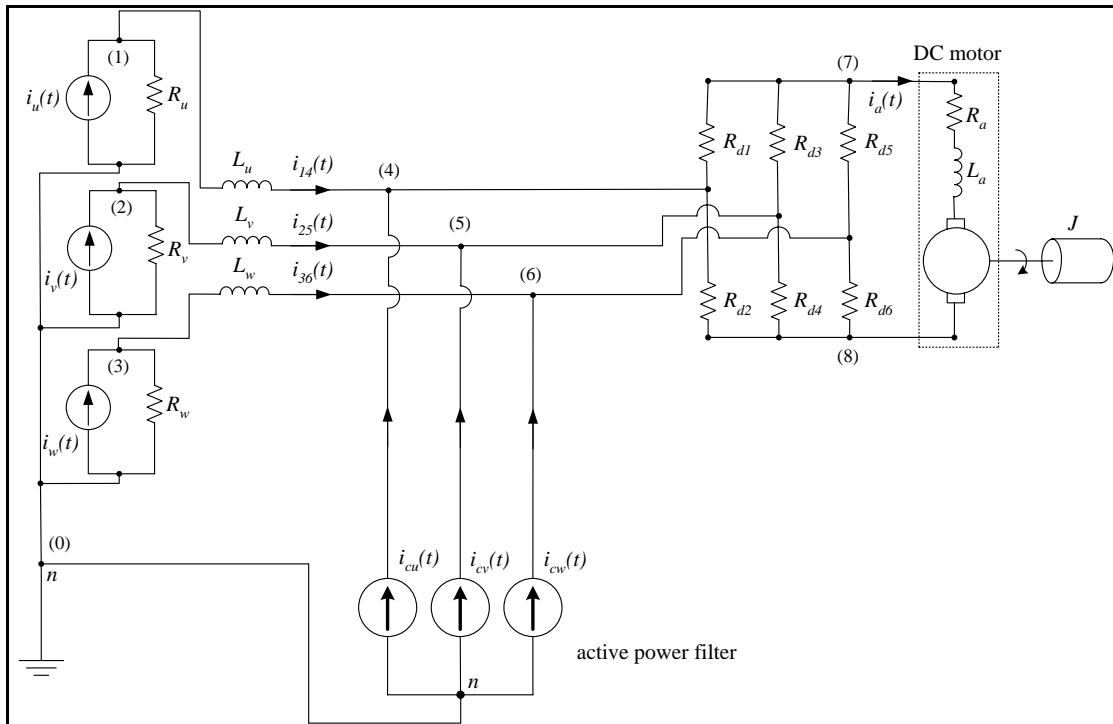
$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{T}{2L_v} & 0 & -\frac{1}{R_{d3}} & -\frac{1}{R_{d4}} \\ 0 & \frac{1}{R_{d5}} + \frac{1}{R_{d6}} + \frac{T}{2L_w} & \frac{1}{R_{d5}} & \frac{1}{R_{d6}} \\ -\frac{1}{R_{d3}} & -\frac{1}{R_{d5}} & \frac{1}{R_{d3}} & \frac{1}{R_{d5}} \\ -\frac{1}{R_{d4}} & -\frac{1}{R_{d6}} & \frac{1}{R_{d4}} & \frac{1}{R_{d6}} \\ \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d5}} + \frac{T}{R_1T + 2L_1} + \frac{T}{R_2T + 2L_2} & -\frac{T}{R_1T + 2L_1} - \frac{T}{R_2T + 2L_2} & -\frac{1}{R_{d1}} & -\frac{1}{R_{d3}} \\ \frac{1}{R_{d2}} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{d6}} + \frac{T}{R_1T + 2L_1} + \frac{T}{R_2T + 2L_2} & -\frac{T}{R_1T + 2L_1} - \frac{T}{R_2T + 2L_2} & -\frac{1}{R_{d2}} & -\frac{1}{R_{d4}} \end{bmatrix} \quad (6-38)$$

$$\mathbf{C}_{k-1} = \begin{bmatrix} i_{14}(k-1)T \\ i_{25}(k-1)T \\ i_{36}(k-1)T \\ i_{41}(k-1)T \\ i_{52}(k-1)T \\ i_{63}(k-1)T \\ \frac{2L_1 \cdot i_{78A}(k-1)T}{2L_1 + R_1T} + \frac{2L_2 \cdot i_{78B}(k-1)T}{2L_2 + R_2T} \\ \frac{2L_1 \cdot i_{78A}(k-1)T}{2L_1 + R_1T} - \frac{2L_2 \cdot i_{78B}(k-1)T}{2L_2 + R_2T} \end{bmatrix} \quad (6-39)$$

$$\mathbf{D}_{k-1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{T_{V_{L1}}(k-1)T}{2L_1 + R_1T} + \frac{T_{V_{L2}}(k-1)T}{2L_2 + R_2T} \\ \frac{T_{V_{L1}}(k-1)T}{2L_1 + R_1T} - \frac{T_{V_{L2}}(k-1)T}{2L_2 + R_2T} \end{bmatrix} \quad (6-40)$$

#### 6.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีวงจรรีจกระแสดสามเฟสจ่ายกระแสให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้มีแผนภาพทางวงจรไฟฟ้า แสดงไว้ในรูปที่ 6.4 ระบบนี้มีความแตกต่างไปจากระบบในรูปที่ 6.2 และ 6.3 คือ โหลดของวงจรรีจกระแสดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อระหว่างโนดที่ (7) และ โหนดที่ (8) แต่การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในโนดที่ (1) ถึง โหนดที่ (6) จะเหมือนกับระบบในรูปที่ 6.2 และ 6.3 ทุกประการ ดังนั้นสมการที่ได้จากการใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับ โหนดที่ (1) ถึง โหนดที่ (6) จะเหมือนกับระบบก่อนหน้า ที่แสดงไว้ในสมการที่ (6-9) ถึง (6-14) ที่เป็นสมการในโดเมนเวลาเต็มหน่วย แต่สำหรับ โหนดที่ (7) และ โหนดที่ (8) ในระบบรูปที่ 6.4 เมื่อพิจารณาโดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6-40) และ (6-41) ตามลำดับ ค่ากระแส  $i_a(t)$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และจากสมการในโดเมนเวลาต่อเนื่อง ดังสมการที่ (6-40) และ (6-41) เมื่อดำเนินการแปลงเป็นเชิงเลข จะได้สมการในโดเมนเวลาเต็มหน่วยดังสมการที่ (6-42) และ (6-43) ตามลำดับ



รูปที่ 6.4 แผนภาพวงจรไฟฟ้าแทนระบบที่มีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อเป็นโหลดของ  
วงจรเรียงกระแสสามเฟส

$$\frac{v_7(t) - v_4(t)}{R_{d1}} + \frac{v_7(t) - v_5(t)}{R_{d3}} + \frac{v_7(t) - v_6(t)}{R_{d5}} + i_a(t) = 0 \quad (6-40)$$

$$\frac{v_8(t) - v_4(t)}{R_{d2}} + \frac{v_8(t) - v_5(t)}{R_{d4}} + \frac{v_8(t) - v_6(t)}{R_{d6}} - i_a(t) = 0 \quad (6-41)$$

$$\frac{v_7(kT) - v_4(kT)}{R_{d1}} + \frac{v_7(kT) - v_5(kT)}{R_{d3}} + \frac{v_7(kT) - v_6(kT)}{R_{d5}} + i_a(kT) = 0 \quad (6-42)$$

$$\frac{v_8(kT) - v_4(kT)}{R_{d2}} + \frac{v_8(kT) - v_5(kT)}{R_{d4}} + \frac{v_8(kT) - v_6(kT)}{R_{d6}} - i_a(kT) = 0 \quad (6-43)$$

ค่า  $i_a(kT)$  ที่ปรากฏอยู่ในสมการที่ (6-42) และ (6-43) คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6-44) (รายละเอียดที่มาของสมการที่ (6-44) แสดงไว้ในภาคผนวก ข.) และเมื่อแทนค่า  $i_a(kT)$  ลงในสมการที่ (6-42) และ (6-43) จะได้

ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6-45) และ (6-46) ตามลำดับ ค่า  $v_{La}(k-1)T$  ในสมการดังกล่าว คือ ค่าแรงดันตกคร่อมขดลวดอาร์เมเจอร์ในรอบการคำนวณก่อนหน้า

$$i_a(kT) = \frac{T}{R_a T + 2L_a} v_7(kT) - \frac{T}{R_a T + 2L_a} v_8(kT) + \frac{2L_a}{R_a T + 2L_a} i_a(k-1)T + \frac{T}{R_a T + 2L_a} v_{La}(k-1)T - \frac{k_b T}{R_a T + 2L_a} \omega_m(kT) \quad (6-44)$$

$$- \frac{v_4(kT)}{R_{d1}} - \frac{v_5(kT)}{R_{d3}} - \frac{v_6(kT)}{R_{d5}} + \left[ \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d5}} + \frac{T}{2L_a + R_a T} \right] v_7(kT) - \frac{T}{2L_a + R_a T} v_8(kT) + \frac{T}{2L_a + R_a T} v_{La}(k-1)T - \frac{k_b T}{2L_a + R_a T} \omega_m(kT) = - \frac{2L_a}{2L_a + R_a T} i_a(k-1)T \quad (6-45)$$

$$- \frac{v_4(kT)}{R_{d2}} - \frac{v_5(kT)}{R_{d4}} - \frac{v_6(kT)}{R_{d6}} - \frac{T}{2L_a + R_a T} v_7(kT) + \left[ \frac{1}{R_{d2}} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{d6}} + \frac{T}{2L_a + R_a T} \right] v_8(kT) - \frac{T}{2L_a + R_a T} v_{La}(k-1)T + \frac{k_b T}{2L_a + R_a T} \omega_m(kT) = \frac{2L_a}{2L_a + R_a T} i_a(k-1)T \quad (6-46)$$

$\omega_m(kT)$  ที่ปรากฏในสมการต่าง ๆ ที่ผ่านมา หมายถึง ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ที่เวลาใด ๆ (เรเดียน/วินาที) ค่า  $\omega_m(kT)$  นี้สามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการที่ (6-47) ค่า  $\alpha(k-1)T$  ในสมการ คือ ความเร่งเชิงมุมของมอเตอร์ในรอบการคำนวณก่อนหน้า (รายละเอียดที่มาของสมการที่ (6-47) แสดงไว้ในภาคผนวก ข.) นอกจากนี้ในสมการที่ (6-44) และ (6-45) ค่า  $k_b$  คือ ค่าคงที่ของแรงดัน (นิวตัน×เมตร/แอมแปร์)  $R_a$  คือ ค่าความต้านทานที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (โอห์ม)  $L_a$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (เฮนรี) ส่วนในสมการที่ (6-47) ค่า  $J_m$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (กิโลกรัม×เมตร<sup>2</sup>)  $B_m$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเชิงความหนืดของมอเตอร์ (นิวตัน×เมตร×วินาที/เรเดียน)  $k_t$  คือ ค่าคงที่ของแรงบิด (นิวตัน×เมตร/แอมแปร์) ส่วนค่า  $T_L(kT)$  คือ แรงบิดของโหลดที่เวลาใด ๆ (นิวตัน×เมตร)

$$\begin{aligned} \omega_m(kT) = & \frac{k_i T}{2J_m + B_m T} i_a(k-1)T - \frac{T}{2J_m + B_m T} T_L(kT) \\ & + \frac{2J_m}{2J_m + B_m T} \omega_m(k-1)T + \frac{J_m T}{2J_m + B_m T} \alpha(k-1)T \end{aligned} \quad (6-47)$$

การวิเคราะห์หาสมการที่โนดต่าง ๆ ในแผนภาพตามรูปที่ 6.4 จะได้ว่า สมการสำหรับโนดที่ (1) ถึงโนดที่ (6) เหมือนกันทุกประการกับสมการที่ (6-9) ถึง (6-14) ในหัวข้อที่ 6.2 ตามลำดับ ส่วนสมการสำหรับโนดที่ (7) และโนดที่ (8) เป็นดังสมการที่ (6-45) และ (6-46) ตามลำดับ จากสมการโนดต่าง ๆ เราสามารถจัดรูปให้เป็นสมการเมตริกซ์ดังสมการที่ (6-48) ซึ่ง  $\mathbf{x}_k$  เป็นเวกเตอร์  $9 \times 1$  แสดงไว้ดังสมการที่ (6-49) จากสมการที่ (6-49) สังเกตได้ว่ามีตัวแปร  $\omega_m(kT)$  เพิ่มขึ้นหนึ่ง

$$\mathbf{A}\mathbf{x}_k = \mathbf{I}_k - \mathbf{B}\mathbf{x}_{k-1} - \mathbf{C}_{k-1} - \mathbf{D}_k - \mathbf{E}_{k-1} \quad (6-48)$$

$$\mathbf{x}_k = [v_1(kT) \ v_2(kT) \ v_3(kT) \ v_4(kT) \ v_5(kT) \ v_6(kT) \ v_7(kT) \ v_8(kT) \ \omega_m(kT)]^T \quad (6-49)$$

ตัวเมื่อเทียบกับตัวแปรในหัวข้อที่ 6.2 และ 6.3 ส่วนเมตริกซ์  $\mathbf{A}$  ในสมการที่ (6-48) เป็นเมตริกซ์จัตุรัสขนาด  $9 \times 9$  และเขียนแสดงตามการแบ่งส่วนได้ดังสมการที่ (6-50) โดยที่  $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \mathbf{A}_4, \mathbf{A}_5, \mathbf{A}_6, \mathbf{A}_7, \mathbf{A}_8$  และ  $\mathbf{A}_9$  เป็นเมตริกซ์จัตุรัสขนาด  $3 \times 3$  ซึ่งรายละเอียดแสดงไว้ในสมการที่ (6-51) ถึง (6-57) ตามลำดับ พจน์  $\mathbf{I}_k$  ในสมการที่ (6-48) เป็นเวกเตอร์  $9 \times 1$  ดังสมการที่ (6-58) เวกเตอร์  $\mathbf{x}_{k-1}$  เป็นเวกเตอร์  $9 \times 1$  เช่นเดียวกัน และเขียนแสดงตามการแบ่งส่วนได้ดังสมการที่ (6-59) ซึ่งมี  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  และ  $\mathbf{x}_3$  เป็นเวกเตอร์  $3 \times 1$  ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในสมการที่ (6-60) ถึง (6-62)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_3 \\ \mathbf{A}_4 & \mathbf{A}_5 & \mathbf{A}_6 \\ \mathbf{A}_7 & \mathbf{A}_8 & \mathbf{A}_9 \end{bmatrix} \quad (6-50)$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_u} + \frac{T}{2L_u} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_v} + \frac{T}{2L_v} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_w} + \frac{T}{2L_w} \end{bmatrix} \quad (6-51)$$

$$\mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} -\frac{T}{2L_u} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T}{2L_v} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{T}{2L_w} \end{bmatrix} \quad (6-52)$$

$$\mathbf{A}_3 = \mathbf{A}_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6-53)$$

$$\mathbf{A}_5 = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d2}} + \frac{T}{2L_u} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{T}{2L_v} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{d5}} + \frac{1}{R_{d6}} + \frac{T}{2L_w} \end{bmatrix} \quad (6-54)$$

$$\mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_{d1}} & -\frac{1}{R_{d2}} & 0 \\ -\frac{1}{R_{d3}} & -\frac{1}{R_{d4}} & 0 \\ -\frac{1}{R_{d5}} & -\frac{1}{R_{d6}} & 0 \end{bmatrix} \quad (6-55)$$

$$\mathbf{A}_8 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_{d1}} & -\frac{1}{R_{d3}} & -\frac{1}{R_{d5}} \\ -\frac{1}{R_{d2}} & -\frac{1}{R_{d4}} & -\frac{1}{R_{d6}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6-56)$$





ส่วนจะได้ดังสมการที่ (6-64) โดยที่ค่า  $\mathbf{C}_1$ ,  $\mathbf{C}_2$  และ  $\mathbf{C}_3$  เป็นเวกเตอร์  $3 \times 1$  ที่ได้รับการแสดงไว้ดังสมการที่ (6-65) ถึง (6-67) ตามลำดับ ส่วนเวกเตอร์  $\mathbf{D}_k$  และ  $\mathbf{E}_{k-1}$  ในสมการที่ (6-48) เป็นเวกเตอร์  $9 \times 1$  ซึ่งแสดงไว้ดังสมการที่ (6-68) และ (6-69) ตามลำดับ

$$\mathbf{C}_{k-1} = [\mathbf{C}_1 \parallel \mathbf{C}_2 \parallel \mathbf{C}_3]^T \quad (6-64)$$

$$\mathbf{C}_1 = [i_{14}(k-1)T \quad i_{25}(k-1)T \quad i_{36}(k-1)T] \quad (6-65)$$

$$\mathbf{C}_2 = [i_{41}(k-1)T \quad i_{52}(k-1)T \quad i_{63}(k-1)T] \quad (6-66)$$

$$\mathbf{C}_3 = \left[ \frac{2L_a i_a(k-1)T}{2L_a + R_a T} \quad -\frac{2L_a i_a(k-1)T}{2L_a + R_a T} \quad -k_t T \cdot i_a(k-1)T \right] \quad (6-67)$$

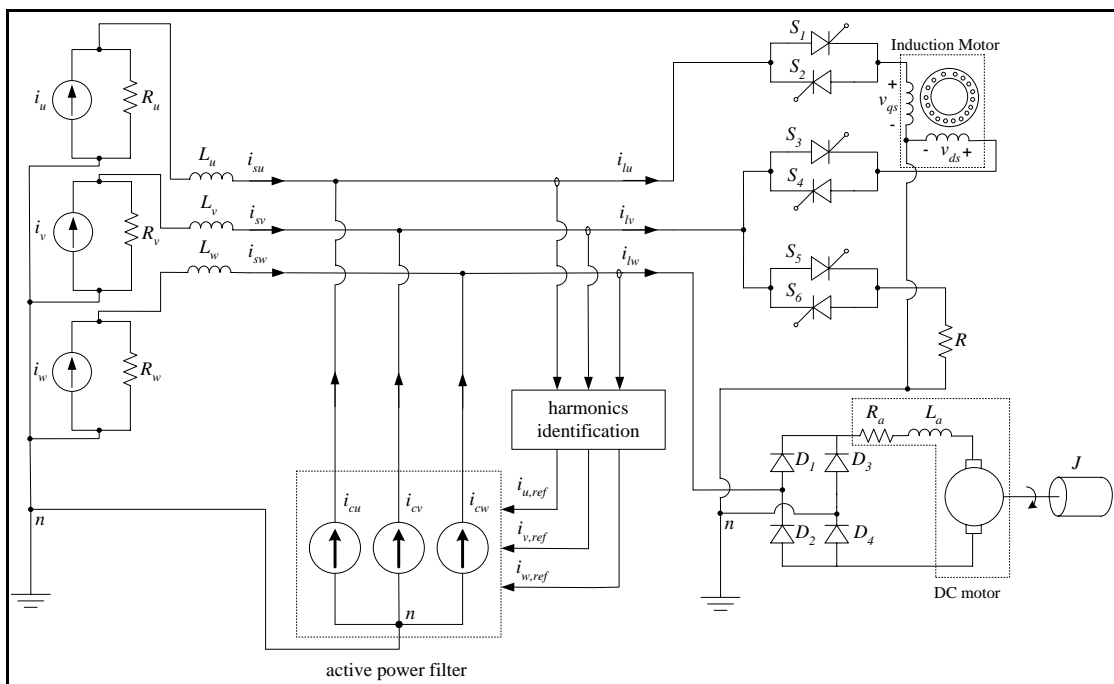
$$\mathbf{D}_k = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad T \cdot T_L(kT)]^T \quad (6-68)$$

$$\mathbf{E}_{k-1} = \left[ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{Tv_{La}(k-1)T}{2L_a + R_a T} \quad -\frac{Tv_{La}(k-1)T}{2L_a + R_a T} \quad -TJ_m \alpha(k-1)T \right] \quad (6-69)$$

## 6.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

ระบบไฟฟ้าในทางปฏิบัติอาจอยู่ในสภาวะไม่สมดุลจากการต่อโหลดได้บ้าง ดังนั้น การศึกษาวิเคราะห์เกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกภายใต้สภาวะดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ในเชิงวิชา วิชาการต่องานภาคปฏิบัติ จึงได้พิจารณาระบบสามเฟสไม่สมดุลดังแผนภาพในรูปที่ 6.5 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าในเฟส u และเฟส v มีการต่อกับเอสซีอาร์ที่ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยที่ เอสซีอาร์  $S_1$  และ  $S_2$  ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าสแตเตอร์บนแกน  $q(v_{qs})$  ในขณะที่ เอสซีอาร์  $S_3$  และ  $S_4$  ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าสแตเตอร์บนแกน  $d(v_{ds})$  งานวิจัยวิทยานิพนธ์ นี้กำหนดให้มุมจุดชนวนเกทของเอสซีอาร์  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  และ  $S_4$  มีค่าเท่ากับ 20 องศา นอกจากนี้เฟส

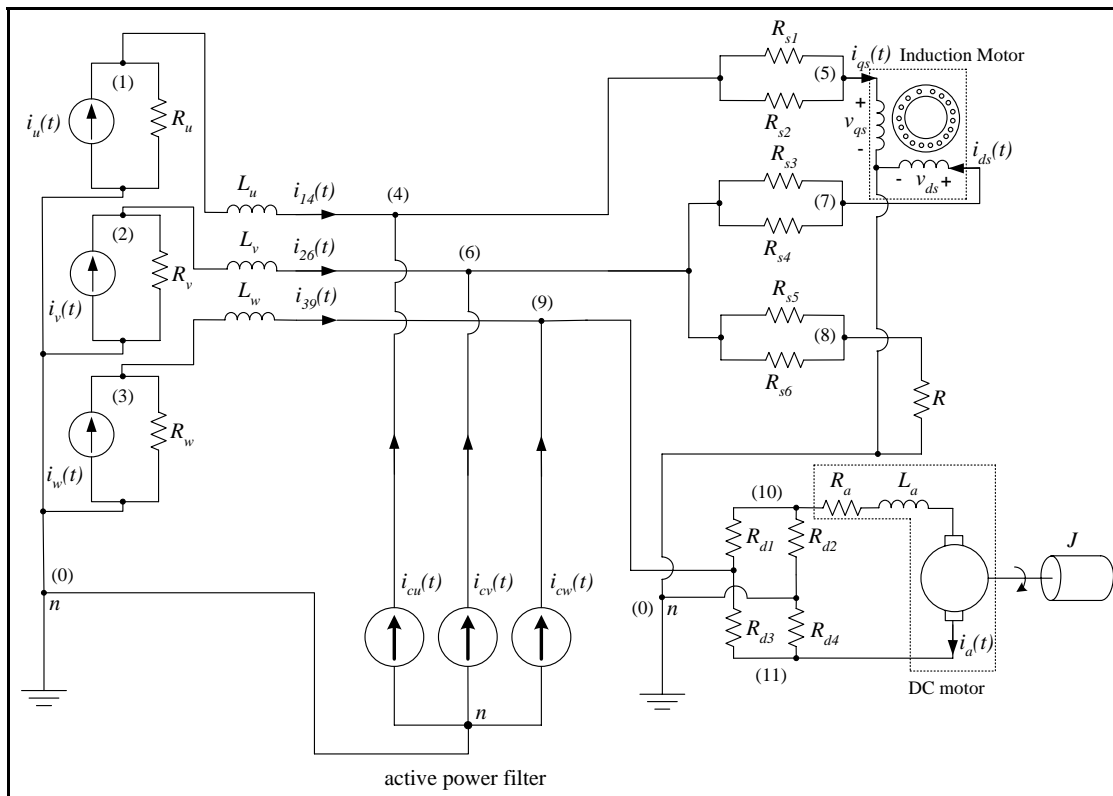
$v$  ยังต่อกับเอสซีอาร์  $S_5$  และ  $S_6$  ที่ควบคุมความสว่างของหลอดไฟที่แทนด้วยความต้านทาน  $R = 50 \Omega$  โดยมีมุมจุดชนวนเกทของเอสซีอาร์  $S_5$  และ  $S_6$  กำหนดไว้ที่ 60 องศา ส่วนโหลดในเฟส  $w$  เป็นวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบเต็มคลื่นที่ใช้ไดโอดเพื่อขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การพิจารณาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังรูปที่ 6.5 ได้แทนเอสซีอาร์  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  และ  $S_6$  ด้วยความต้านทาน  $R_{s1}$  ถึง  $R_{s6}$  ตามลำดับ ดังที่แสดงไว้ด้วยแผนภาพวงจรในรูปที่ 6.6 โดยในช่วงนำกระแสพิจารณาว่า  $R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = R_{s4} = R_{s5} = R_{s6} = 0.5 \Omega$  และในช่วงหยุด



รูปที่ 6.5 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

นำกระแสได้กำหนดให้  $R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = R_{s4} = R_{s5} = R_{s6} = 160 \text{ k}\Omega \approx \infty \Omega$  ส่วนไดโอด  $D_1, D_2, D_3$  และ  $D_4$  ในรูปที่ 6.5 ถูกแทนด้วยความต้านทาน  $R_{d1}$  ถึง  $R_{d6}$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 6.6 โดยในช่วงนำกระแสกำหนดให้ค่าความต้านทานดังกล่าวมีค่าเท่ากับ  $0.5 \Omega$  เช่นเดียวกับเอสซีอาร์ และในช่วงหยุดนำกระแสกำหนดให้ค่าความต้านทานดังกล่าวมีค่าเท่ากับ  $160 \text{ k}\Omega$  เช่นเดียวกันจากรูปที่ 6.6 เมื่อใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟในการพิจารณาโนดที่ (1) ถึง โนดที่ (11) สามารถสร้างสมการโนดได้ดังสมการที่ (6-70) ถึง (6-80) ตามลำดับต่อไปนี้

$$\frac{v_1(t)}{R_u} + \frac{1}{L_u} \int_{t_0}^t [v_1(t) - v_4(t)] dt + i_{14}(t_0) = i_u(t) \quad (6-70)$$



รูปที่ 6.6 แผนภาพทางวงจรไฟฟ้าระบบสามเฟสมีโหลดไม่สมดุลในแต่ละเฟส

$$\frac{v_2(t)}{R_v} + \frac{1}{L_v} \int_{t_0}^t [v_2(t) - v_6(t)] dt + i_{26}(t_0) = i_v(t) \quad (6-71)$$

$$\frac{v_3(t)}{R_w} + \frac{1}{L_w} \int_{t_0}^t [v_3(t) - v_9(t)] dt + i_{39}(t_0) = i_w(t) \quad (6-72)$$

$$\frac{1}{L_u} \int_{t_0}^t [v_4(t) - v_1(t)] dt + i_{41}(t_0) + \frac{v_4(t) - v_5(t)}{R_{s1}} + \frac{v_4(t) - v_5(t)}{R_{s2}} = i_{cu}(t) \quad (6-73)$$

$$\frac{v_5(t) - v_4(t)}{R_{s1}} + \frac{v_5(t) - v_4(t)}{R_{s2}} + i_{qs}(t) = 0 \quad (6-74)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{L_v} \int_{t_0}^t [v_6(t) - v_2(t)] dt + i_{62}(t_0) + \frac{v_6(t) - v_7(t)}{R_{s3}} \\ + \frac{v_6(t) - v_7(t)}{R_{s4}} + \frac{v_6(t) - v_8(t)}{R_{s5}} + \frac{v_6(t) - v_8(t)}{R_{s6}} = i_{cv}(t) \end{aligned} \quad (6-75)$$

$$\frac{v_7(t) - v_6(t)}{R_{s3}} + \frac{v_7(t) - v_6(t)}{R_{s4}} + i_{ds}(t) = 0 \quad (6-76)$$

$$\frac{v_8(t) - v_6(t)}{R_{s5}} + \frac{v_8(t) - v_6(t)}{R_{s6}} + \frac{v_8(t)}{R} = 0 \quad (6-77)$$

$$\frac{1}{L_w} \int_{t_0}^t [v_9(t) - v_3(t)] dt + i_{93}(t_0) + \frac{v_9(t) - v_{10}(t)}{R_{d1}} + \frac{v_9(t) - v_{11}(t)}{R_{d3}} = i_{cw}(t) \quad (6-78)$$

$$\frac{v_{10}(t) - v_9(t)}{R_{d1}} + \frac{v_{10}(t)}{R_{d2}} + i_a(t) = 0 \quad (6-79)$$

$$\frac{v_{11}(t) - v_9(t)}{R_{d3}} + \frac{v_{11}(t)}{R_{d4}} - i_a(t) = 0 \quad (6-80)$$

สมการที่ (6-70) ถึง (6-80) เป็นสมการในโดเมนเวลาต่อเนื่อง และในสมการที่ (6-70), (6-71), (6-72), (6-73), (6-75) และ (6-78) มีเทอมอินทิเกรตปรากฏอยู่ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูในการประมาณเทอมอินทิเกรต ซึ่งหลังการประมาณเทอมอินทิเกรตด้วยเทคนิคดังกล่าว รวมถึงดำเนินการแปลงเป็นเชิงเลข สมการที่ (6-70) ถึง (6-80) ที่อยู่ในโดเมนเวลาต่อเนื่อง จะเปลี่ยนเป็นสมการที่อยู่ในโดเมนเวลาเต็มหน่วย ดังสมการที่ (6-81) ถึง (6-91) ตามลำดับ กรณีพจน์  $i_a(t)$  ที่แปลงไปเป็น  $i_a(kT)$  และ  $\omega_m(t)$  ที่แปลงไปเป็น  $\omega_m(kT)$  มีรายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ข. และในกรณีพจน์  $i_{qs}(t)$  และ  $i_{ds}(t)$  ในสมการที่ (6-74) และ (6-76) ที่แปลงไปเป็น  $i_{qs}(kT)$  และ  $i_{ds}(kT)$  ในโดเมนเวลาเต็มหน่วย อาศัยการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ที่อ้างอิงจากงานวิจัยในอดีต (Naewngerndee, Sukcharoen and Kulworawanichpong, 2006) ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวได้รับการทบทวนไว้ในภาคผนวก ค.

$$\begin{aligned} \left[ \frac{1}{R_u} + \frac{T}{2L_u} \right] v_1(kT) - \frac{T}{2L_u} v_4(kT) &= i_u(kT) - \frac{T}{2L_u} v_1(k-1)T \\ &+ \frac{T}{2L_u} v_4(k-1)T - i_{14}(k-1)T \end{aligned} \quad (6-81)$$

$$\begin{aligned} \left[ \frac{1}{R_v} + \frac{T}{2L_v} \right] v_2(kT) - \frac{T}{2L_v} v_6(kT) &= i_v(kT) - \frac{T}{2L_v} v_2(k-1)T \\ &+ \frac{T}{2L_v} v_6(k-1)T - i_{26}(k-1)T \end{aligned} \quad (6-82)$$

$$\begin{aligned} \left[ \frac{1}{R_w} + \frac{T}{2L_w} \right] v_3(kT) - \frac{T}{2L_w} v_9(kT) &= i_w(kT) - \frac{T}{2L_w} v_3(k-1)T \\ &+ \frac{T}{2L_w} v_9(k-1)T - i_{39}(k-1)T \end{aligned} \quad (6-83)$$

$$\begin{aligned} -\frac{T}{2L_u} v_1(kT) + \left[ \frac{T}{2L_u} + \frac{1}{R_{s1}} + \frac{1}{R_{s2}} \right] v_4(kT) \\ + \left[ -\frac{1}{R_{s1}} - \frac{1}{R_{s2}} \right] v_5(kT) &= i_{cu}(kT) + \frac{T}{2L_u} v_1(k-1)T \\ -\frac{T}{2L_u} v_4(k-1)T - i_{41}(k-1)T \end{aligned} \quad (6-84)$$

$$\left[ -\frac{1}{R_{s1}} - \frac{1}{R_{s2}} \right] v_4(kT) + \left[ \frac{1}{R_{s1}} + \frac{1}{R_{s2}} \right] v_5(kT) = -i_{qs}(kT) \quad (6-85)$$

$$\begin{aligned} -\frac{T}{2L_v} v_2(kT) + \left[ \frac{T}{2L_u} + \frac{1}{R_{s3}} + \frac{1}{R_{s4}} + \frac{1}{R_{s5}} + \frac{1}{R_{s6}} \right] v_6(kT) \\ + \left[ -\frac{1}{R_{s3}} - \frac{1}{R_{s4}} \right] v_7(kT) + \left[ -\frac{1}{R_{s5}} - \frac{1}{R_{s6}} \right] v_8(kT) &= i_{cv}(kT) \\ + \frac{T}{2L_v} v_2(k-1)T - \frac{T}{2L_v} v_6(k-1)T - i_{62}(k-1)T \end{aligned} \quad (6-86)$$

$$\left[ -\frac{1}{R_{s3}} - \frac{1}{R_{s4}} \right] v_6(kT) + \left[ \frac{1}{R_{s3}} + \frac{1}{R_{s4}} \right] v_7(kT) = -i_{ds}(kT) \quad (6-87)$$

$$\left[ -\frac{1}{R_{s5}} - \frac{1}{R_{s6}} \right] v_6(kT) + \left[ \frac{1}{R_{s5}} + \frac{1}{R_{s6}} + \frac{1}{R} \right] v_8(kT) = 0 \quad (6-88)$$

$$\begin{aligned} -\frac{T}{2L_w} v_3(kT) + \left[ \frac{T}{2L_w} + \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d3}} \right] v_9(kT) - \frac{v_{10}(kT)}{R_{d1}} \\ - \frac{v_{11}(kT)}{R_{d3}} = i_{cw}(kT) + \frac{T}{2L_w} v_3(k-1)T - \frac{T}{2L_w} v_9(k-1)T - i_{93}(k-1)T \end{aligned} \quad (6-89)$$

$$\begin{aligned} -\frac{v_9(kT)}{R_{d1}} + \left[ \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d2}} + \frac{T}{2L_a + R_a T} \right] v_{10}(kT) - \frac{T}{2L_a + R_a T} v_{11}(kT) \\ + \frac{T}{2L_a + R_a T} v_{La}(k-1)T - \frac{k_b T}{2L_a + R_a T} \omega_m(kT) = -\frac{2L_a}{2L_a + R_a T} i_a(k-1)T \end{aligned} \quad (6-90)$$

$$\begin{aligned} -\frac{v_9(kT)}{R_{d3}} - \frac{T}{2L_a + R_a T} v_{10}(kT) + \left[ \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{T}{2L_a + R_a T} \right] v_{11}(kT) \\ - \frac{T}{2L_a + R_a T} v_{La}(k-1)T + \frac{k_b T}{2L_a + R_a T} \omega_m(kT) = \frac{2L_a}{2L_a + R_a T} i_a(k-1)T \end{aligned} \quad (6-91)$$

สมการโนดต่างๆ สำหรับการจำลองระบบดังแผนภาพในรูปที่ 6.6 แสดงในโดเมนเวลาเต็มหน่วย มีรายละเอียดดังสมการที่ (6-81) ถึง (6-91) ตามลำดับ สมการเหล่านี้สามารถเขียนแสดงเป็นสมการเมตริกซ์ดังสมการที่ (6-48) โดยที่  $\mathbf{x}_k$  เป็นเวกเตอร์  $12 \times 1$  ดังสมการที่ (6-92) เมตริกซ์  $\mathbf{A}$  ของระบบเป็นเมตริกซ์จัตุรัสขนาด  $12 \times 12$  และเขียนแสดงตามการแบ่งส่วนได้ดังสมการที่ (6-93) โดยที่  $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \mathbf{A}_4, \mathbf{A}_5, \mathbf{A}_6, \mathbf{A}_7, \mathbf{A}_8$  และ  $\mathbf{A}_9$  เป็นเมตริกซ์จัตุรัสขนาด  $4 \times 4$  และมีรายละเอียดดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (6-94) ถึง (6-101) ตามลำดับ ส่วน  $\mathbf{I}_k$  เป็นเวกเตอร์  $12 \times 1$  ดังสมการที่ (6-102)  $\mathbf{x}_{k-1}$  เป็นเวกเตอร์  $12 \times 1$  และเขียนแสดงตามการแบ่งส่วนได้ดังสมการที่ (6-103) โดยที่  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  และ  $\mathbf{x}_3$  เป็นเวกเตอร์  $4 \times 1$  ซึ่งมีรายละเอียดแสดงไว้ในสมการที่ (6-104) ถึง

$$\mathbf{x}_k = [v_1(kT) \ v_2(kT) \ v_3(kT) \ v_4(kT) \ v_5(kT) \ v_6(kT) \ v_7(kT) \ v_8(kT) \ v_9(kT) \ v_{10}(kT) \ v_{11}(kT) \ \omega_m(kT)] \quad (6-92)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_3 \\ \mathbf{A}_4 & \mathbf{A}_5 & \mathbf{A}_6 \\ \mathbf{A}_7 & \mathbf{A}_8 & \mathbf{A}_9 \end{bmatrix} \quad (6-93)$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_u} + \frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & -\frac{T}{2L_u} \\ 0 & \frac{1}{R_v} + \frac{T}{2L_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_w} + \frac{T}{2L_w} & 0 \\ -\frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d2}} + \frac{T}{2L_u} \end{bmatrix} \quad (6-94)$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T}{2L_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_{d1}} - \frac{1}{R_{d2}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6-95)$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{T}{2L_w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6-96)$$

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_{d1}} - \frac{1}{R_{d2}} \\ 0 & -\frac{T}{2L_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6-97)$$

$$\mathbf{A}_5 = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{d5}} + \frac{1}{R_{d6}} + \frac{T}{2L_v} & -\frac{1}{R_{d3}} - \frac{1}{R_{d4}} & -\frac{1}{R_{d5}} - \frac{1}{R_{d6}} \\ 0 & -\frac{1}{R_{d3}} - \frac{1}{R_{d4}} & \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d4}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_{d5}} - \frac{1}{R_{d6}} & 0 & \frac{1}{R_{d5}} + \frac{1}{R_{d6}} + \frac{1}{R} \end{bmatrix} \quad (6-98)$$



$$\mathbf{A}_6 = \mathbf{A}_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6-99)$$

$$\mathbf{A}_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{T}{2L_w} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6-100)$$

$$\mathbf{A}_9 = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d3}} + \frac{T}{2L_w} & -\frac{1}{R_{d1}} & -\frac{1}{R_{d3}} & 0 \\ -\frac{1}{R_{d1}} & \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{d2}} + \frac{T}{2L_a + R_a T} & -\frac{1}{R_{d3}} & -\frac{k_b T}{2L_a + R_a T} \\ -\frac{1}{R_{d3}} & -\frac{T}{2L_a + R_a T} & \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{T}{2L_a + R_a T} & \frac{k_b T}{2L_a + R_a T} \\ 0 & 0 & 0 & 2J_m + B_m T \end{bmatrix} \quad (6-101)$$

$$\mathbf{I}_k = [i_u(kT) \quad i_v(kT) \quad i_w(kT) \quad i_{cu}(kT) \quad -i_{qs}(kT) \quad i_{cv}(kT) \quad -i_{ds}(kT) \quad 0 \quad i_{cw}(kT) \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (6-102)$$

$$\mathbf{x}_{k-1} = [\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \mathbf{x}_3]^T \quad (6-103)$$

$$\mathbf{x}_1 = [v_1(k-1)T \quad v_2(k-1)T \quad v_3(k-1)T \quad v_4(k-1)T] \quad (6-104)$$

$$\mathbf{x}_2 = [v_5(k-1)T \quad v_6(k-1)T \quad v_7(k-1)T \quad v_8(k-1)T] \quad (6-105)$$

$$\mathbf{x}_3 = [v_9(k-1)T \quad v_{10}(k-1)T \quad v_{11}(k-1)T \quad \omega_m(k-1)T] \quad (6-106)$$

(6-106) ตามลำดับ  $\mathbf{B}$  เป็นเมตริกซ์จัตุรัสขนาด  $12 \times 12$  ดังรายละเอียดในสมการที่ (6-107)  $\mathbf{C}_{k-1}$  เป็นเวกเตอร์  $12 \times 1$  เมื่อเขียนตามการแบ่งส่วนจะได้ดังสมการที่ (6-108) โดยที่  $\mathbf{C}_1$ ,  $\mathbf{C}_2$  และ  $\mathbf{C}_3$  เป็นเวกเตอร์  $4 \times 1$  ที่มีรายละเอียดดังสมการที่ (6-109) ถึง (6-111) ตามลำดับ  $\mathbf{D}_k$  และ  $\mathbf{E}_{k-1}$  เป็นเวกเตอร์  $12 \times 1$  ซึ่งแสดงไว้ดังสมการที่ (6-112) และ (6-113) ตามลำดับ ค่า  $T_L(kT)$  ในสมการที่ (6-112) คือ แรงบิดของโหลดที่เวลาใด ๆ

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & -\frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T}{2L_v} & 0 & 0 & 0 & -\frac{T}{2L_v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T}{2L_w} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{T}{2L_w} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & \frac{T}{2L_u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T}{2L_v} & 0 & 0 & 0 & \frac{T}{2L_v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{T}{2L_w} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T}{2L_w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2J_m \end{bmatrix} \quad (6-107)$$

$$\mathbf{C}_{k-1} = [\mathbf{C}_1 \quad \mathbf{C}_2 \quad \mathbf{C}_3]^T \quad (6-108)$$

$$\mathbf{C}_1 = [i_{14}(k-1)T \quad i_{26}(k-1)T \quad i_{39}(k-1)T \quad i_{41}(k-1)T] \quad (6-109)$$

$$\mathbf{C}_2 = [0 \quad i_{62}(k-1)T \quad 0 \quad 0] \quad (6-110)$$

$$\mathbf{C}_3 = \left[ i_{93}(k-1)T \quad \frac{2L_a i_a(k-1)T}{2L_a + R_a T} \quad -\frac{2L_a i_a(k-1)T}{2L_a + R_a T} \quad -k_i T \cdot i_a(k-1)T \right] \quad (6-111)$$

$$\mathbf{D}_k = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad T \cdot T_L(kT)]^T \quad (6-112)$$

$$\mathbf{E}_{k-1} = \left[ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{Tv_{La}(k-1)T}{2L_a + R_a T} \quad -\frac{Tv_{La}(k-1)T}{2L_a + R_a T} \quad -TJ_m \alpha(k-1)T \right] \quad (6-113)$$

## 6.6 สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบต่าง ๆ ที่นำเสนอในบทนี้ ใช้หลักการวิเคราะห์แบบ โนด โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟสำหรับการพิจารณา การประมาณเทอมอินทิเกรตใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู เพื่อจัดแบบจำลองเหล่านี้ให้อยู่ในโดเมนเวลาเต็มหน่วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ ได้รับการนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้การระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ โดยที่ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 7

## บทที่ 7

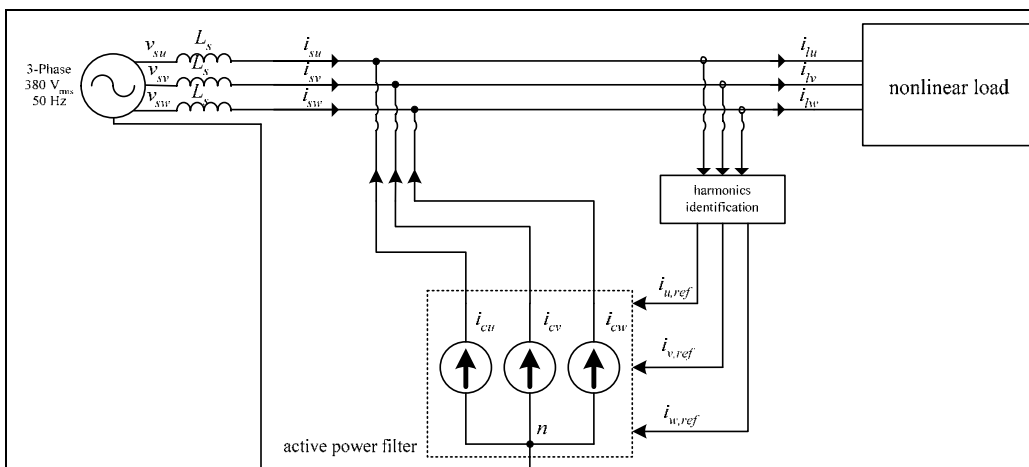
### ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก

#### 7.1 บทนำ

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่นำเสนอในบทนี้ พิจารณาแบบจำลองของวงจรกรองเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ที่กำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก อัลกอริทึมเหล่านี้ ได้แก่ วิธี PQ วิธี DQ วิธี SD วิธี SWFA และวิธี DQF ในการจำลองสถานการณ์ได้พิจารณาระบบ 4 รูปแบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแตกต่างกัน ได้แก่ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส โหลดดังกล่าว เมื่อไม่คิดตั้งตัวเก็บประจุในการปรับเรียบแรงดัน สามารถพิจารณาเป็นโหลดในกลุ่มแหล่งจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (current-source nonlinear load, CSNL) ตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี ใช้ค่า %THD<sub>i</sub> และ %unbalance ภายหลังการชดเชยเป็นสำคัญ ทั้งนี้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกและความสมดุลของระบบไฟฟ้าภายหลังการชดเชย การแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในบทนี้มีการนำเสนอการวิเคราะห์ และอภิปรายผลไปพร้อม ๆ กัน

#### 7.2 โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก

โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์ สามารถแทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 7.1 ดังจะสังเกตเห็นได้ว่ามีองค์ประกอบหนึ่งเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก (harmonics identification) ซึ่งหมายรวมถึง วิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง ต่อไปนี้ วิธี PQ วิธี DQ วิธี SD วิธี SWFA หรือวิธี DQF การจำลองสถานการณ์ได้พิจารณาระบบ 4 รูปแบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแตกต่างกัน ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียวนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 7.3 ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ และวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ได้นำเสนอไว้ใน



รูปที่ 7.1 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก

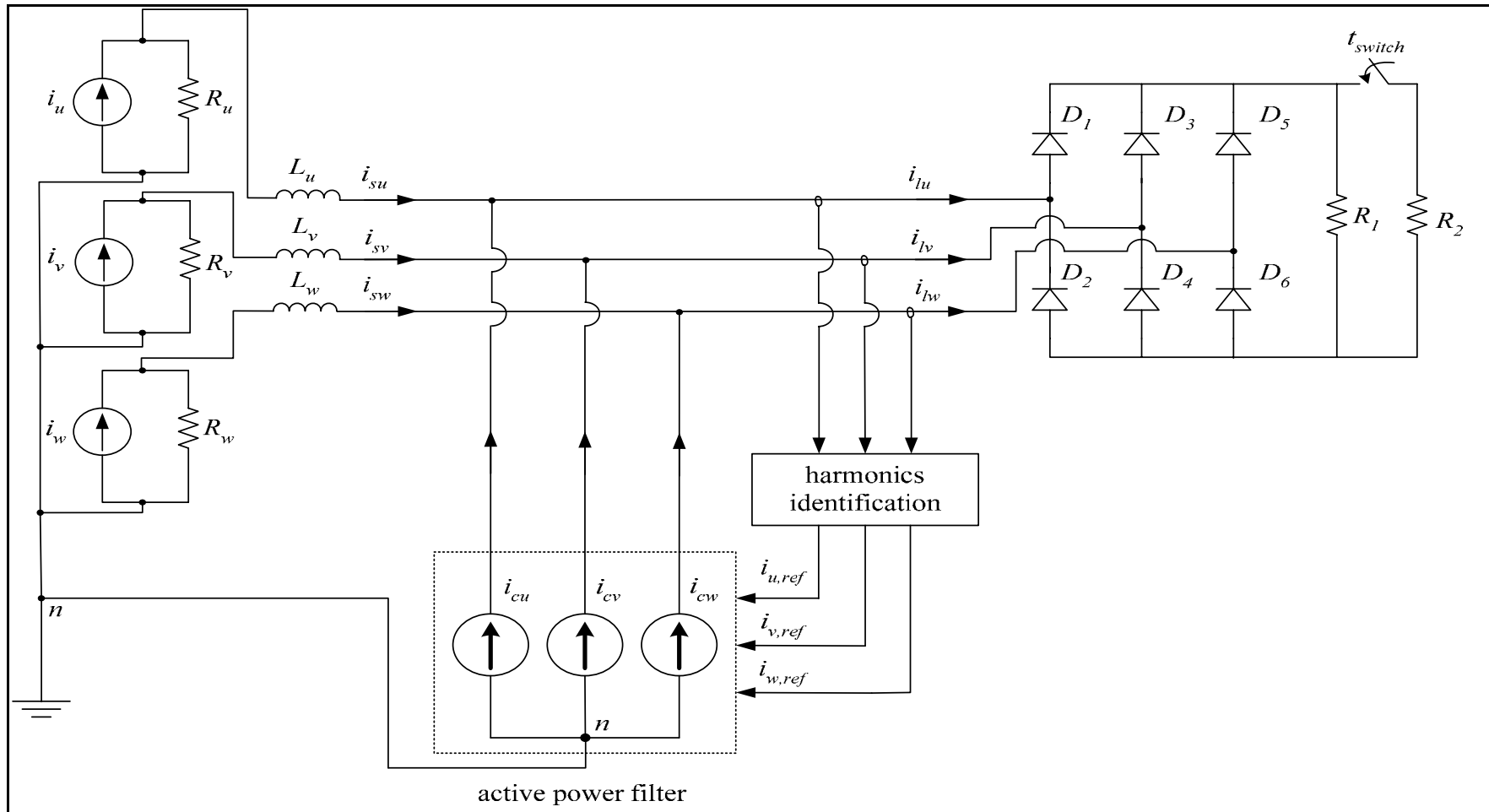
หัวข้อที่ 7.4 และ 7.5 ตามลำดับ ส่วนในหัวข้อที่ 7.6 เป็นการนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก กรณีที่ระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

### 7.3 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อโหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในหัวข้อนี้แสดงไว้ในรูปที่ 7.2 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 ถ้าพิจารณาว่าไม่มีวงจรรอกำลั้งแอกทีฟ กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก ( $i_{su}$ ,  $i_{sv}$  และ  $i_{sw}$ ) จะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าโหลด ( $i_{lu}$ ,  $i_{lv}$  และ  $i_{lw}$ ) แต่ถ้าพิจารณาในกรณีที่มืงจรรอกำลั้งแอกทีฟ นี้กระแสชดเชย ( $i_{cu}$ ,  $i_{cv}$  และ  $i_{cw}$ ) เพื่อกำจัดฮาร์มอนิก จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าทั้งสาม โดยอาศัยกฎของเคอร์ชอฟฟ์ ดังสมการที่ (7-1) จากสมการดังกล่าว  $i$  ที่เป็นตัวห้อย แสดงเฟส u เฟส v หรือ เฟส w โดยถ้าพิจารณาเฟส u จะแทน  $i$  ด้วย  $u$  ถ้าพิจารณาเฟส v จะแทน  $i$  ด้วย  $v$  และถ้าพิจารณาเฟส w จะแทน  $i$  ด้วย  $w$

$$i_{si} = i_{li} - i_{ci} \tag{7-1}$$

ผลการจำลองสถานการณ์ก่อนการชดเชย รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ( $v_{su}$ ,  $v_{sv}$  และ  $v_{sw}$ ) และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย ( $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$ .)



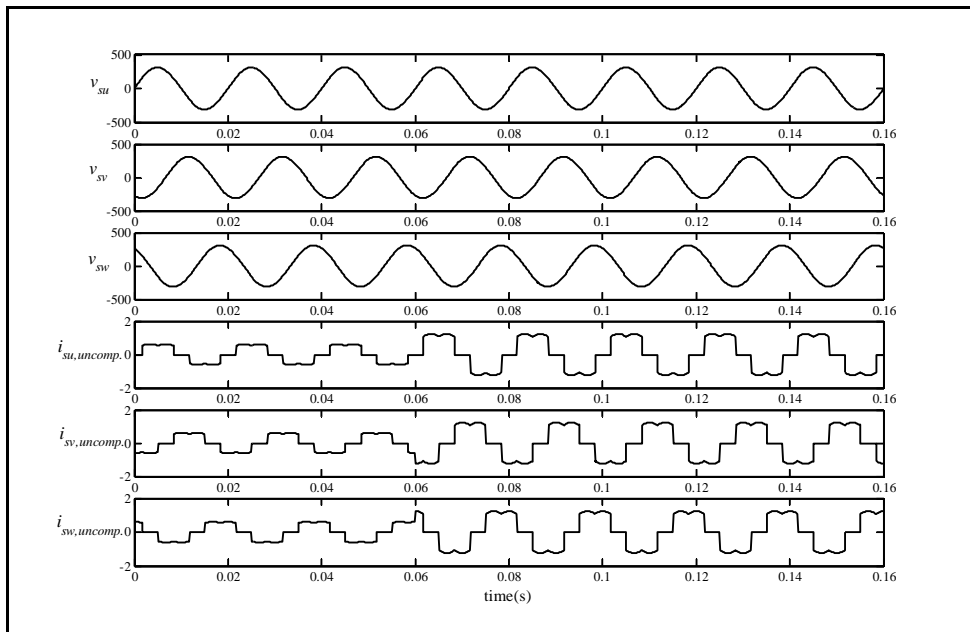
รูปที่ 7.2 โครงสร้างของระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

แสดงไว้ในรูปที่ 7.3 ก) ส่วนรูปสัญญาณของกระแสชดเชย ( $i_{cu}$ ,  $i_{cv}$  และ  $i_{cw}$ ) และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักหลังการชดเชย ( $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$ ) ที่ใช้การระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ DQ SD SWFA และ DQF แสดงไว้ดังรูปที่ 7.3 ข) ถึง 7.3 ฉ) ตามลำดับ จากรูปที่ 7.3 ก) สังเกตได้ว่าค่า  $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$  มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้ายังคงรูปคลื่นสัญญาณไซน์อยู่นอกจากนี้ในการจำลองสถานการณ์กำหนดให้มีการสวิตช์โหลดความต้านทาน  $R_2$  ต่อขนานกับ  $R_1$  ที่เวลา 0.06 วินาที เพื่อศึกษาถึงสถานะชั่วคราวที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอัลกอริทึมการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิก ตลอดจนการชดเชยฮาร์มอนิก จึงส่งผลให้แอมพลิจูดของ  $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$  มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 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>1</sub> ในแต่ละเฟสก่อนการชดเชย ที่แสดงไว้ในตารางที่ 7.1 สังเกตได้ว่าค่า %THD<sub>1</sub> มีค่ามากกว่า IEEE Std. 519-1992 โดยค่า %THD<sub>1</sub> เฉลี่ย (%THD<sub>1,ave</sub>) ก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 28.65 เปอร์เซ็นต์ ค่า %THD<sub>1</sub> เฉลี่ยดังกล่าวคำนวณได้จากสมการที่ (7-2) เมื่อได้มีการชดเชยฮาร์มอนิกแล้ว กระแส  $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$  มีลักษณะ

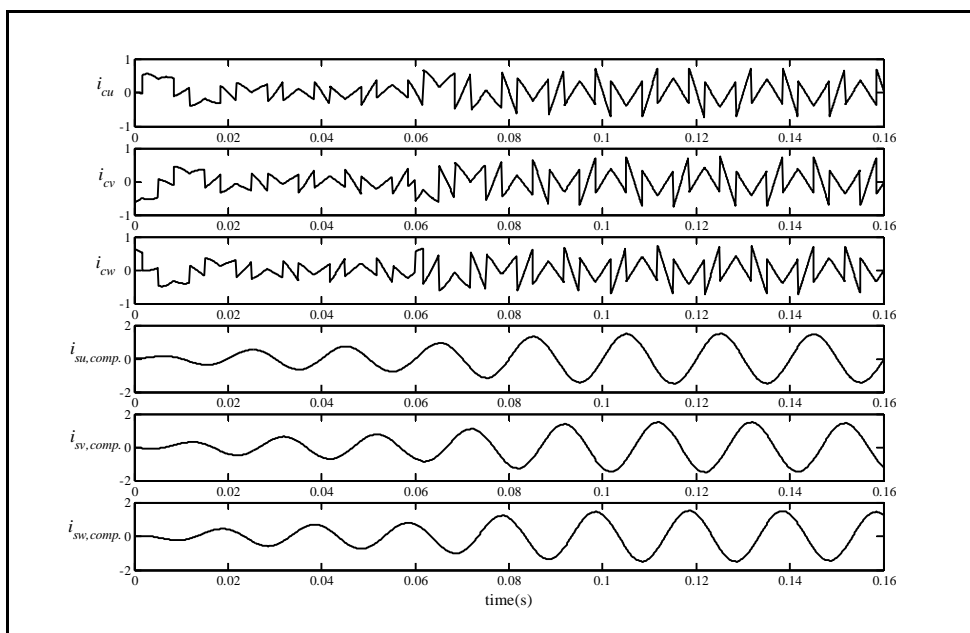
$$\%THD_{i,ave} = \sqrt{\frac{\sum_{k=u,v,w} (\%THD_{i(k)})^2}{3}} \quad (7-2)$$

ใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มาก อาจมีการบิดเบี้ยวบ้างแต่เพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจสังเกตได้จากรูปคลื่นของสัญญาณเหล่านี้ในรูปที่ 7.3 ข) ถึง 7.3 ฉ) ตามลำดับ ข้อมูลด้าน %THD<sub>1</sub> เฉลี่ยและ %unbalance ได้รับการรวบรวมแสดงไว้ในตารางที่ 7.1 จากข้อมูลในตารางดังกล่าวอาจสังเกตได้ว่า วิธี SWFA และ DQF เป็นวิธีการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกที่มีความถูกต้องมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ จึงส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกได้ผลดีที่สุด โดยภายหลังการชดเชย ค่า %THD<sub>1</sub> เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่วิธี DQ ให้ผลการระบุนอกลักษณะได้ไม่ดีเท่าใดนัก จึงส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกได้ผลไม่ดีไปด้วยเช่นกันเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ โดยค่า %THD<sub>1</sub> เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.02 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังอยู่ในขอบเขตตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการกำจัดฮาร์มอนิก ที่ใช้วิธีการระบุนอกลักษณะด้วยวิธี SWFA และ DQF

ในรูปที่ 7.3 จ) และ 7.3 ฉ) สังเกตได้ว่าในช่วง 0.02 วินาทีแรกยังไม่มีการกำจัดฮาร์มอนิกเกิดขึ้น โดยไม่มีการฉีดกระแสชดเชยใด ๆ เลย ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการดังกล่าวต้องใช้เวลากำหนดค่าเริ่มต้น (initialisation) ใ้กับการคำนวณ และเมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะชั่วคราว เนื่องจากการสวิตช์โหลดความต้านทานต่อขนานเพิ่มเข้าไปในระบบที่เวลา 0.06 วินาที สังเกตได้ว่า กระแส  $i_{cu}$ ,  $i_{cv}$  และ  $i_{cw}$  ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันที่เวลาดังกล่าว โดยสังเกตได้จากรูปที่ 7.3 ข) ถึง 7.3 ฉ) โดยเฉพาะเฟส v และเฟส w สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของกระแส  $i_{cv}$  และ  $i_{cw}$  อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เฟส u ค่ากระแส  $i_{cu}$  ไม่สามารถสังเกตถึงการเปลี่ยนแปลงได้อย่างเด่นชัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่เวลา 0.06 วินาที กระแส  $i_{su,uncomp.}$  ที่ใช้ในกระบวนการการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และมีค่าเป็นศูนย์ที่เวลาดังกล่าว จึงส่งผลให้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในเฟส u ที่ให้ผลลัพธ์เป็นกระแส  $i_{cu}$  ไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดเหมือนกับเฟส v และเฟส w นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และ DQ ดังรูปที่ 7.3 ข) และ 7.3 ค) ยังสังเกตได้ยิ่งกว่า การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกใช้เวลาประมาณ 0.04 วินาที จึงเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากมีการสวิตช์โหลดความต้านทาน จึงส่งผลให้ค่ากระแส  $i_{su,comp.}$ ,  $i_{sv,comp.}$  และ  $i_{sw,comp.}$  เข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.1 วินาที ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และ DQ ใช้วงจรกรองผ่านสูงในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิก ออกจากองค์ประกอบมูลฐานตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ซึ่งการใช้วงจรดังกล่าวอาจทำให้เกิดเวลาประวิงได้ ส่วนผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD ดังรูปที่ 7.3 ง) สังเกตได้ว่า วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกนี้ ใช้เวลาประมาณ 0.01 วินาที จึงเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังมีการสวิตช์ด้วยโหลดความต้านทาน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD ใช้วงจรกรองผ่านต่ำเป็นส่วนหนึ่งของการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดเวลาประวิงได้เช่นเดียวกัน ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ที่มีการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี SWFA และ DQF ดังรูปที่ 7.3 จ) และ 7.3 ฉ) สังเกตได้ว่ากระแสชดเชยที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้ ใช้เวลาประมาณ 0.02 วินาที จึงเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากสวิตช์โหลดความต้านทาน ทั้งนี้เนื่องจากวิธี SWFA และ DQF มีขั้นตอนกำหนดค่าเริ่มต้นใ้กับการคำนวณ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 0.02 วินาที อย่างไรก็ตามผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะชั่วคราวดังกล่าวข้างต้น พบว่า การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธีสามารถให้ข้อมูลฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องตามการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของกระแส  $i_{su,uncomp.}$ ,  $i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$  นอกจากนี้ความสมดุลทั้งก่อนและหลังการชดเชย สามารถพิจารณาได้จากค่า %unbalance ในตารางที่ 7.1 โดยคำนวณค่าดังกล่าวตามสมการที่ (7-3) ตามมาตรฐาน IEEE Std. 141-1993 โดยก่อนการชดเชยค่า %unbalance

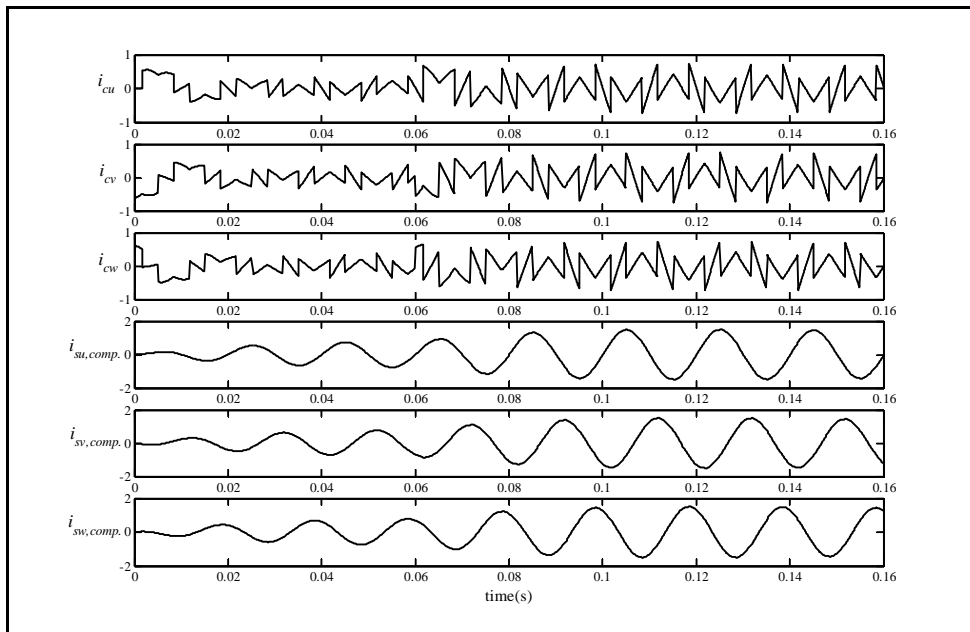


ก) แรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย

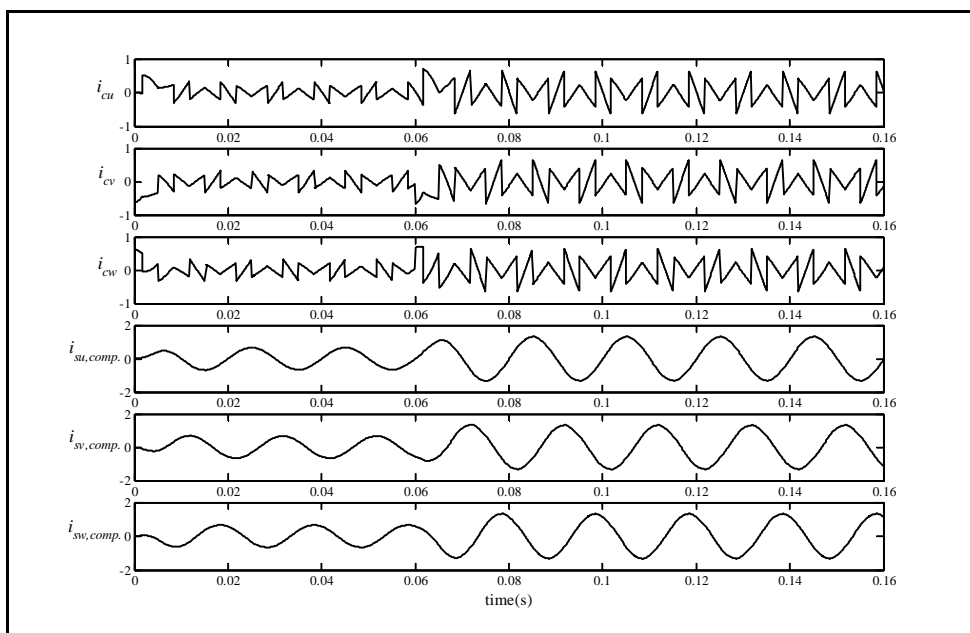


ข) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี PQ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

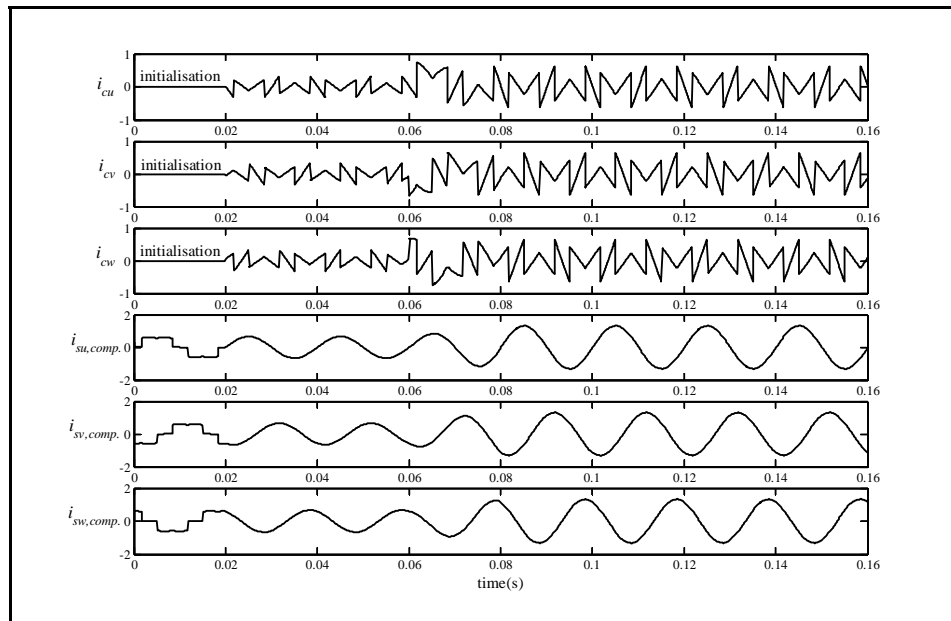




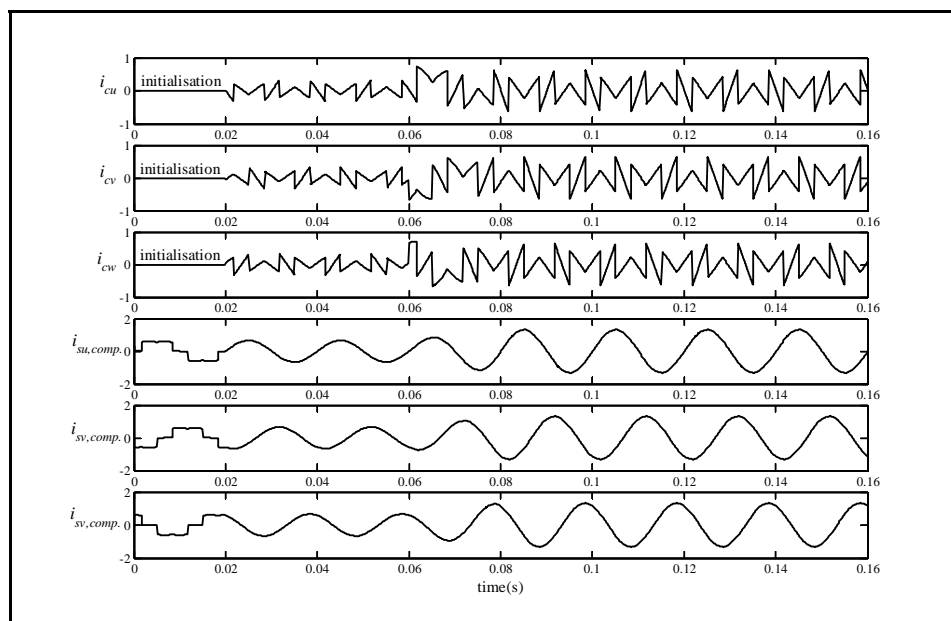
ค) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ง) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SD ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



จ) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ฉ) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

รูปที่ 7.3 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อระบบมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส  
ที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 7.1 ผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

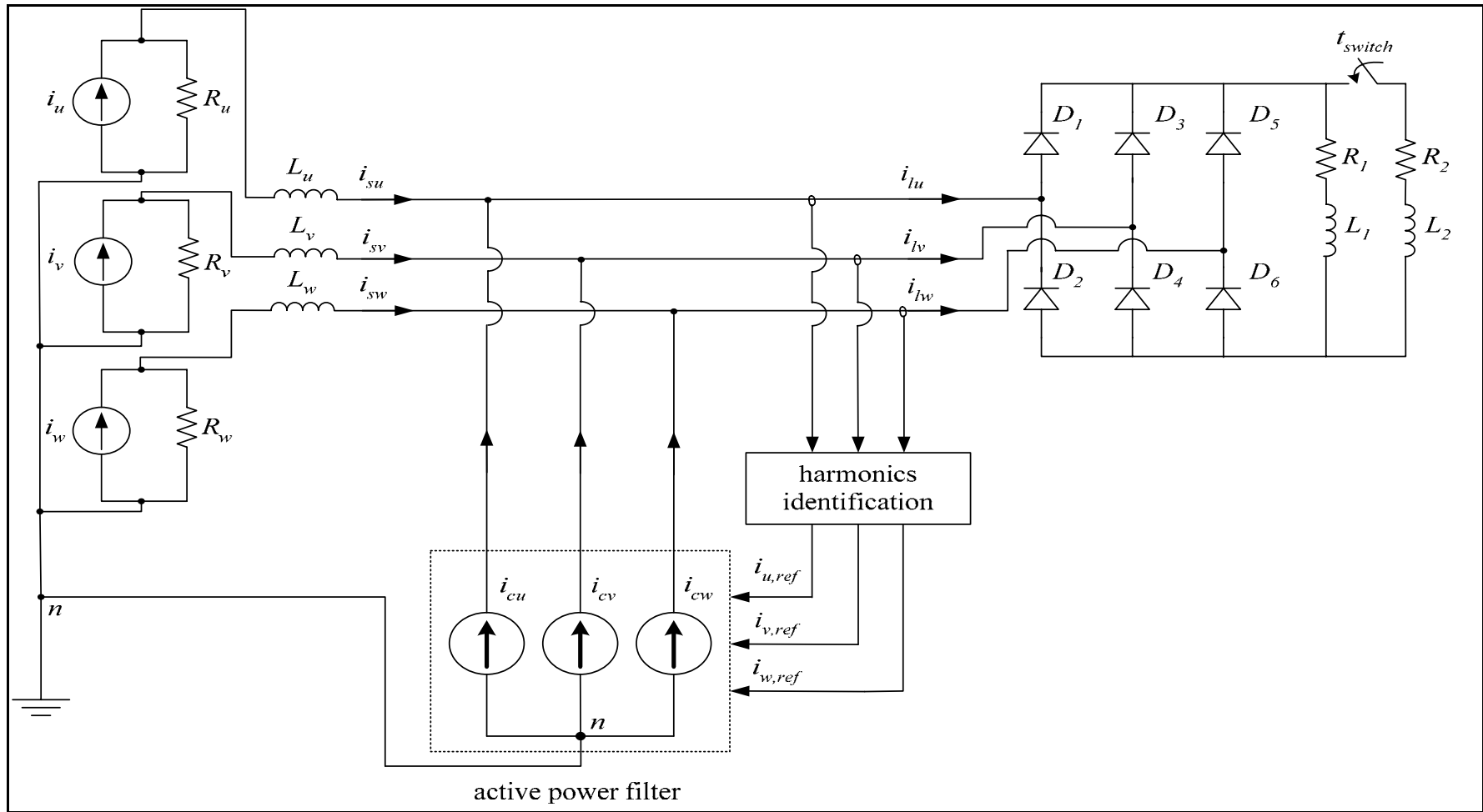
| วิธีการระบุ<br>เอกลักษณ์ฮาร์มอนิก | %THD <sub>i</sub><br>เฟส u | %THD <sub>i</sub><br>เฟส v | %THD <sub>i</sub><br>เฟส w | %THD <sub>i</sub><br>เฉลี่ย | $i_{su}$<br>(rms) | $i_{sv}$<br>(rms) | $i_{sw}$<br>(rms) | unbalance<br>(%) |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| ก่อนการชดเชย                      | 28.43                      | 29.09                      | 28.42                      | 28.65                       | 0.96              | 0.96              | 0.96              | 0                |
| หลังการชดเชย                      |                            |                            |                            |                             |                   |                   |                   |                  |
| วิธี PQ                           | 0.82                       | 1.03                       | 1.11                       | 0.99                        | 1.02              | 1.02              | 1.02              | 0                |
| วิธี DQ                           | 0.81                       | 1.08                       | 1.13                       | 1.02                        | 1.02              | 1.02              | 1.02              | 0                |
| วิธี SD                           | 0.89                       | 0.87                       | 0.88                       | 0.88                        | 0.93              | 0.93              | 0.93              | 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                |

$$\% \text{ unbalance} = \frac{|\text{maximum current deviation from average rms current}|}{\text{average rms current}} \times 100\% \quad (7-3)$$

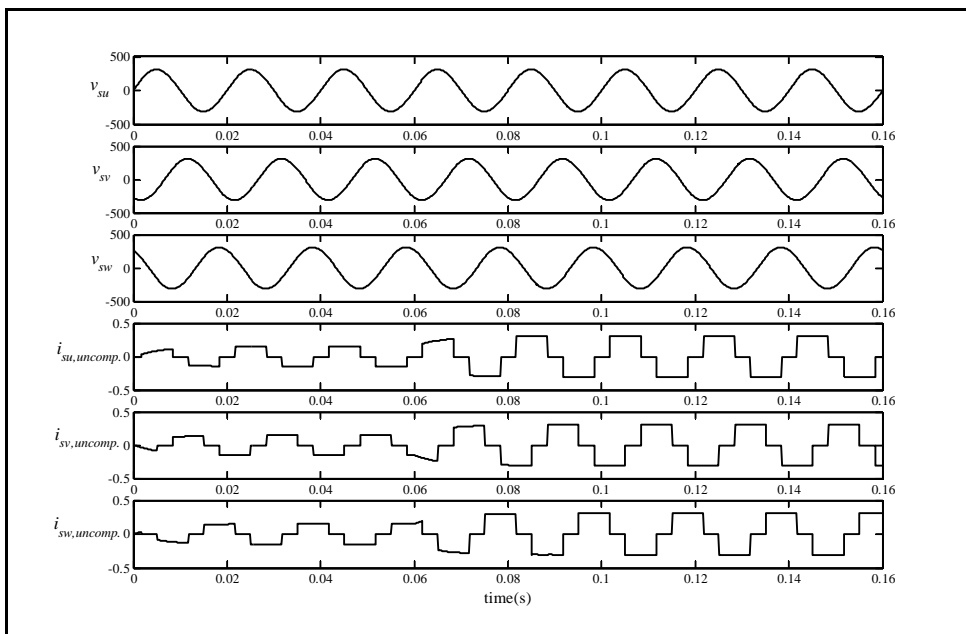
เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่หลังการชดเชยที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี ต่างก็ให้ %unbalance เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกันทั้งสิ้น ซึ่งหมายถึงระบบทั้งก่อนและหลังการชดเชยอยู่ในสถานะสมดุล

#### 7.4 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อโหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

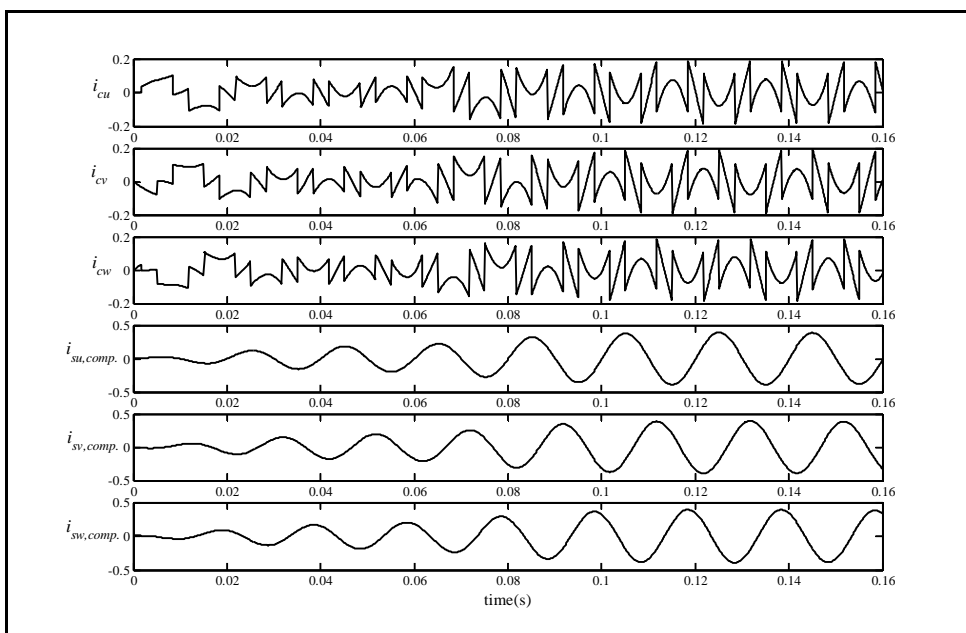
โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในหัวข้อนี้แสดงไว้ในรูปที่ 7.4 โดยค่า  $R_u$ ,  $R_v$  และ  $R_w$  ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์มีค่าเท่ากับ 0.001 โอห์ม ค่า  $L_u$ ,  $L_v$  และ  $L_w$  มีค่าเท่ากับ 100 ไมโครเฮนรี ค่าโหลดความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  สมมติให้มีค่าเท่ากับ 3.37 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  $i_{sw,uncomp.}$  แสดงไว้ดังรูปที่ 7.5 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  $i_{sw,comp.}$  ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์



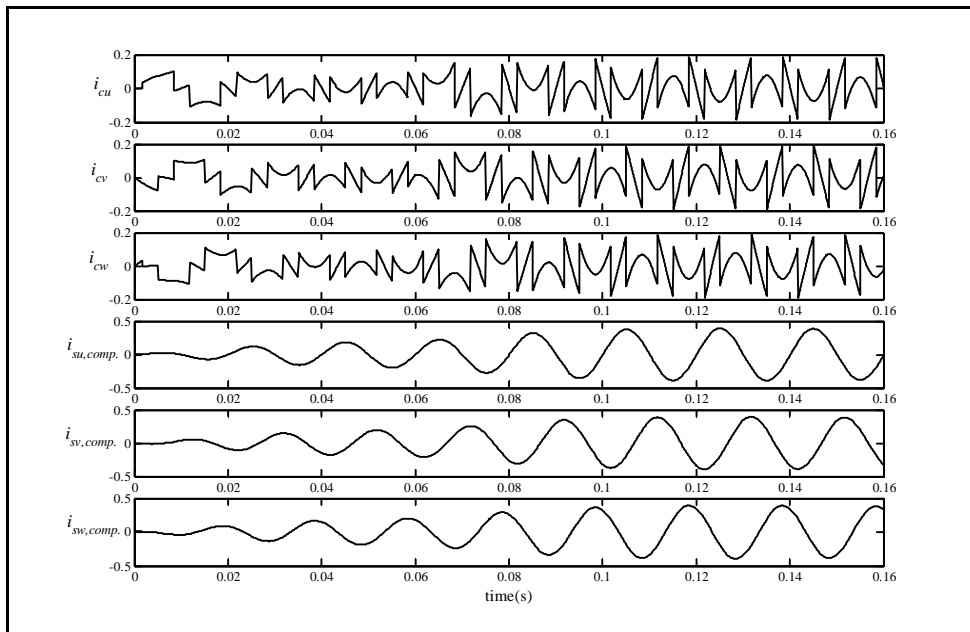
รูปที่ 7.4 โครงสร้างของระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ



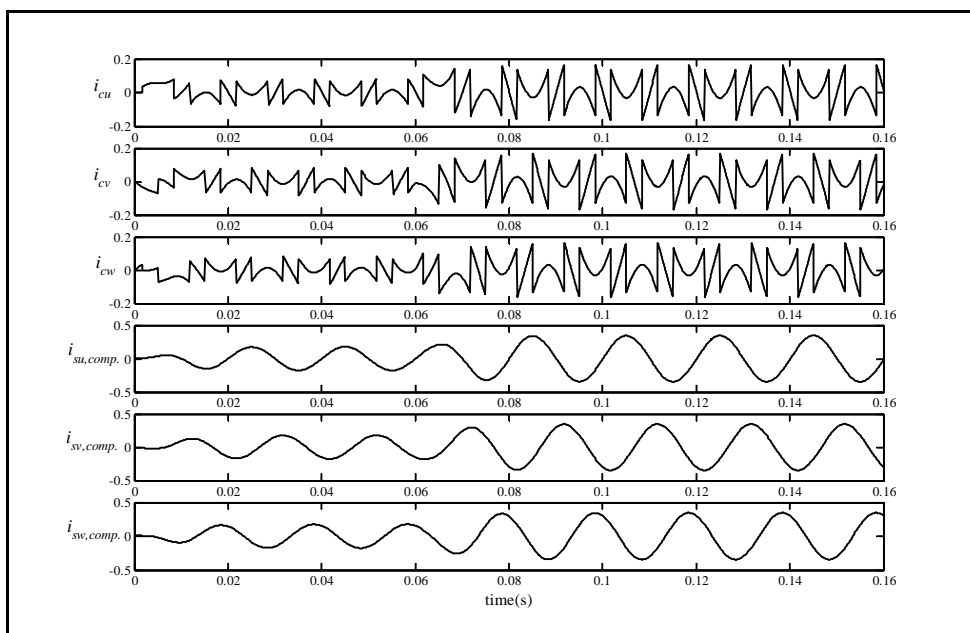
ก) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย



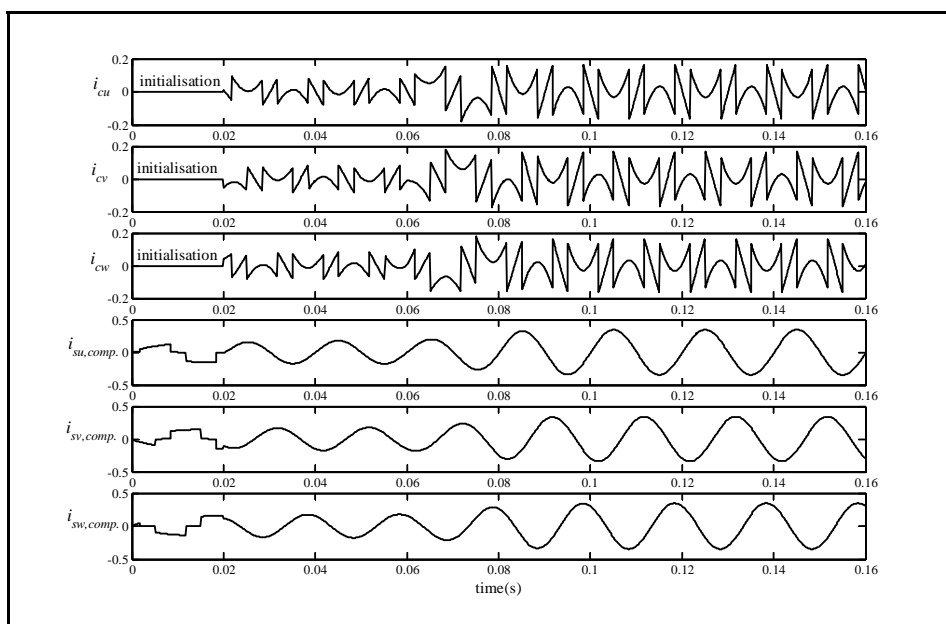
ข) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี PQ ในการระบุเอกลักษณะฮาร์มอนิก



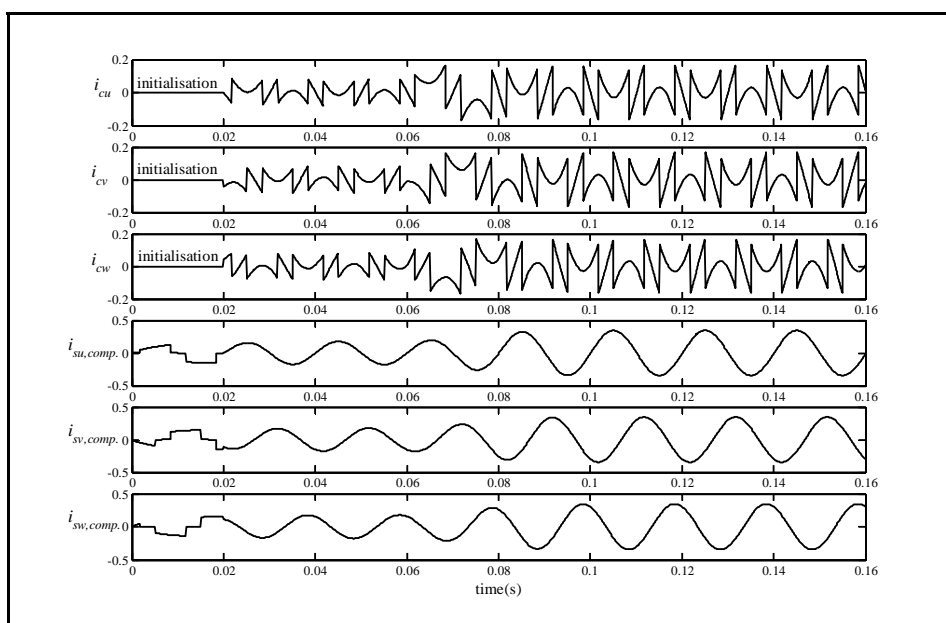
ค) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ง) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SD ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



จ) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ฉ) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

รูปที่ 7.5 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อระบบมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส  
ที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ DQ SD SWFA และ DQF แสดงไว้ดังรูปที่ 7.5 ข) ถึง 7.5 ฉ) ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์สามารถสังเกตได้ว่าก่อนการชดเชย กระแส  $i_{su,uncomp.}$ ,  $i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$  มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ โดยดูได้จากรูปที่ 7.5 ก) ในขณะที่หลังการชดเชยกระแส  $i_{su,comp.}$ ,  $i_{sv,comp.}$  และ  $i_{sw,comp.}$  มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น ทั้งนี้อาจดูได้จากค่า %THD<sub>i</sub> ในตารางที่ 7.2 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 ซึ่งมีค่ามากที่สุด และจากการจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองในสภาวะชั่วคราว และค่า %unbalance พบว่ามีผลที่คล้ายคลึงกับที่ปรากฏในคำอธิบายและอภิปรายผลในหัวข้อที่ 7.3 ที่ผ่านมาแล้ว

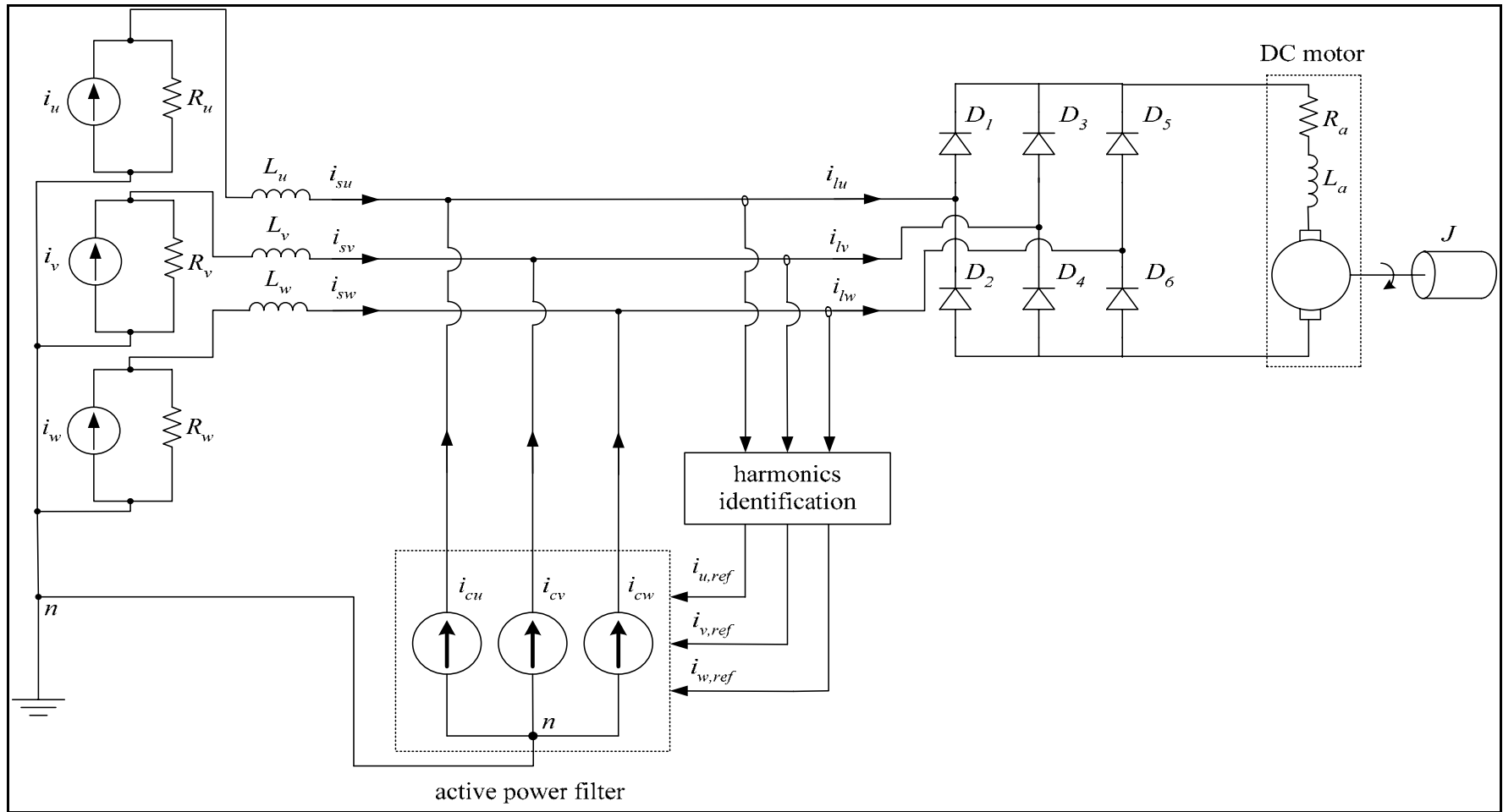
ตารางที่ 7.2 ผลการจำลองสถานการณ์ในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

| วิธีการระบุ<br>เอกลักษณ์ฮาร์มอนิก | %THD <sub>i</sub><br>เฟส u | %THD <sub>i</sub><br>เฟส v | %THD <sub>i</sub><br>เฟส w | %THD <sub>i</sub><br>เฉลี่ย | $i_{su}$<br>(rms) | $i_{sv}$<br>(rms) | $i_{sw}$<br>(rms) | unbalance<br>(%) |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| ก่อนการชดเชย                      | 28.35                      | 28.86                      | 28.35                      | 28.52                       | 0.25              | 0.25              | 0.25              | 0                |
| หลังการชดเชย                      |                            |                            |                            |                             |                   |                   |                   |                  |
| วิธี PQ                           | 0.47                       | 0.83                       | 0.94                       | 0.77                        | 0.27              | 0.27              | 0.27              | 0                |
| วิธี DQ                           | 0.67                       | 1.01                       | 1.07                       | 0.93                        | 0.27              | 0.27              | 0.27              | 0                |
| วิธี SD                           | 0.27                       | 0.27                       | 0.27                       | 0.27                        | 0.24              | 0.24              | 0.24              | 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                |

## 7.5 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อโหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

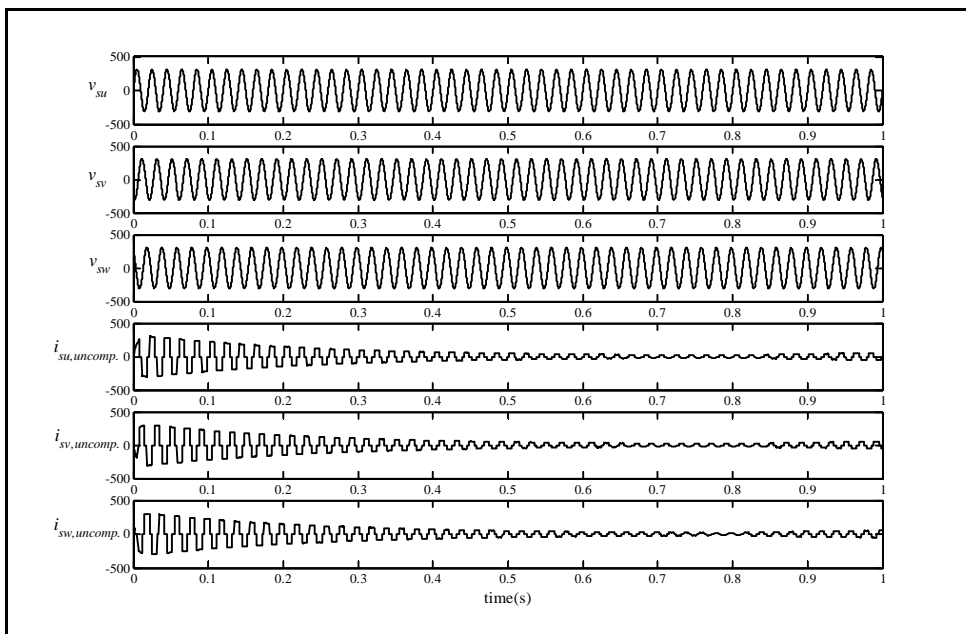
โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในหัวข้อนี้แสดงไว้ในรูปที่ 7.6 โดยค่า  $R_u$ ,  $R_v$  และ  $R_w$  ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์มีค่าเท่ากับ 0.001 โอห์ม ค่า  $L_u$ ,  $L_v$  และ  $L_w$  มีค่าเท่ากับ 100 ไมโครเฮนรี ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



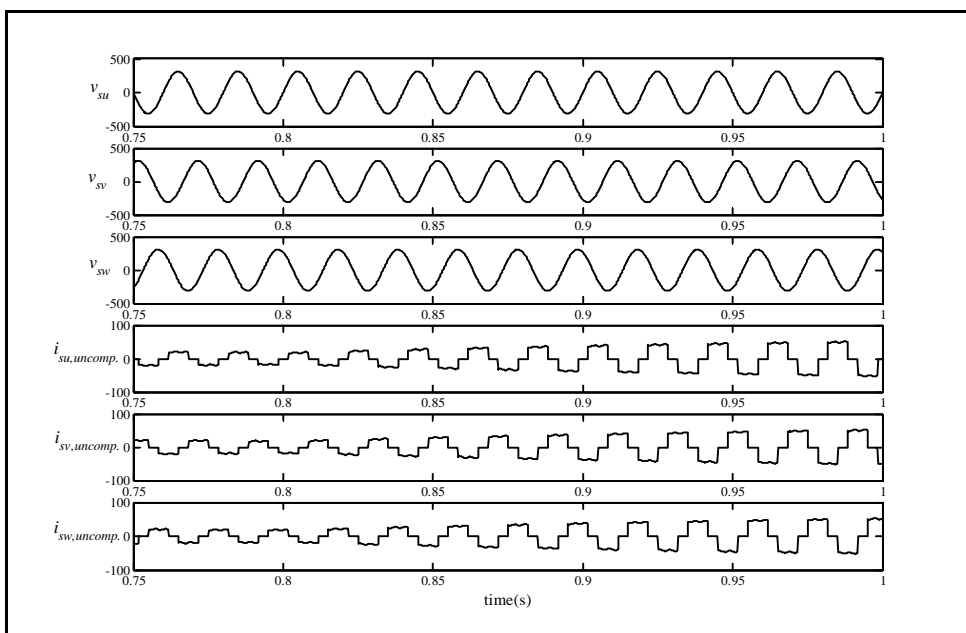


รูปที่ 7.6 โครงสร้างของระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

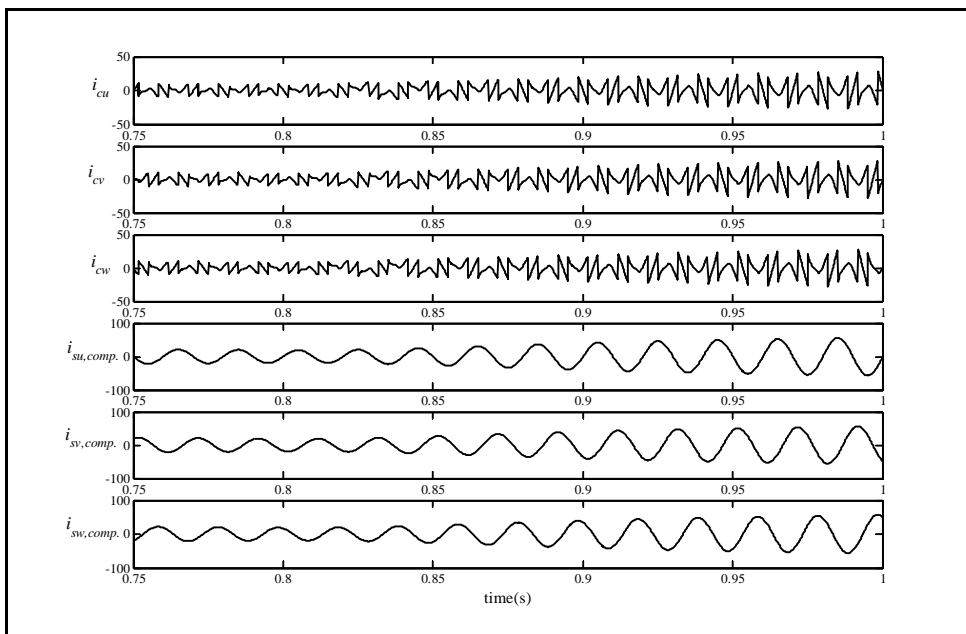
ชนิดวงจรสนามแยกส่วนมีค่า  $R_a$  เท่ากับ 0.6 โอห์ม  $L_a$  เท่ากับ 8 มิลลิเฮนรี  $J_m$  เท่ากับ 0.0465 กิโลกรัม×เมตร<sup>2</sup>  $B_m$  เท่ากับ 0.004 นิวตัน×เมตร×วินาที/เรเดียน และค่า  $k_b$  เท่ากับ 0.55 นิวตัน×เมตร/แอมแปร์ (Sousa and Bose, 1994) รูปสัญญาณแรงดัน  $v_{su}, v_{sv}$  และ  $v_{sw}$  และกระแส  $i_{su,uncomp.}, i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$  แสดงไว้ดังรูปที่ 7.7 ก) จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นกระแส  $i_{su,uncomp.}, i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$  มีค่าสูงมากและมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 0.6 จึงเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นเป็นช่วงการเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ จึงส่งผลให้ขนาดของกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงในช่วงแรก นอกจากนี้การจำลองสถานการณ์ดังกล่าวกำหนดให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อกับโหลด 40 นิวตัน×เมตร ที่เวลาตั้งแต่ 0.8 วินาทีเป็นต้นไป โดยก่อนหน้าเวลาดังกล่าวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงยังไม่มีภาระต่อกับโหลด (no load) ด้วยเหตุนี้ค่าแอมพลิจูดของ  $i_{su,uncomp.}, i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$  จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่วินาทีที่ 0.8 เป็นต้นไป โดยดูได้จากรูปที่ 7.7 ข) ที่เป็นการพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ตั้งแต่เวลาที่ 0.75 ถึง 1 วินาที การเพิ่มขึ้นของกระแส  $i_{su,uncomp.}, i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$  เนื่องจากการต่อโหลดให้กับมอเตอร์ จะไม่เปลี่ยนในทันทีทันใด แต่กระแสดังกล่าวจะมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.9 วินาที ส่วนรูปสัญญาณของกระแส  $i_{cu}, i_{cv}$  และ  $i_{cw}$  และกระแส  $i_{su,comp.}, i_{sv,comp.}$  และ  $i_{sw,comp.}$  ที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ DQ SD SWFA และ DQF แสดงไว้ในรูปที่ 7.7 ค) ถึง 7.7 ข) ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงผลในช่วงเวลา 0.75 ถึง 1 วินาที ทั้งนี้เพื่อความชัดเจนในการพิจารณา รูปสัญญาณต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองผล จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวสังเกตได้ว่าก่อนการชดเชย กระแส  $i_{su,uncomp.}, i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$  มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ โดยดูได้จากรูปที่ 7.7 ข) ในขณะที่หลังการชดเชยกระแส  $i_{su,comp.}, i_{sv,comp.}$  และ  $i_{sw,comp.}$  มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น ทั้งนี้อาจดูได้จากค่า %THD<sub>i</sub> จากตารางที่ 7.3 โดยที่ค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 28.63 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายหลังการชดเชย สังเกตได้ว่าวิธี SWFA และ DQF สามารถระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด จึงส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกได้ผลดีที่สุดเช่นกัน โดยค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ และ SD ส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิก มีค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชยเท่ากับ 1.12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากที่สุด และถ้าพิจารณาผลการตอบสนองในสภาวะชั่วคราว และค่า %unbalance ก่อนและหลังการชดเชย ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์จะเหมือนกับผลการจำลองสถานการณ์ก่อนหน้านี้



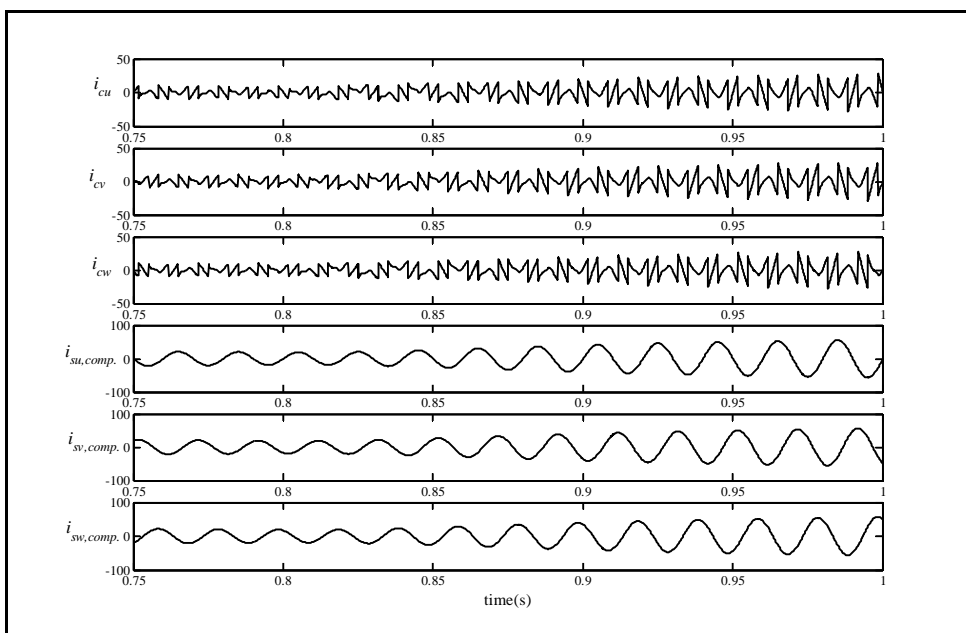
ก) แรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย



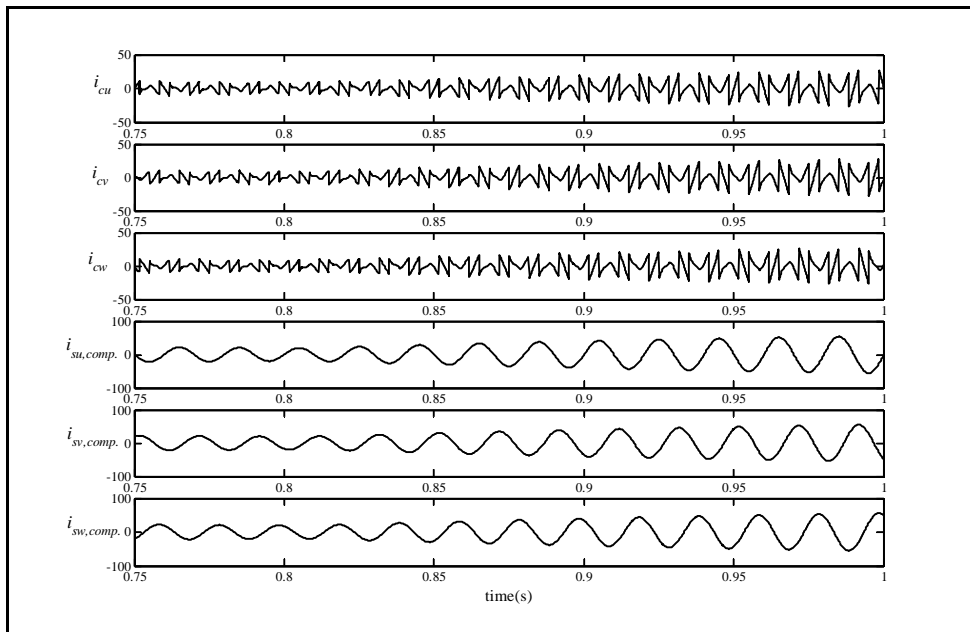
ข) แรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย  
เมื่อพิจารณาผลในช่วงเวลา 0.75 ถึง 1 วินาที



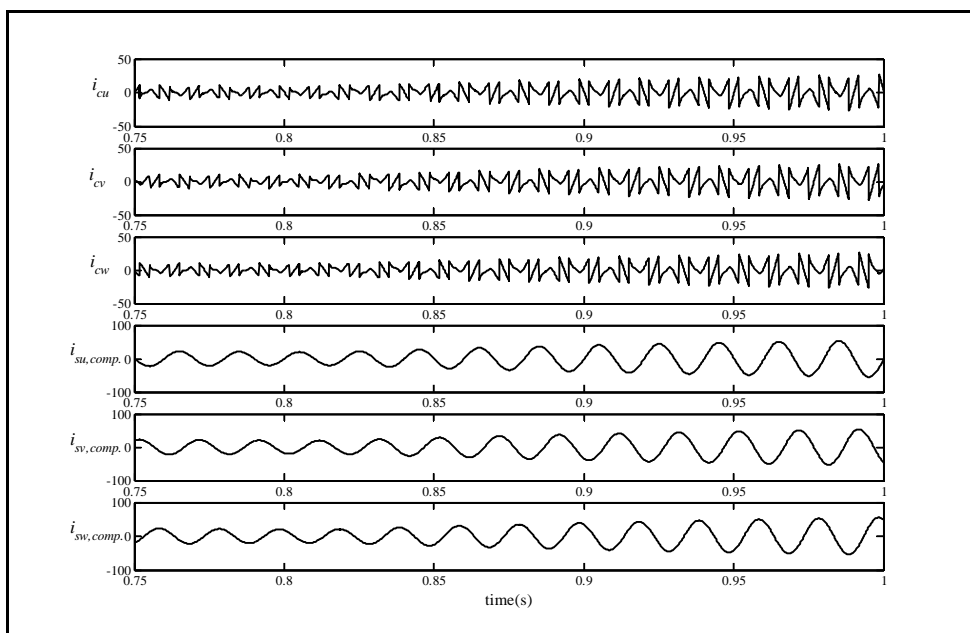
ก) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี PQ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



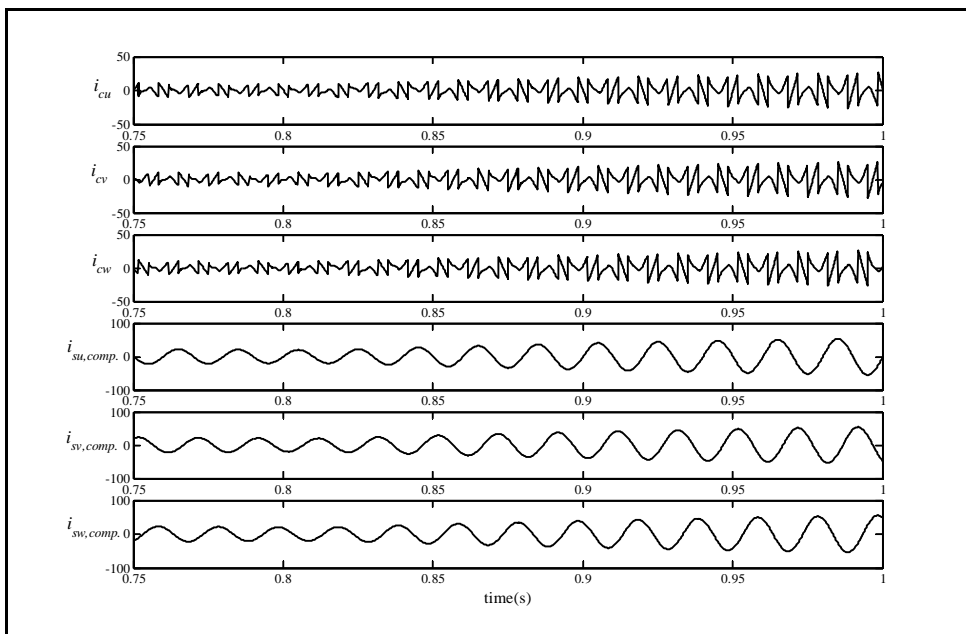
จ) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ข) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SD ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ค) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ข) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

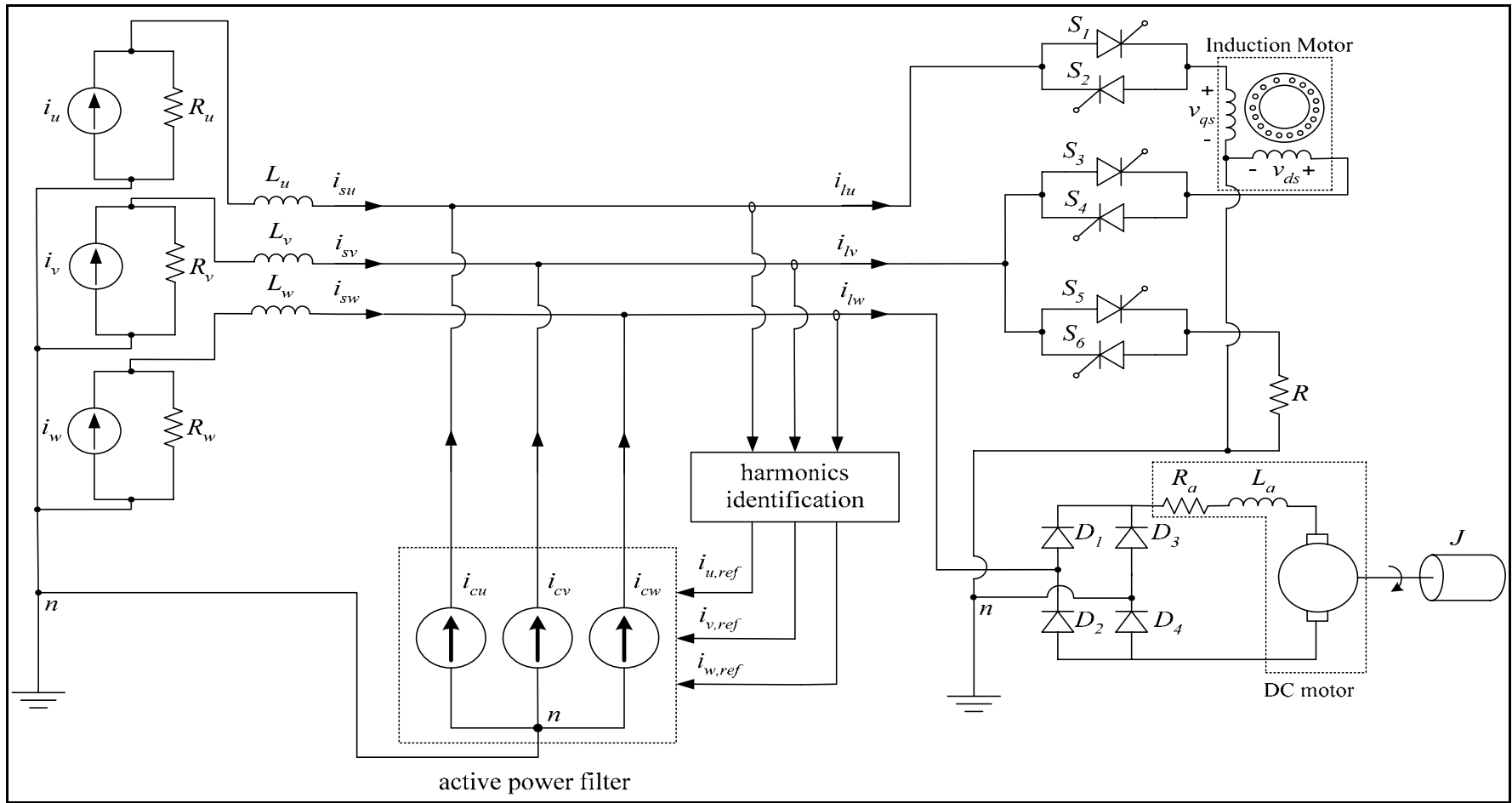
รูปที่ 7.7 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อระบบมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 7.3 ผลการจำลองสถานการณ์ในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

| วิธีการระบุ<br>เอกลักษณ์ฮาร์มอนิก | %THD <sub>i</sub><br>เฟส u | %THD <sub>i</sub><br>เฟส v | %THD <sub>i</sub><br>เฟส w | %THD <sub>i</sub><br>เฉลี่ย | <i>i<sub>su</sub></i><br>(rms) | <i>i<sub>sv</sub></i><br>(rms) | <i>i<sub>sw</sub></i><br>(rms) | unbalance<br>(%) |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|
| ก่อนการชดเชย                      | 28.46                      | 29.28                      | 28.15                      | 28.63                       | 41.09                          | 41.09                          | 41.09                          | 0                |
| หลังการชดเชย                      |                            |                            |                            |                             |                                |                                |                                |                  |
| วิธี PQ                           | 0.52                       | 1.12                       | 1.17                       | 0.98                        | 39.76                          | 39.76                          | 39.76                          | 0                |
| วิธี DQ                           | 0.79                       | 1.22                       | 1.28                       | 1.12                        | 39.75                          | 39.75                          | 39.75                          | 0                |
| วิธี SD                           | 0.60                       | 1.27                       | 1.33                       | 1.12                        | 39.00                          | 39.00                          | 39.00                          | 0                |
| วิธี SWFA                         | 0                          | 0                          | 0                          | 0                           | 38.20                          | 38.20                          | 38.20                          | 0                |
| วิธี DQF                          | 0                          | 0                          | 0                          | 0                           | 38.20                          | 38.20                          | 38.20                          | 0                |

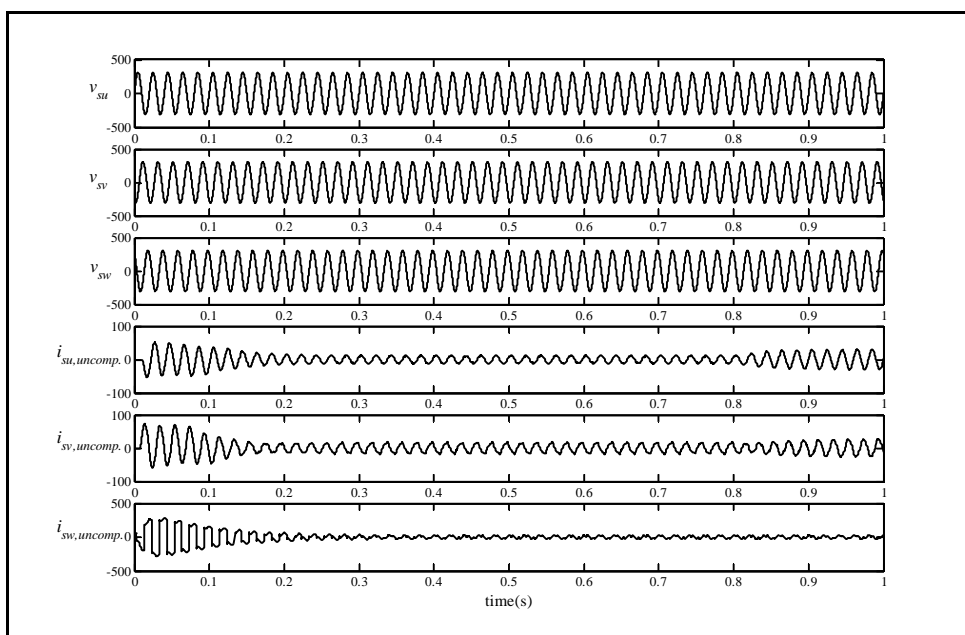
## 7.6 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในหัวข้อนี้แสดงไว้ในรูปที่ 7.8 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 ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรถ่ายแยกส่วนจะใช้ค่าเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในหัวข้อที่ 7.5 ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ประกอบด้วย ค่า  $r_{qs}$  เท่ากับ 2.6 โอห์ม ค่า  $r_{ds}$  เท่ากับ 1.3 โอห์ม ค่า  $r_{rr}$  เท่ากับ 2.01 โอห์ม ค่า  $L_{mqs}$  เท่ากับ 0.2785 เฮนรี ค่า  $L_{lr}$  เท่ากับ 0.0074 เฮนรี ค่า  $L_{lqs}$  และ  $L_{lds}$  เท่ากับ 0.0053 เฮนรี ค่า  $J$  เท่ากับ 0.3 กิโลกรัม×เมตร<sup>2</sup> และค่า  $B_m$  เท่ากับ 0.005 นิวตัน×เมตร×วินาที/เรเดียน (Rahim, 2002) นอกจากนี้ในการจำลองสถานการณ์ กำหนดให้มุมจุดชนวนเกทของเอสซีอาร์  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  และ  $S_4$  ที่ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 7.8 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 7.9 ก) จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าในช่วง 0.3 วินาทีแรก  $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$  มีค่าสูงมากและมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงการเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ การจำลองสถานการณ์ดังกล่าว กำหนดให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อกับโหลด 2 นิวตัน×เมตร และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสต่อกับโหลด 40 นิวตัน×เมตร ที่เวลาดังกล่าว 0.8 วินาทีเป็นต้นไป ด้วยเหตุนี้ค่ากระแส  $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$  จึงมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 0.8 เป็นต้นไปและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.9 วินาที โดยดูได้จากรูปที่ 7.9 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 PQ DQ SD SWFA และ DQF แสดงไว้ดังรูปที่ 7.9 ค) ถึง 7.9 ช) ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวสังเกตได้ว่าก่อนการชดเชย กระแส  $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$  มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ และมีแอมพลิจูดไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลให้ระบบอยู่ในสภาวะไม่สมดุลก่อนการชดเชย โดยดูได้จากรูปที่ 7.9 ข) อีกทั้งค่า %unbalance ก่อนการชดเชยในตารางที่ 7.4 มีค่าเท่ากับ 6.15 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่หลังการชดเชยกระแส  $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$  มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น ทั้งนี้อาจดูได้จากค่า %THD<sub>i</sub> จากตารางที่ 7.4 โดยที่ค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 28.39 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายหลังการชดเชย

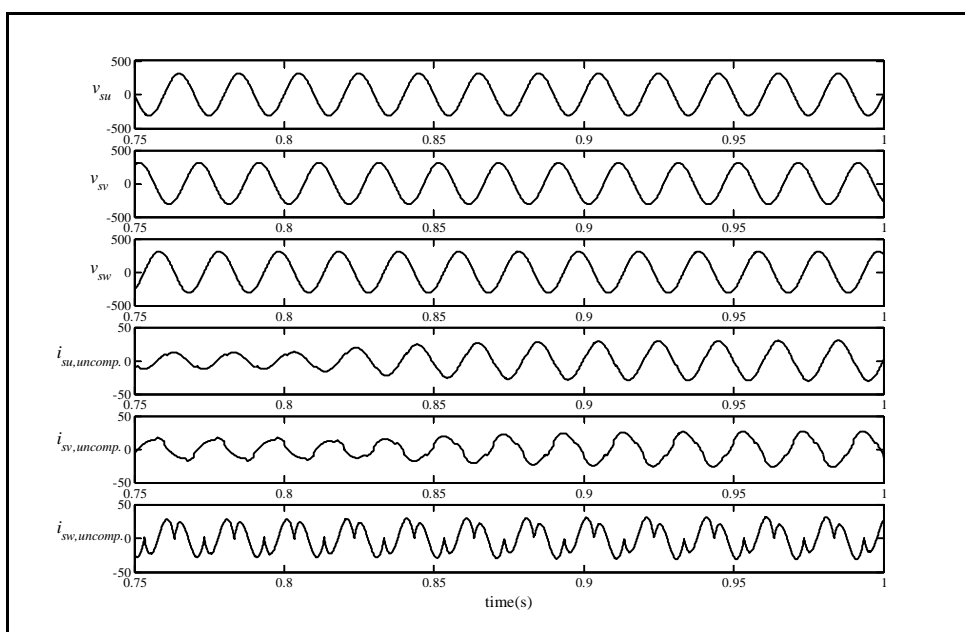


รูปที่ 7.8 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

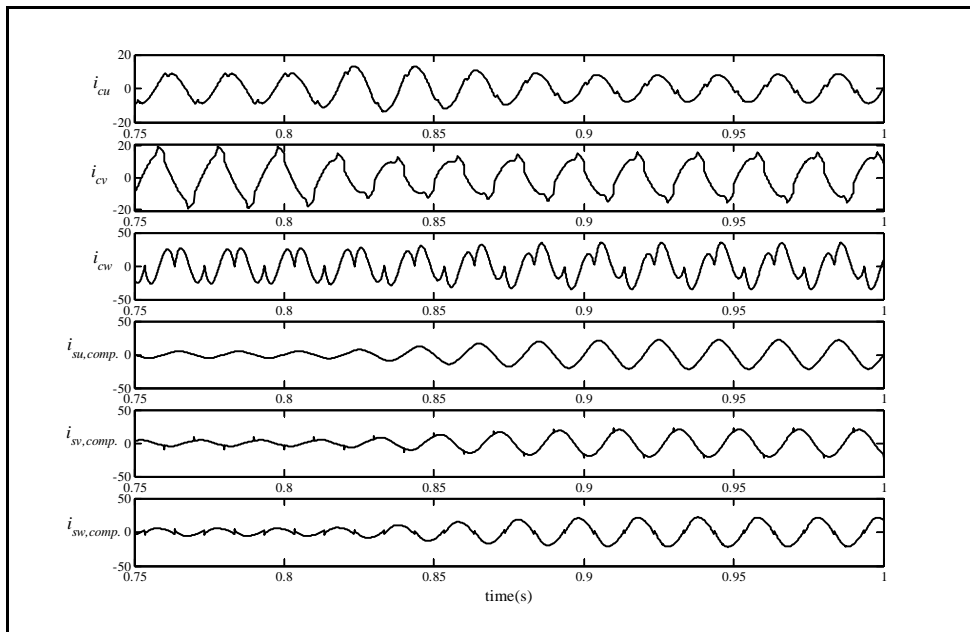




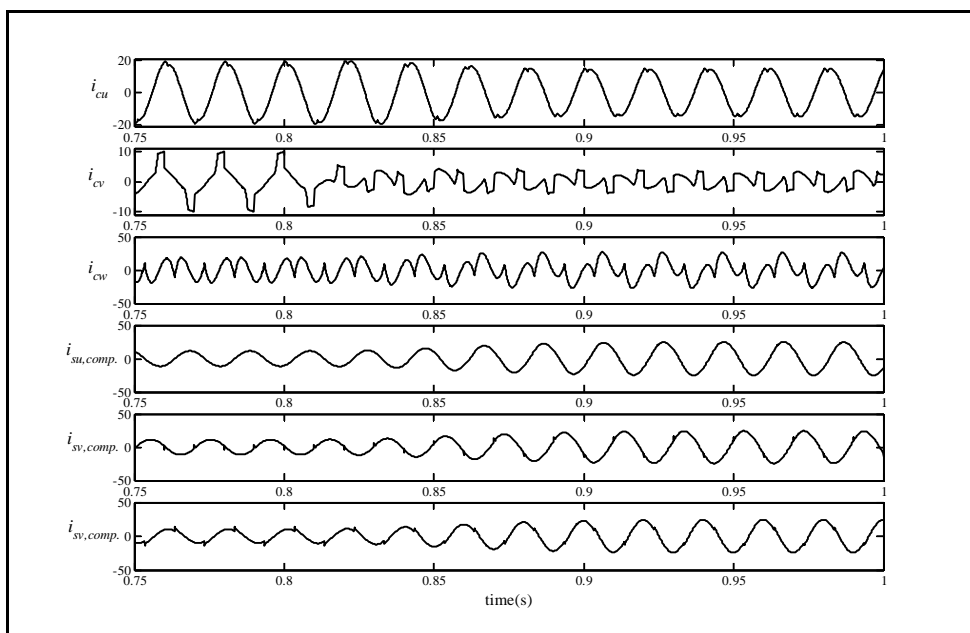
ก) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย



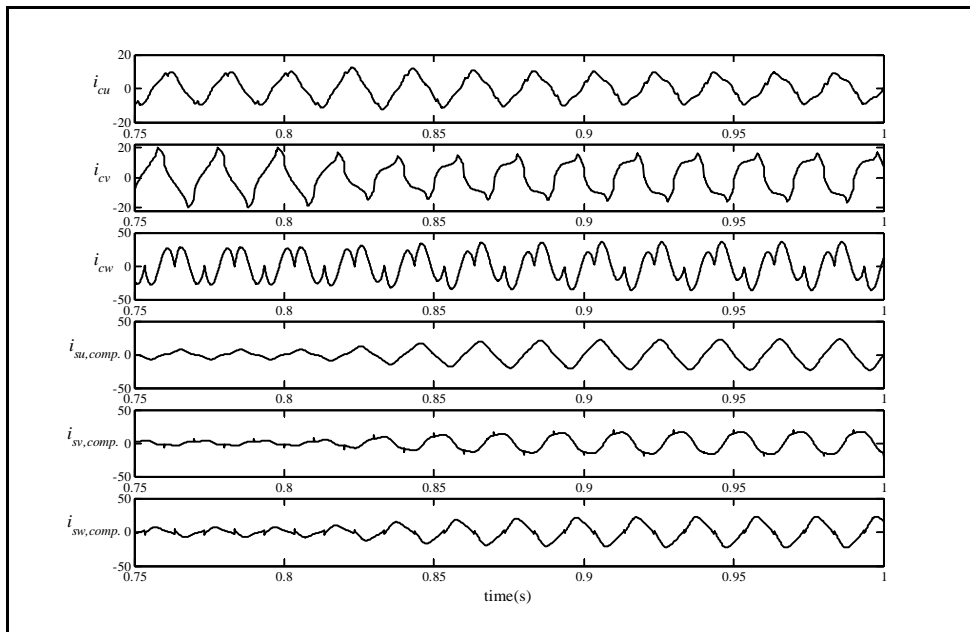
ข) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย  
เมื่อพิจารณาผลในช่วงเวลา 0.75 ถึง 1 วินาที



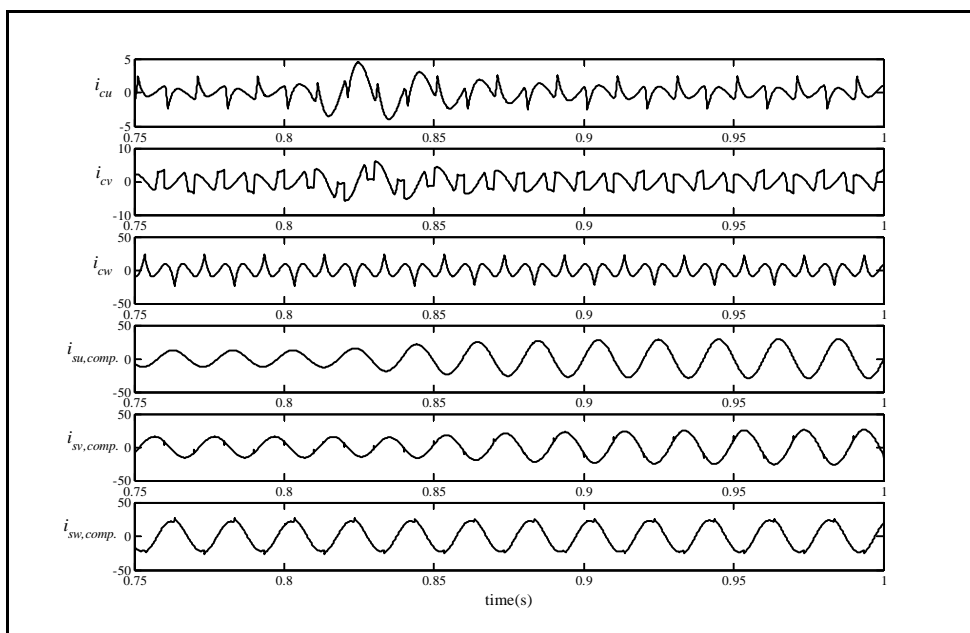
ก) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี PQ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



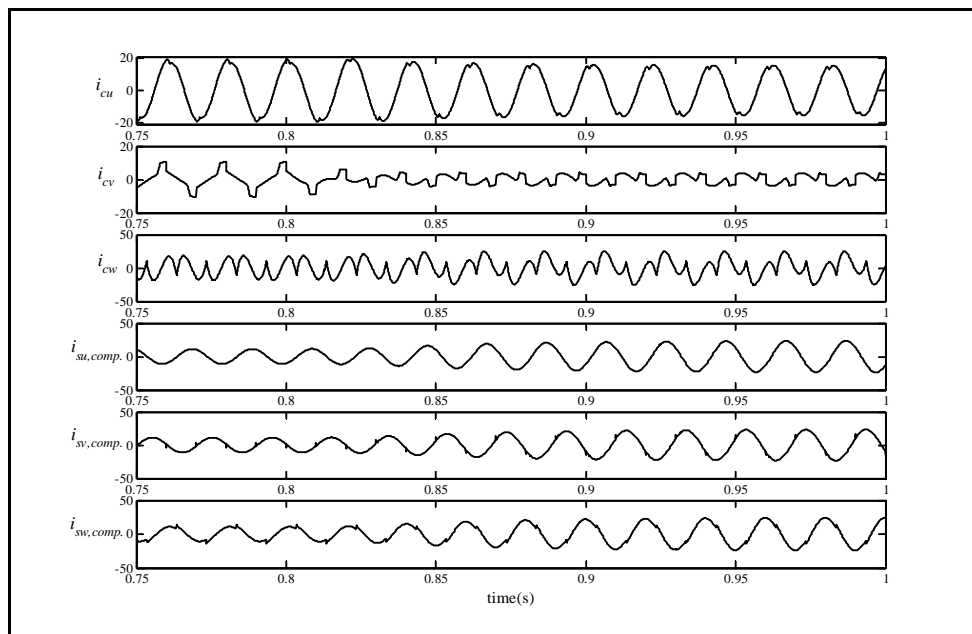
ง) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ข) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SD ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ค) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก



ข) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

รูปที่ 7.9 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุล  
ในแต่ละเฟส

ตารางที่ 7.4 ผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะที่ระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุล  
ในแต่ละเฟส

| วิธีการระบุเอกลักษณ์<br>ฮาร์มอนิก | %THD <sub>i</sub><br>เฟส u | %THD <sub>i</sub><br>เฟส v | %THD <sub>i</sub><br>เฟส w | %THD <sub>i</sub><br>เฉลี่ย | $i_{su}$<br>(rms) | $i_{sv}$<br>(rms) | $i_{sw}$<br>(rms) | unbalance<br>(%) |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| ก่อนการชดเชย                      | 3.68                       | 10.52                      | 47.89                      | 28.39                       | 20.96             | 18.79             | 19.49             | 6.15             |
| หลังการชดเชย                      |                            |                            |                            |                             |                   |                   |                   |                  |
| วิธี PQ                           | 2.25                       | 2.05                       | 6.04                       | 3.91                        | 14.87             | 14.53             | 14.96             | 1.74             |
| วิธี DQ                           | 1.02                       | 1.59                       | 4.55                       | 2.84                        | 17.65             | 17.08             | 17.13             | 2.10             |
| วิธี SD                           | 8.77                       | 9.72                       | 11.99                      | 10.25                       | 15.22             | 15.04             | 15.10             | 0.66             |
| 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             |

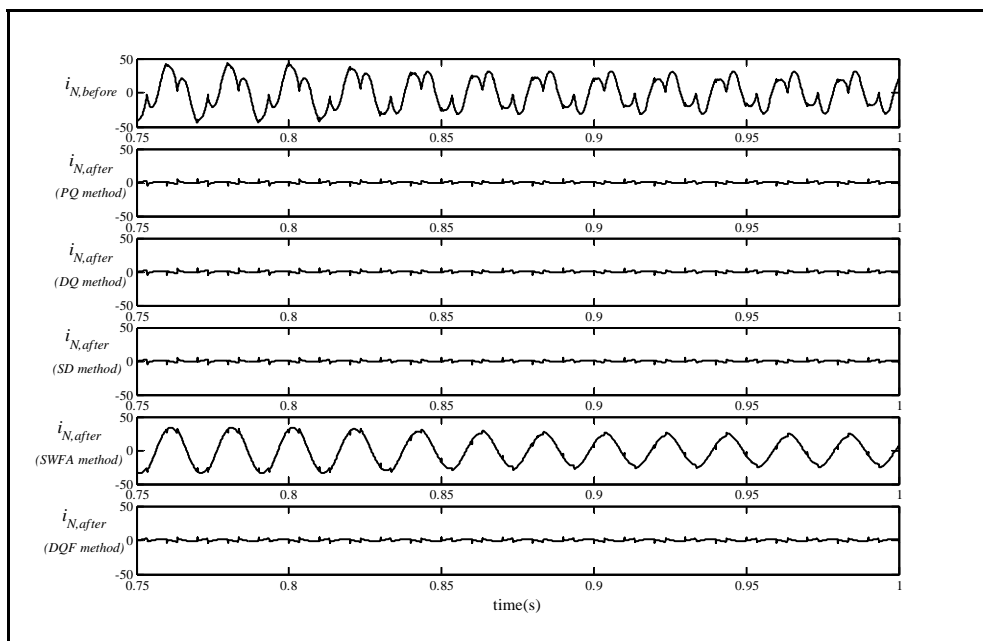
สังเกตได้ว่าวิธี DQF ให้ข้อมูลปริมาณฮาร์มอนิกที่มีความถูกต้องสูงที่สุด จึงนำไปสู่การกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ โดยค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชยที่อาศัยวิธีการระบุ

เอกลักษณ์ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 1.60 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD ส่งผลให้ภายหลังกำจัดฮาร์มอนิกมีค่า %THD<sub>i</sub> เหลือเท่ากับ 10.25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากที่สุด และมีค่าสูงกว่าที่กำหนดโดย IEEE Std. 519-1992 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธี SD ตามที่อธิบายไว้ในบทที่ 4 มีการพึ่งพาค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟส ที่คำนวณตามสมการที่ (4-25) ถึง (4-27) ซึ่งการคำนวณนั้นอาศัยค่าแรงดันไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ดังนั้น แม้ว่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากันดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 7.4 แต่การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสตามวิธี SD จะให้ผลลัพธ์ที่เท่ากัน ซึ่งในความเป็นจริง ถ้ากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีค่าเท่ากัน ค่ากำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้ต้องมีค่าไม่เท่ากันด้วย จากเหตุผลข้างต้นจึงส่งผลให้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD ให้ข้อมูลฮาร์มอนิกได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสมดุลภายหลังการชดเชย พบว่าการชดเชยฮาร์มอนิกที่อาศัยวิธี DQF เป็นวิธีการระบุเอกลักษณ์สามารถรักษาสภาพสมดุลภายหลังการชดเชยได้ดีที่สุด ซึ่งค่า %unbalance ที่แสดงไว้ในตารางที่ 7.4 มีค่าเท่ากับ 0.16 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การชดเชยฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ไม่สามารถรักษาสภาพสมดุลภายหลังการชดเชยได้เลย ซึ่งค่า %unbalance ที่แสดงไว้ในตารางที่ 7.4 มีค่าเท่ากับ 10.03 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการชดเชยฮาร์มอนิกที่อาศัยวิธี PQ DQ และ SD ในการระบุเอกลักษณ์ สามารถรักษาสภาพสมดุลได้บ้างภายหลังการชดเชย แต่ไม่ดีเท่ากับการชดเชยที่ใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ สาเหตุที่การชดเชยฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ไม่สามารถรักษาสภาพสมดุลไว้ได้ภายหลังการชดเชย เนื่องจากการชดเชยที่อาศัยวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกดังกล่าวไม่มีการคำนวณค่ากระแสซีควนซ์ศูนย์ (zero sequence) เหมือนกับวิธี DQF ซึ่งในสภาวะไม่สมดุลของระบบ จะมีค่ากระแสซีควนซ์ศูนย์เกิดขึ้น และถ้าไม่มีการชดเชยกระแสดังกล่าว ค่ากระแสซีควนซ์ศูนย์จึงยังปรากฏอยู่ ทำให้ระบบนั้นคงอยู่ในสภาวะไม่สมดุล ส่วนการชดเชยที่ใช้วิธี SD ในการระบุเอกลักษณ์สามารถรักษาสภาพสมดุลไว้ได้ภายหลังการชดเชยเนื่องจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้มีเงื่อนไขว่า ภายหลังการชดเชยระบบต้องอยู่ในสภาวะสมดุล (รายละเอียดต่าง ๆ ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4) นอกจากนี้การจำลองสถานการณ์มีการคำนวณค่ากระแสในสายนิวทรัล ( $i_N$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสซีควนซ์ศูนย์ ( $i_0$ ) ดังสมการที่ (7-4) โดยที่กระแสในสายนิวทรัลภายหลัง

$$i_N = \sqrt{3} \times i_0 \quad (7-4)$$

การชดเชย ( $i_{N,after}$ ) ที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธี แสดงไว้ดังรูปที่ 7.10 โดยที่กราฟ  $i_{N,before}$  ในรูปแสดงกระแสในสายนิวทรัลก่อนการชดเชย ซึ่งอาจสังเกตได้ว่า ระบบก่อนการ

ชดเชยมีกระแสในสายนิวทรัล และระบบอยู่ในสภาวะไม่สมดุล แต่ภายหลังการชดเชยที่ใช้วิธีการ  
 ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ DQ SD และ DQF มีกระแสในสายนิวทรัลน้อยมาก เมื่อเทียบ



รูปที่ 7.10 กระแสในสายนิวทรัลก่อนและหลังการชดเชยเมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟส  
 ต่อกับ โหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

กับสภาวะก่อนการชดเชย ส่วนภายหลังการชดเชยที่ใช้วิธี SWFA ระบุเอกลักษณ์ยังคงมีกระแสใน  
 สายนิวทรัล โดยจากรูปที่ 7.10 สังเกตได้ว่าการชดเชยที่ใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์กำจัดแต่  
 เฉพาะฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลเท่านั้น แต่ไม่ได้กำจัดกระแสในสายนิวทรัลแต่อย่างใด นอกจากนี้เมื่อ  
 พิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ในสภาวะชั่วคราว สังเกตได้ว่า เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และ  
 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส เริ่มขับโหลดที่เวลา 0.8 วินาที กระแส  $i_{cu}$ ,  $i_{cv}$  และ  $i_{cw}$  ที่ได้จาก  
 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธี ดังรูปที่ 7.9 ค) ถึง 7.9 ข) เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่เวลา  
 ดังกล่าวด้วยเช่นกัน จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 0.9 วินาที ทั้งนี้เนื่องจากการระบุเอกลักษณ์  
 ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่นำเสนอ มีการปรับเปลี่ยนปริมาณฮาร์มอนิกที่ได้จากการระบุ  
 เอกลักษณ์ ตามการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแส  $i_{su,uncomp}$ ,  $i_{sv,uncomp}$  และ  $i_{sw,uncomp}$  ด้วยเหตุนี้จึง  
 ส่งผลให้กระแส  $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$  ภายหลังการชดเชย มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณ  
 ไซน์ ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างฉับพลัน

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกที่นำเสนอในบทนี้ ระบบที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก 5 วิธี มีทั้งหมด 4 ระบบด้วยกัน โดยในส่วนแรกเป็นระบบที่อยู่ในสถานะสมดุลก่อนการชดเชย ซึ่งได้นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ไว้ในหัวข้อที่ 7.3 ถึง 7.5 และในส่วนที่สองเป็นระบบที่อยู่ในสถานะไม่สมดุลก่อนการชดเชย ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 7.6 จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า วิธี DQF และ SWFA ให้ผลการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกได้ดีที่สุด จึงส่งผลให้กำจัดฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นได้มากที่สุดในทุกสถานะของระบบที่มีการทดสอบ ในขณะที่การชดเชยที่อาศัยวิธี PQ และ DQ ในการระบุเอกลักษณ์ให้ผลการกำจัดฮาร์โมนิกอยู่ในกรอบมาตรฐานของ IEEE Std. 519-1992 ในทุกสถานะของระบบที่มีการทดสอบ แต่ผลการกำจัดฮาร์โมนิกไม่ดีเมื่อเทียบกับการชดเชยที่อาศัยวิธี DQF และ SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธี PQ และ DQ ใช้วงจรกรองผ่านสูงในการแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิก ออกจากองค์ประกอบมูลฐาน ซึ่งการใช้วงจรดังกล่าวไม่สามารถแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิกได้อย่างสมบูรณ์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ความถี่ตัดของวงจรดังกล่าวเท่ากับ 150 เฮิร์ตซ์ สำหรับวิธี PQ และ 5 เฮิร์ตซ์สำหรับวิธี DQ ซึ่งเป็นค่าที่ได้ทดสอบด้วยการลองผิดลองถูกแล้วพบว่าสามารถแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิก ออกจากองค์ประกอบมูลฐานได้ค่อนข้างดี ส่วนการชดเชยที่ใช้วิธี SD ระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก สามารถกำจัดฮาร์โมนิกอยู่ในกรอบมาตรฐานของ IEEE Std. 519-1992 ในกรณีที่โหลดของระบบอยู่ในสถานะสมดุลก่อนการชดเชยเท่านั้น แต่ถ้าโหลดของระบบอยู่ในสถานะไม่สมดุลก่อนการชดเชย พบว่าการชดเชยที่ใช้วิธี SD ในการระบุเอกลักษณ์ไม่สามารถกำจัดฮาร์โมนิกได้ตามที่มาตรฐานของ IEEE Std. 519-1992 กำหนด ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการระบุเอกลักษณ์ของวิธี SD ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 7.6 นอกจากนี้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกด้วยวิธี SD ใช้วงจรกรองผ่านต่ำในการแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิก ออกจากองค์ประกอบมูลฐาน ซึ่งการใช้วงจรดังกล่าวไม่สามารถแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิกได้อย่างสมบูรณ์ จึงส่งผลให้การชดเชยที่อาศัยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกด้วยวิธี SD ให้ผลการกำจัดฮาร์โมนิกได้ไม่ดีเท่าที่ควร โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ความถี่ตัดของวงจรดังกล่าวเท่ากับ 115 เฮิร์ตซ์ เป็นค่าที่ได้จากการลองผิดลองถูกจนพบว่า สามารถแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิกออกจากองค์ประกอบมูลฐานได้ค่อนข้างดี

ถ้าพิจารณาการรักษาสถานะสมดุลหลังการชดเชย สังเกตได้ว่า การชดเชยที่ใช้วิธี DQF ระบุเอกลักษณ์ สามารถทำให้ระบบที่อยู่ในสถานะไม่สมดุลก่อนการชดเชย กลับสู่สถานะสมดุลหลังการชดเชยได้ โดยดูได้จากผลการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อที่ 7.6 ส่วนการชดเชยที่อาศัยวิธี PQ DQ และ SD ในการระบุเอกลักษณ์สามารถรักษาสถานะสมดุลหลังการชดเชยได้เช่นกัน แต่ไม่ดีเท่ากับวิธี DQF ส่วนการชดเชยที่ใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ไม่สามารถรักษาสถานะสมดุลได้เลย ทั้งนี้เนื่องมาจากวิธี SWFA ไม่มีการคำนวณกระแสรีแอกทีฟ ซึ่งทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ไม่สามารถวัดกระแสชดเชยในส่วนนี้ได้ จากผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดเกณฑ์ในการชี้วัดสมรรถนะของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก โดยมีค่า %THD<sub>i</sub> และค่า %unbalance หลังการชดเชยเป็นตัวบ่งชี้ เกณฑ์ดังกล่าวได้รับการแสดงไว้ในตารางที่ 7.5 ส่วนตารางที่ 7.6 แสดงคุณภาพสมรรถนะของการใช้วิธีระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี ซึ่งอาจสรุปได้ว่าการชดเชยที่อาศัยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด และสามารถรักษาสภาพสมดุลของระบบสามเฟสภายหลังการชดเชยได้อีกด้วย

ตารางที่ 7.5 เกณฑ์ในการชี้วัดสมรรถนะการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

| 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 7.6 สมรรถนะของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในแต่ละวิธี

| สถานะโหลดของระบบ                                                   | วิธี PQ                                          | วิธี DQ | วิธี SD   | วิธี SWFA | วิธี DQF |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------|-----------|-----------|----------|
|                                                                    | สมรรถนะในด้านการกำจัดฮาร์มอนิก                   |         |           |           |          |
| วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว        | ดี                                               | ดี      | ดี        | ดีมาก     | ดีมาก    |
| วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ | ดี                                               | ดี      | ดี        | ดีมาก     | ดีมาก    |
| วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง              | ดี                                               | ดี      | ดี        | ดีมาก     | ดีมาก    |
| ระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุล                               | ดี                                               | ดี      | ใช้ไม่ได้ | ดี        | ดี       |
| สถานะโหลดของระบบ                                                   | สมรรถนะในด้านการรักษาภาวะสมดุลหลังกำจัดฮาร์มอนิก |         |           |           |          |
| ระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุล                               | ดี                                               | ดี      | ดี        | ใช้ไม่ได้ | ดี       |

ถ้าพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะชั่วคราว ของระบบต่าง ๆ ที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก 5 วิธี พบว่า การชดเชยฮาร์มอนิกที่อาศัยวิธีการระบุเอกลักษณ์วิธีต่าง ๆ ให้ผลการชดเชยเป็นที่น่าพอใจถึงแม้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบอย่างฉับพลัน การระบุเอกลักษณ์ทั้ง 5 วิธี ยังสามารถให้ข้อมูลฮาร์มอนิกที่เปลี่ยนแปลงตามสถานะโหลดของระบบได้อย่างดี แต่ระยะเวลาในการลู่เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี



ต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกในแต่ละวิธี ซึ่งได้แทรกการอธิบายไว้แล้วในแต่ละหัวข้อ

### 7.7 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับระบบที่ใช้ทดสอบในทางปฏิบัติ

โหลดไม่เป็นเชิงเส้นของระบบที่ใช้ในการทดสอบในทางปฏิบัติ ได้แก่ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ การทดสอบดังกล่าวมีการลดพิคกิ้งแรงดันไฟฟ้าของระบบสามเฟส จาก 220 โวลต์อาร์เอ็มเอสในแต่ละเฟส เหลือเพียง 60 โวลต์อาร์เอ็มเอส ทั้งนี้เพื่อลดพิคกิ้งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับการสร้างวงจรรอกำลังแอกทีฟ ซึ่งผลการทดสอบในทางปฏิบัติแสดงไว้ในบทที่ 9 แต่สำหรับหัวข้อนี้ เป็นการนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิก ที่ใช้วิธี DQF สำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก โดยในระบบแรกเป็นการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว ซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 400 โอห์ม ระบบที่สองเป็นการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์มีค่าเท่ากับ 300 โอห์ม และ 1.95 เฮนรี ตามลำดับ การจำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้ มีการพิจารณาความสมจริงในด้านตัวประมวลผลดิจิทัล ย่อมปรากฏความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ (quantization errors) และในสภาพการปฏิบัติงานตามความจริงที่มีสัญญาณรบกวนต่าง ๆ เกิดขึ้นในระบบอยู่ตลอดเวลา จึงได้พิจารณาผลจากการรบกวนดังกล่าวเป็นสัญญาณรบกวนขาว (white noise) ที่แทรกสอดเข้าไปสู่สัญญาณกระแสชดเชย ดังนั้น จึงได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์ในสามขั้นตอนเพื่อแสดงให้เห็นถึงความไม่สมบูรณ์แบบในระบบจริง ในขั้นตอนแรก การคำนวณเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกด้วยวิธี DQF ได้พิจารณาถึงผลกระทบเนื่องจากความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ ทั้งนี้เพื่อให้เห็นสอดคล้องกับทางปฏิบัติที่ใช้การ์ด DSP เป็นตัวคำนวณ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ในตอนแรกนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 7.11 และตารางที่ 7.7 ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว ส่วนผลการจำลองสถานการณ์กรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ แสดงไว้ดังรูปที่ 7.12 และตารางที่ 7.8 ตอนที่สองได้พิจารณาถึงผลจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ โดยการใส่สัญญาณรบกวนให้กับกระแสชดเชย สัญญาณรบกวนนี้สร้างจากกล่องเครื่องมือของโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงไว้ดังรูปที่ 7.13 และตารางที่ 7.9 สำหรับโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว ถ้าโหลดเป็นความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงไว้ดังรูปที่ 7.14 และตารางที่ 7.10 ตอนที่สามได้พิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ควบคู่ไปกับการใส่สัญญาณรบกวน เพื่อ

ให้ผลการจำลองสถานการณ์เกิดความสมจริงมากขึ้น ผลการจำลองสถานการณ์ในตอนนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 7.15 และตารางที่ 7.11 ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว ส่วนผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 7.16 และตารางที่ 7.12 เป็นผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 7.7 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ใน

สถานะที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

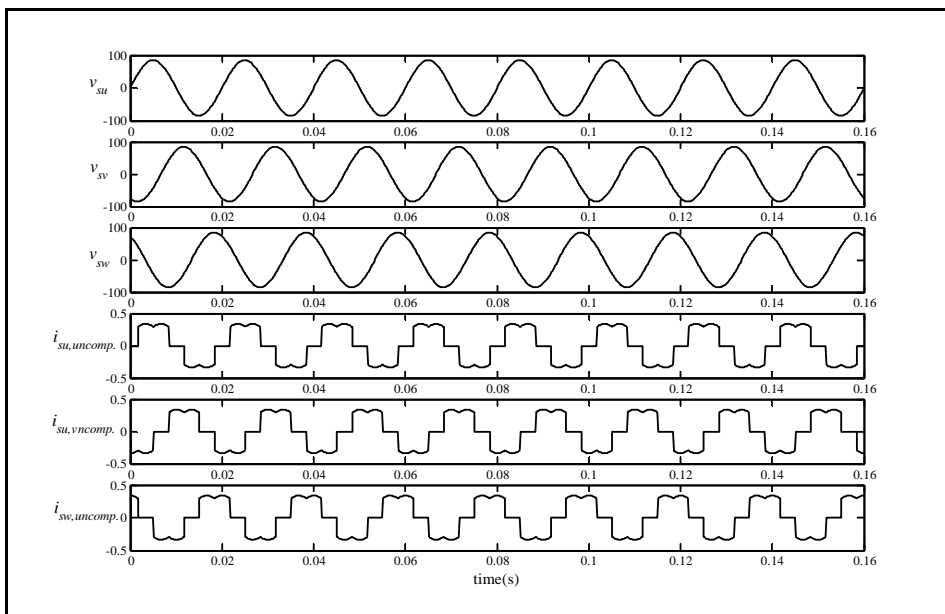
| สถานะของระบบ | %THD <sub>i</sub><br>เฟส u | %THD <sub>i</sub><br>เฟส v | %THD <sub>i</sub><br>เฟส w | %THD <sub>i</sub><br>เฉลี่ย | $i_{su}$<br>(rms) | $i_{sv}$<br>(rms) | $i_{sw}$<br>(rms) | unbalance<br>(%) |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| ก่อนการชดเชย | 28.28                      | 28.93                      | 28.96                      | 28.73                       | 0.26              | 0.26              | 0.26              | 0                |
| หลังการชดเชย | 0.90                       | 0.89                       | 0.90                       | 0.90                        | 0.25              | 0.25              | 0.25              | 0                |

ตารางที่ 7.8 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ใน

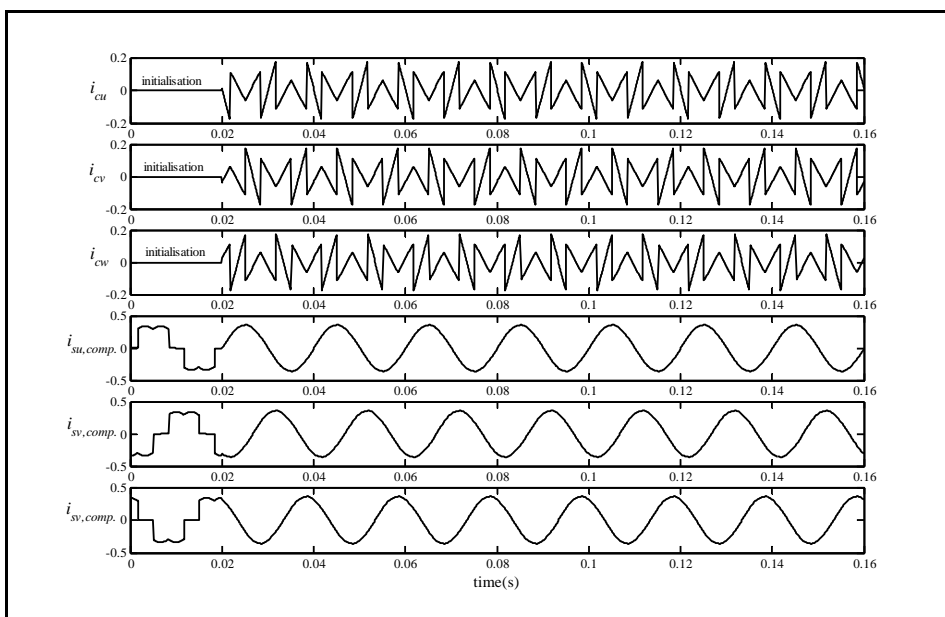
สถานะที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

| สถานะของระบบ | %THD <sub>i</sub><br>เฟส u | %THD <sub>i</sub><br>เฟส v | %THD <sub>i</sub><br>เฟส w | %THD <sub>i</sub><br>เฉลี่ย | $i_{su}$<br>(rms) | $i_{sv}$<br>(rms) | $i_{sw}$<br>(rms) | unbalance<br>(%) |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| ก่อนการชดเชย | 28.45                      | 28.96                      | 28.21                      | 28.54                       | 0.26              | 0.26              | 0.26              | 0                |
| หลังการชดเชย | 0.90                       | 0.91                       | 0.89                       | 0.90                        | 0.25              | 0.25              | 0.25              | 0                |

จากผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 7.11 ก) และรูปที่ 7.12 ก) สังเกตได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย ( $i_{su,uncomp.}$ ,  $i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$ ) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ โดยค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชยกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ มีค่าเท่ากับ 28.73 และ 28.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งดูได้จากตารางที่ 7.7 และ 7.8 เมื่อได้มีการชดเชยฮาร์มอนิกที่พิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักหลังการชดเชย ( $i_{su,comp.}$ ,  $i_{sv,comp.}$  และ  $i_{sw,comp.}$ ) มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น ดังที่แสดงไว้

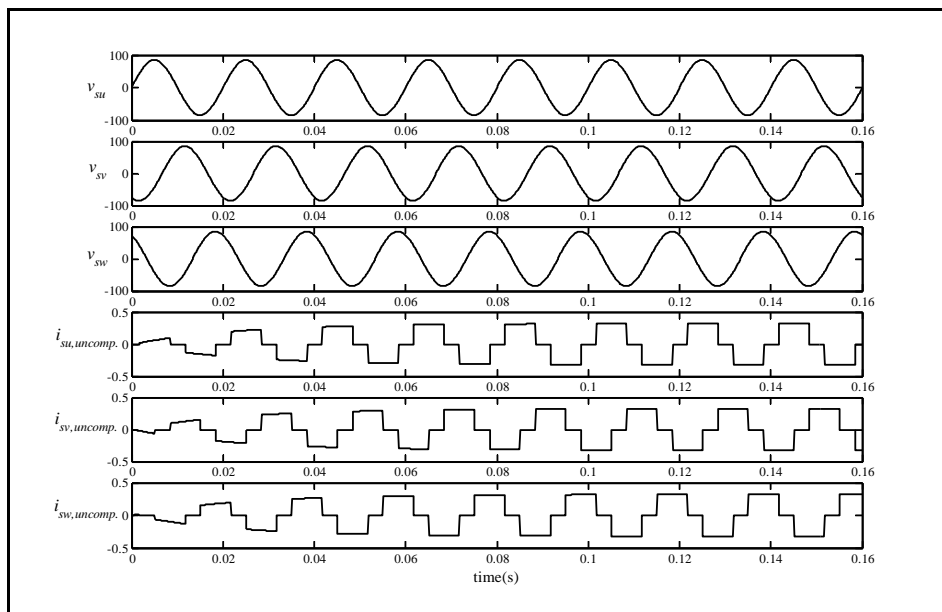


ก) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย

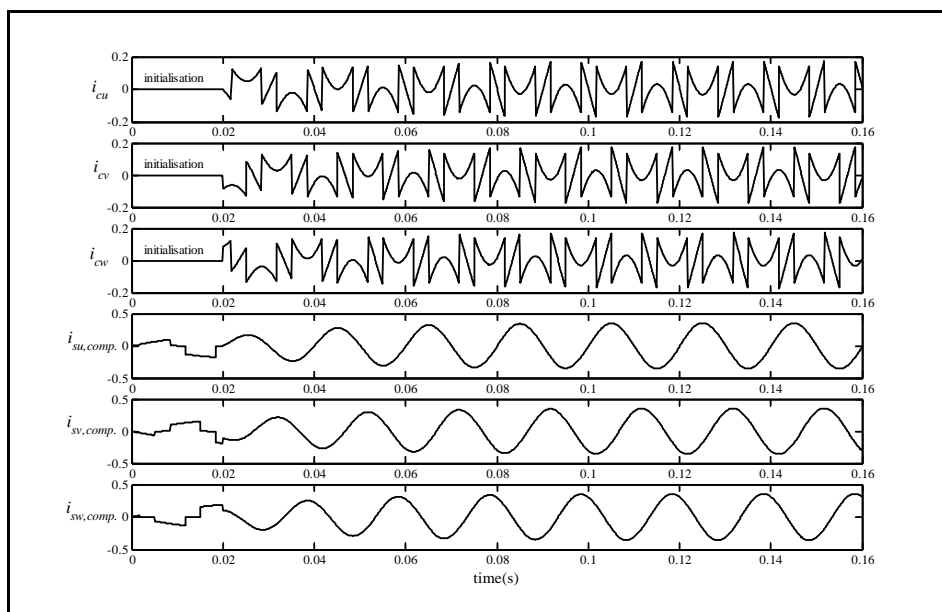


ข) ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยเมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

รูปที่ 7.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์  
ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว



ก) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย



ข) ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยเมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

รูปที่ 7.12 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์  
ในกรณีที่โหนดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

ในรูปที่ 7.11 ข) และรูปที่ 7.12 ข) โดยที่ %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.90 เปอร์เซ็นต์ ทั้งสองกรณีที่มี โหลดของวงจรเรียงกระแสต่างกัน ส่วนค่า %unbalance ก่อนและหลังการชดเชยคู่ได้จากตารางที่ 7.7 และ 7.8 ซึ่งมีค่า 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายถึงก่อนและหลังการชดเชยระบบอยู่ในสภาวะสมดุล

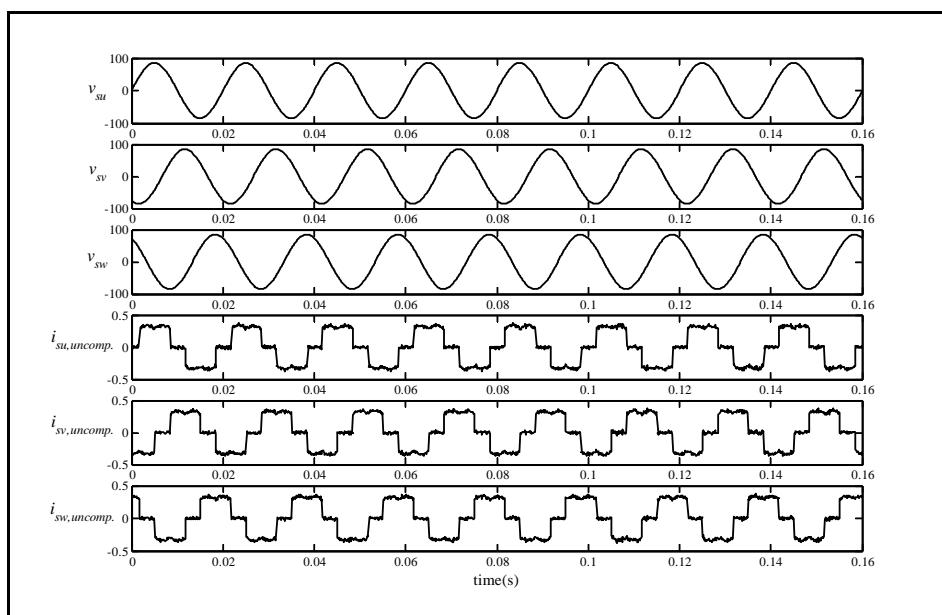
ผลการจำลองสถานการณ์ที่พิจารณาถึงผลจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ ในกรณีที่มี โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ แสดงไว้ดังรูปที่ 7.13 และ 7.14 ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ ภายหลังจากชดเชย ดังรูปที่ 7.13 ข) และ 7.14 ข) สังเกตได้ว่า  $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$  มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณมากขึ้น โดย %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชยกรณี โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานมีค่าเท่ากับ 2.28 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการชดเชย ดังตารางที่ 7.9 และในกรณีที่ โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 2.53 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 7.10 นอกจากนี้จากรูปที่ 7.13 ข) และ 7.14 ข) สังเกตได้ว่ารูปสัญญาณของ  $i_{su,comp}$ ,  $i_{sv,comp}$  และ  $i_{sw,comp}$ .

ตารางที่ 7.9 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนในสภาวะที่ โหลด  
ของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

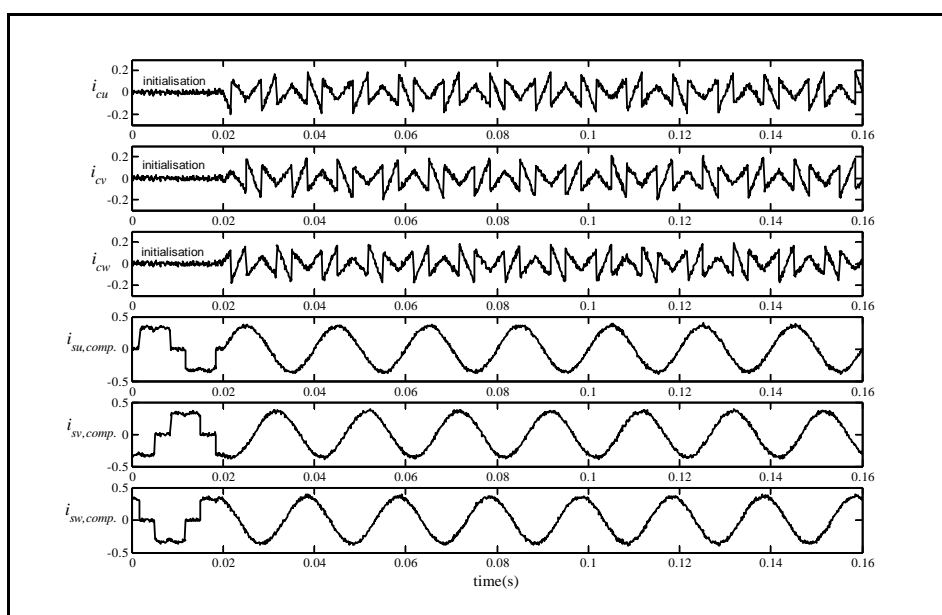
| สภาวะของระบบ | %THD <sub>i</sub><br>เฟส u | %THD <sub>i</sub><br>เฟส v | %THD <sub>i</sub><br>เฟส w | %THD <sub>i</sub><br>เฉลี่ย | $i_{su}$<br>(rms) | $i_{sv}$<br>(rms) | $i_{sw}$<br>(rms) | unbalance<br>(%) |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| ก่อนการชดเชย | 28.28                      | 28.93                      | 28.96                      | 28.73                       | 0.26              | 0.26              | 0.26              | 0                |
| หลังการชดเชย | 2.12                       | 2.39                       | 2.32                       | 2.28                        | 0.25              | 0.25              | 0.25              | 0                |

ตารางที่ 7.10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนในสภาวะที่ โหลด  
ของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

| สภาวะของระบบ | %THD <sub>i</sub><br>เฟส u | %THD <sub>i</sub><br>เฟส v | %THD <sub>i</sub><br>เฟส w | %THD <sub>i</sub><br>เฉลี่ย | $i_{su}$<br>(rms) | $i_{sv}$<br>(rms) | $i_{sw}$<br>(rms) | unbalance<br>(%) |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| ก่อนการชดเชย | 28.45                      | 28.96                      | 28.21                      | 28.54                       | 0.26              | 0.26              | 0.26              | 0                |
| หลังการชดเชย | 2.62                       | 2.37                       | 2.60                       | 2.53                        | 0.25              | 0.25              | 0.25              | 0                |

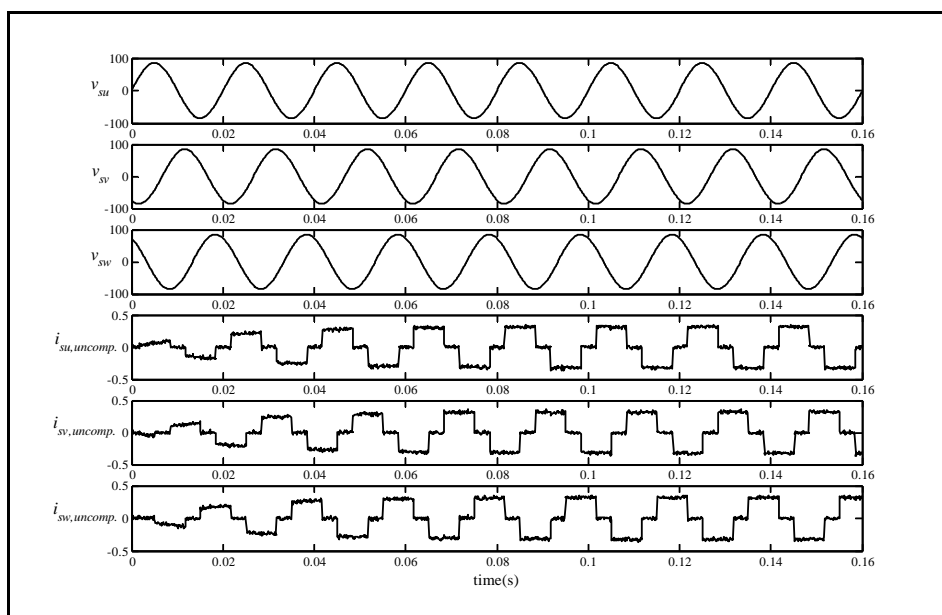


ก) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย

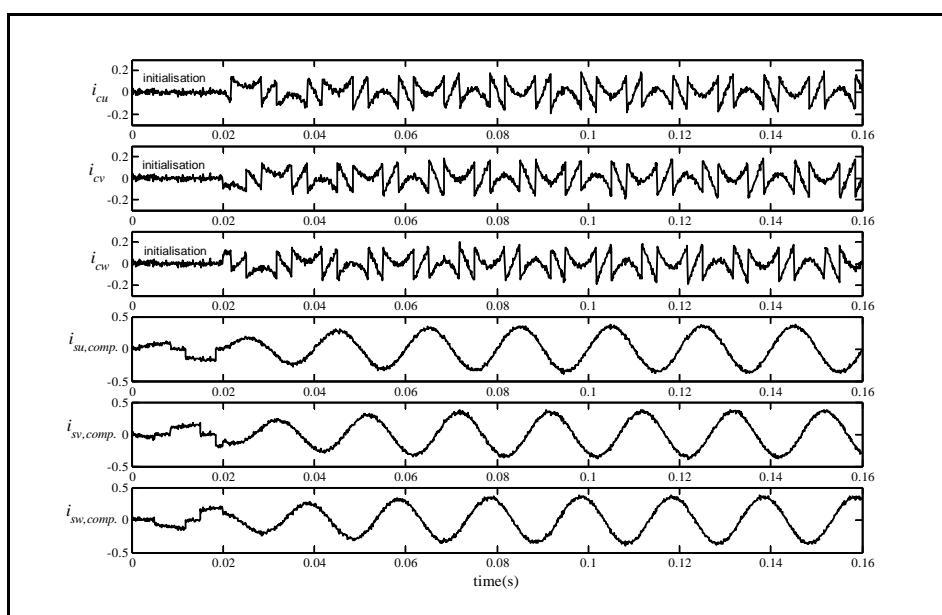


ข) ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยเมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

รูปที่ 7.13 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาผลจากสัญญาณรบกวนในกรณีที่  
โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว



ก) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย



ข) ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยเมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

รูปที่ 7.14 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาผลจากสัญญาณรบกวนในกรณีที่  
โพลของวงจรวจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

มีลักษณะแตกต่างจากผลการจำลองสถานการณ์ที่พิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ ที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้ ซึ่งรูปสัญญาณดังกล่าวมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปสัญญาณที่ได้จากการทดสอบในทางปฏิบัติมากขึ้น (ดูผลการทดสอบได้จากบทที่ 9)

ผลการจำลองสถานการณ์ที่พิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ควบคู่ไปกับการใส่สัญญาณรบกวน กรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ แสดงไว้ดังรูปที่ 7.15 และ 7.16 ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์เป็นไปในทำนองเดียวกันกับผลการจำลองสถานการณ์ที่อธิบายก่อนหน้านี้ โดย %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชย มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการชดเชย ทั้งนี้อาจดูได้จากตารางที่ 7.11 กรณีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และตารางที่ 7.12 กรณีโหลดเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ นอกจากนี้สังเกตได้ว่าเมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ควบคู่ไปกับการใส่สัญญาณรบกวน ส่งผลให้ผลการจำลองสถานการณ์ใกล้เคียงกับผลทางปฏิบัติมากขึ้น เมื่อเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ก่อนหน้านี้ (ดูผลในทางปฏิบัติในบทที่ 9)

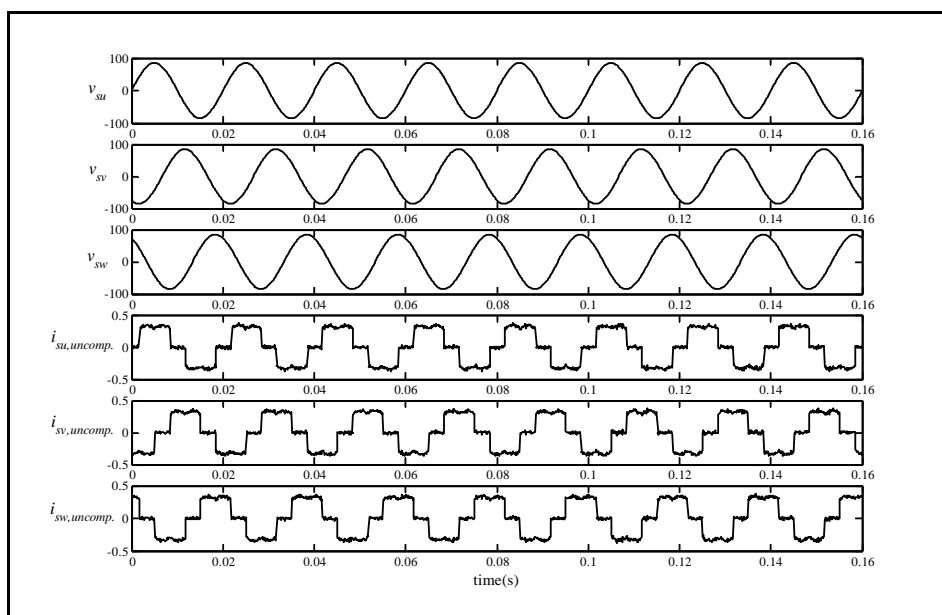
ตารางที่ 7.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ควบคู่กับสัญญาณรบกวนกรณี โหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

| สภาวะของระบบ | %THD <sub>i</sub><br>เฟส u | %THD <sub>i</sub><br>เฟส v | %THD <sub>i</sub><br>เฟส w | %THD <sub>i</sub><br>เฉลี่ย | $i_{su}$<br>(rms) | $i_{sv}$<br>(rms) | $i_{sw}$<br>(rms) | unbalance<br>(%) |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| ก่อนการชดเชย | 28.28                      | 28.93                      | 28.96                      | 28.73                       | 0.26              | 0.26              | 0.26              | 0                |
| หลังการชดเชย | 2.19                       | 2.47                       | 2.38                       | 2.35                        | 0.25              | 0.25              | 0.25              | 0                |

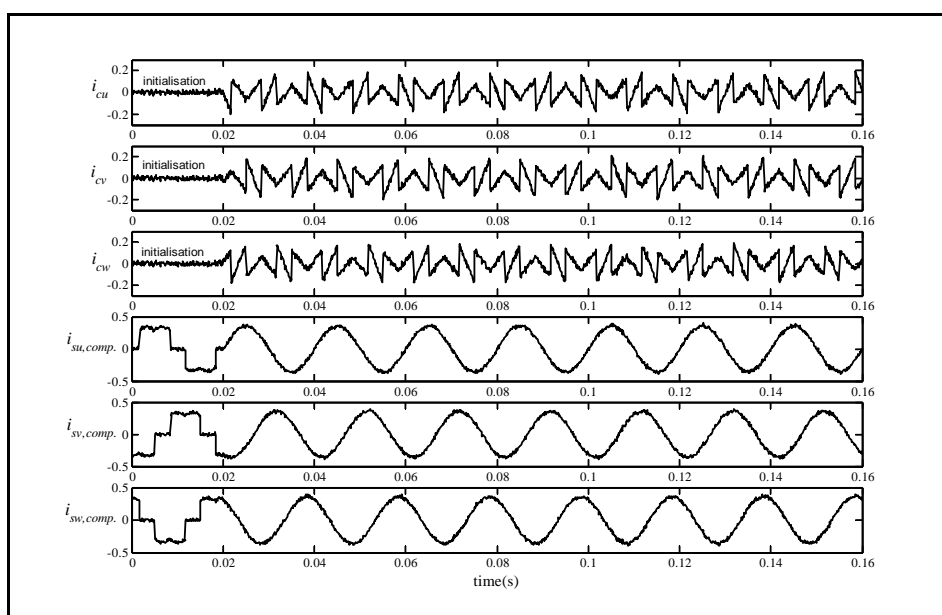
ตารางที่ 7.12 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ควบคู่กับสัญญาณรบกวนกรณี โหลดเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

| สภาวะของระบบ | %THD <sub>i</sub><br>เฟส u | %THD <sub>i</sub><br>เฟส v | %THD <sub>i</sub><br>เฟส w | %THD <sub>i</sub><br>เฉลี่ย | $i_{su}$<br>(rms) | $i_{sv}$<br>(rms) | $i_{sw}$<br>(rms) | unbalance<br>(%) |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| ก่อนการชดเชย | 28.45                      | 28.96                      | 28.21                      | 28.54                       | 0.26              | 0.26              | 0.26              | 0                |
| หลังการชดเชย | 2.71                       | 2.43                       | 2.68                       | 2.58                        | 0.25              | 0.25              | 0.25              | 0                |



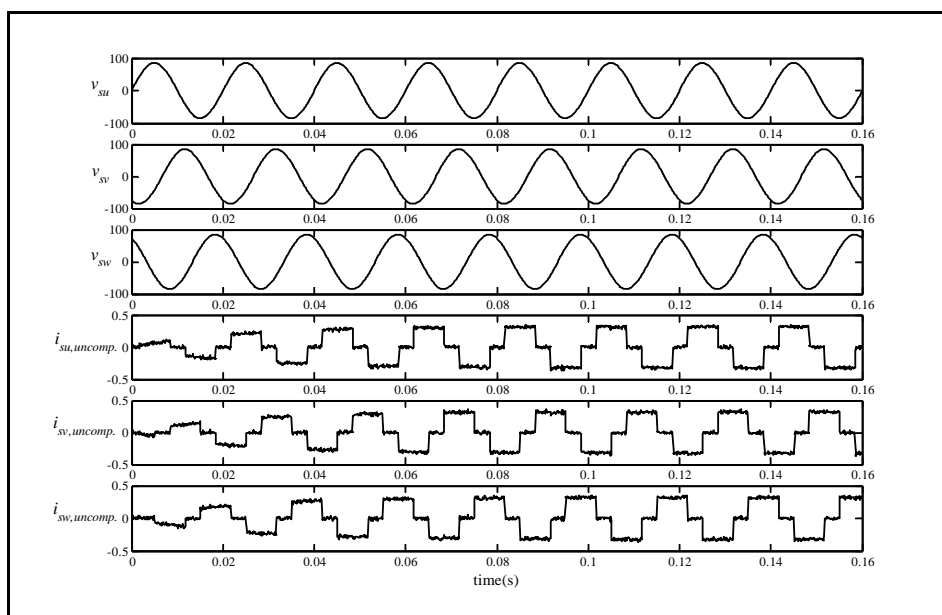


ก) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย

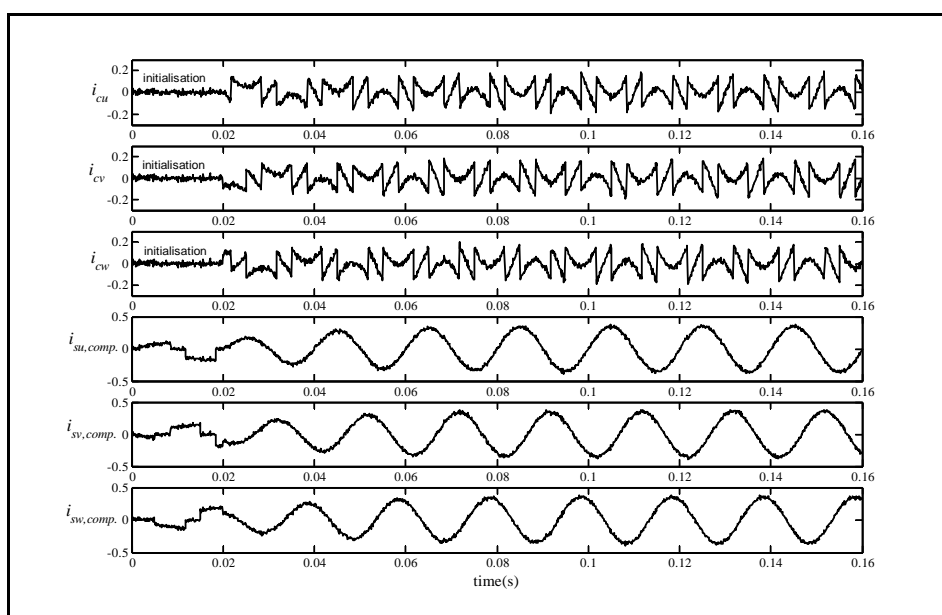


ข) ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยเมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

รูปที่ 7.15 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ควบคู่กับสัญญาณรบกวนในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว



ก) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย



ข) ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยเมื่อใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

รูปที่ 7.16 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อพิจารณาความผิดพลาดจากกระบวนการควอนไทซ์ควบคู่กับสัญญาณรบกวนในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

## 7.8 สรุป

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

## บทที่ 8

### ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ

#### 8.1 บทนำ

การนำเสนอโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกที่นำเสนอในบทนี้ ประกอบไปด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า วงจรปรุงแต่งสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ชุดระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ใช้การ์ด DSP และวงจรกรองกำลังแอกทีฟ นอกจากนี้ในบทนี้ได้นำเสนอซอฟต์แวร์ สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ที่โปรแกรมด้วยภาษาซีบนการ์ด DSP ซึ่งวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ใช้ คือ วิธี DQF ดังรายละเอียดที่อธิบายไว้ในบทที่ 5 ส่วนผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ตามที่อธิบายไว้ในบทนี้ จะนำเสนอไว้ในบทที่ 9

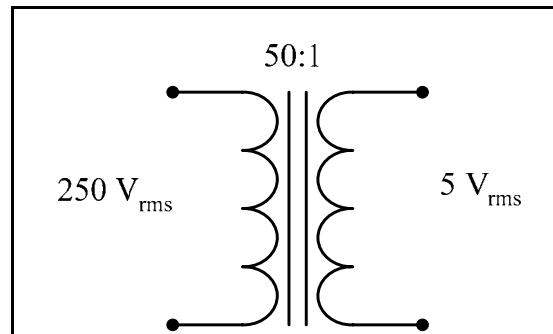
#### 8.2 อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ที่ใช้การ์ด DSP ในการประมวลผล มีความจำเป็นต้องตรวจวัดกระแสไฟฟ้าสามเฟส สำหรับการคำนวณเพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ รวมถึงการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าในเฟส  $u$  เพื่อหาจุดตัดศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกจะเริ่มขึ้นเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าในเฟส  $u$  มีค่าเป็นศูนย์ และอยู่ในช่วงขอบขาขึ้นของสัญญาณแรงดันดังกล่าว รายละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 8.2.1 และ 8.2.2 ตามลำดับ

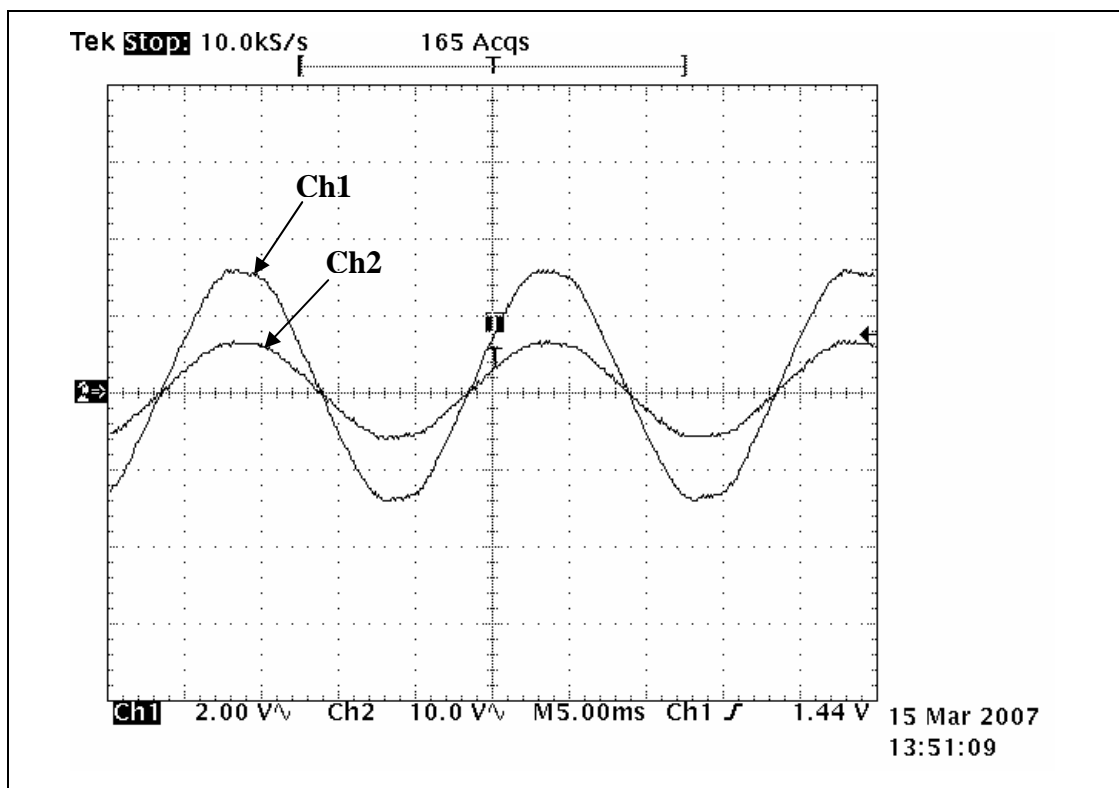
##### 8.2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

การตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฉพาะเฟส  $u$  เท่านั้น ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดนี้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 250 โวลต์อาร์เอ็มเอส และพิกัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิเท่ากับ 5 โวลต์อาร์เอ็มเอส ซึ่งดูได้จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 8.1 หม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิจะต่อกับจุดที่ต้องการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ส่วนหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิจะต่อกับวงจรปรุงแต่งสัญญาณ (นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 8.3) และเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการตรวจวัดมีค่าไม่เกิน 230 โวลต์อาร์เอ็มเอส ด้วยเหตุนี้พิกัดทางด้านปฐมภูมิจึงกำหนดไว้ที่ 250 โวลต์อาร์เอ็มเอส งานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าดังกล่าว โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส (ค่ายอดแรงดันประมาณ 311 โวลต์) ซึ่งดูได้จากช่องสัญญาณที่ 1 (Ch1) ในรูปที่ 8.2 ค่าที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคปใน Ch1 ต้องคูณด้วย 100 เนื่องจากการตั้งค่าของเครื่องมือวัด ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ได้มีค่าประมาณ 4.4



รูปที่ 8.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

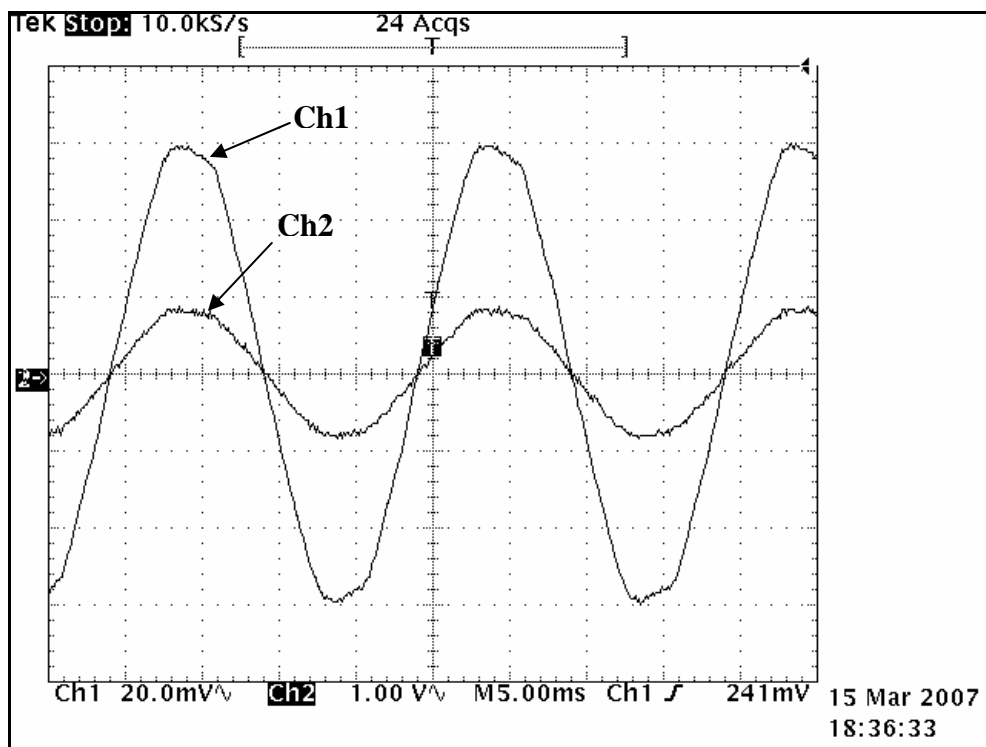


รูปที่ 8.2 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

โวลต์อาร์เอ็มเอส (ค่ายอดแรงดันประมาณ 6.25 โวลต์) ซึ่งดูได้จากช่องสัญญาณที่ 2 (Ch2) ในรูปที่ 8.2 จากผลการทดสอบดังกล่าวสังเกตได้ว่าเฟสของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีเฟสตรงกัน ซึ่งทำให้รูปสัญญาณที่ได้ทางด้านทุติยภูมิไม่มีการเลื่อนเฟส นอกจากนี้สังเกตได้อีกว่า รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิมีทั้งค่าบวกและค่าลบ ซึ่งก่อนจะส่งสัญญาณดังกล่าวเข้าการ์ด DSP ต้องทำการเลื่อนรูปสัญญาณให้มีแต่ค่าบวก ทั้งนี้เนื่องจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลบนการ์ด DSP รับแต่สัญญาณที่มีค่าบวกเท่านั้น ดังนั้นก่อนที่จะส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดไปที่การ์ด DSP ต้องผ่านวงจรปรุแต่งสัญญาณให้ได้ตามที่ต้องการ และอยู่ในขอบเขตของการ์ด DSP ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 8.3

### 8.2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ของบริษัท Koshin Electric Corporation รุ่น HC-PSG ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าแบบฮอลล์ (Hall current sensor) ที่มีย่านการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0 ถึง 3 แอมแปร์อาร์เอ็มเอส งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้านี้ก่อนการใช้งานจริง โดยการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการตรวจวัดให้มีค่าเท่ากับ 0.43 แอมแปร์อาร์เอ็มเอส (ค่ากระแสดังกล่าวมาจากการป้อนแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส ให้กับโหลดหลอดไฟ 100 วัตต์) ผลการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าดังกล่าวดูได้จากรูปที่ 8.3 โดยช่องสัญญาณที่ 1 (Ch1) เป็นรูปสัญญาณที่ได้จากการใช้โพรบวัดกระแส (current probe) ในการตรวจวัด โพรบดังกล่าวมีอัตราส่วน 100 มิลลิโวลต์ต่อ 1 แอมแปร์ ซึ่งค่าที่ได้จากการใช้โพรบวัดกระแสมีค่ายอดกระแสเท่ากับ 0.6 แอมแปร์ ส่วนในช่องสัญญาณที่ 2 (Ch2) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีค่ายอดแรงดันประมาณ 0.85 โวลต์ อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะให้ค่าเอาต์พุตออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นค่าที่อ่านได้จาก Ch2 จึงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้จากผลการทดสอบในรูปที่ 8.3 สังเกตได้ว่าเฟสของรูปสัญญาณระหว่าง Ch1 และ Ch2 มีเฟสตรงกัน ซึ่งหมายถึง รูปสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าไม่มีการเลื่อนเฟส และจากรูปที่ 8.3 สังเกตได้อีกว่ารูปสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการตรวจวัดมีทั้งค่าบวกและลบ เพราะฉะนั้นจึงต้องใช้วงจรปรุแต่งสัญญาณในการเลื่อนรูปสัญญาณดังกล่าวให้มีแต่ค่าบวก ก่อนที่จะส่งสัญญาณเข้าการ์ด DSP เช่นเดียวกับการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 8.2.1



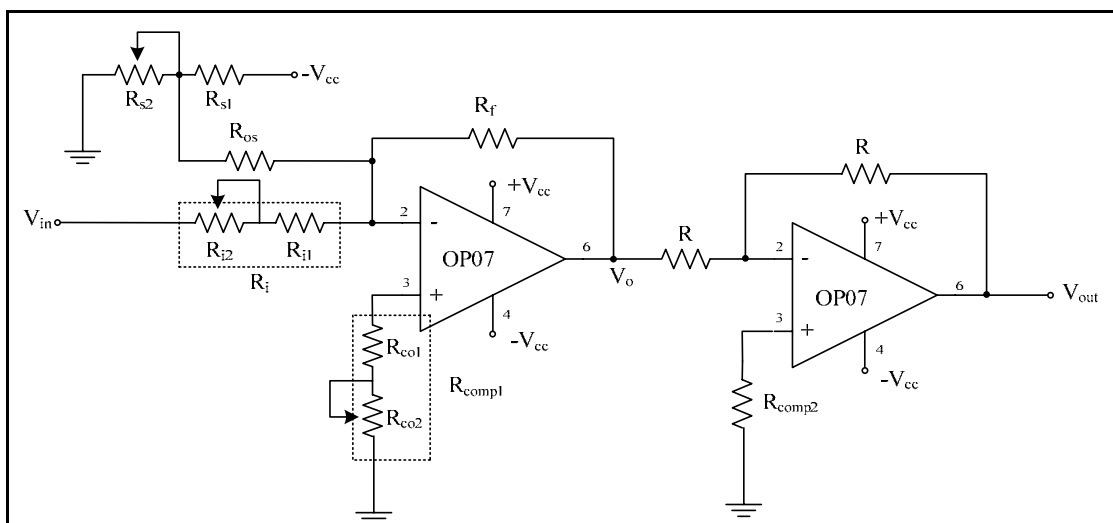
รูปที่ 8.3 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

### 8.3 วงจรแปลงสัญญาณ

การวัดค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดที่นำเสนอในหัวข้อที่ 8.2 ย่นการวัดแรงดันไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์อยู่ในช่วง 0 ถึง 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส ซึ่งทำให้เอาต์พุตที่ออกจากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0 ถึง 4.4 โวลต์อาร์เอ็มเอส (ค่ายอดแรงดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 6.25 โวลต์) ในขณะที่ย่นการวัดกระแสไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์อยู่ในช่วง 0 ถึง 0.4 แอมแปร์อาร์เอ็มเอส ซึ่งทำให้เอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.6 โวลต์อาร์เอ็มเอส (ค่ายอดแรงดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.85 โวลต์) นอกจากนี้สังเกตได้ว่าเอาต์พุตที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า มีทั้งค่าบวกและลบ ซึ่งก่อนส่งสัญญาณดังกล่าวเข้าการ์ด DSP ต้องทำการเลือกรูปสัญญาณให้มีแต่ค่าบวก ทั้งนี้เนื่องจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลบนการ์ด DSP รับแต่สัญญาณที่มีค่าบวกเท่านั้น ดังนั้นก่อนส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดไปที่การ์ด DSP ต้องผ่านวงจรแปลงสัญญาณเพื่อปรับรูปสัญญาณให้ได้ตามที่ต้องการ และอยู่ในขอบเขตของการ์ด DSP ซึ่งรายละเอียดการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณสำหรับการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 8.3.1 และ 8.3.2 ตามลำดับ

### 8.3.1 การออกแบบวงจรปรั้งแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

การออกแบบวงจรปรั้งแต่งสัญญาณในหัวข้อนี้มีเงื่อนไขอยู่ 2 ประการด้วยกัน คือ ต้องทำการลดทอนสัญญาณให้มีค่ายอดแรงดันเท่ากับ 1.5 โวลต์ (เมื่อพิจารณาค่ายอดแรงดันทางซีกลบถึงค่ายอดแรงดันทางซีกบวกจะมีค่าเท่ากับ 3 โวลต์) ทั้งนี้เนื่องจากพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของการ์ด DSP มีค่าเท่ากับ 3 โวลต์ ด้วยเหตุนี้เอาต์พุตที่ได้จากวงจรปรั้งแต่งสัญญาณจึงไม่ควรเกิน 3 โวลต์ และอีกเงื่อนไขหนึ่งของการออกแบบวงจรปรั้งแต่งสัญญาณ คือ ต้องทำการเลื่อนสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าให้มีแต่เฉพาะค่าบวกเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของการ์ด DSP ไม่สามารถรับค่าลบได้ และเพื่อเป็นการป้องกันการ์ด DSP ไม่ให้เกิดความเสียหายจึงต้องเลื่อนสัญญาณดังกล่าวให้มีแต่ค่าบวกเพียงอย่างเดียว วงจรปรั้งแต่งสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แสดงไว้ในรูปที่ 8.4 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าเป็นวงจรขยายกลับขั้วสัญญาณ (inverting amplify) ที่ใช้ออปแอมป์สองชุด โดยในชุดแรกเป็นวงจรสำหรับปรับค่าแรงดันให้เหมาะสมตามที่ต้องการ



รูปที่ 8.4 วงจรปรั้งแต่งสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ก่อนเข้าการ์ด DSP ซึ่งค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรนี้ ( $V_o$ ) มีเครื่องหมายเป็นลบ เพราะฉะนั้นวงจรในชุดที่สองจึงเป็นวงจรขยายกลับขั้วสัญญาณที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1 ทั้งนี้เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรปรั้งแต่งสัญญาณ ( $V_{out}$ ) มีค่าเป็นบวก ค่า  $V_{cc}$  ในวงจรมีค่าเท่ากับ 15 โวลต์ ส่วน  $V_{in}$  คือค่าแรงดันอินพุตของวงจรปรั้งแต่งสัญญาณที่รับมาจากค่าแรงดันเอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าในย่าน  $\pm 6.25$  โวลต์



การออกแบบค่าความต้านทานต่าง ๆ ในวงจรปรั้งแต่งสัญญาณสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากการกำหนดค่าอัตราลดทอนของวงจรขยายกลับขั้วสัญญาณชุดแรก อัตราการลดทอน ( $m$ ) ดังกล่าวคำนวณได้จากสมการที่ (8-1) ค่า  $V_o$  คือ ค่าเอาต์พุตของวงจรปรั้งแต่งสัญญาณที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดไว้ที่ 3 โวลต์ ตามที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ในขณะที่ค่า  $V_{in}$  คือ ค่าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ที่มีค่าขอดีแรงดันจากซีกลบถึงซีกบวกลบเท่ากับ 12.5 โวลต์ จากการคำนวณตามสมการที่ (8-1) จะได้ค่าอัตราการลดทอนเท่ากับ 0.24 นอกจากนี้ค่าอัตราการลดทอน  $m$  มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานในวงจรตามสมการที่

$$m = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{3}{12.5} = 0.24 \quad (8-1)$$

$$m = \frac{R_f}{R_i} = 0.24 \quad (8-2)$$

(8-2) จากสมการที่ (8-2) กำหนดให้  $R_f$  เท่ากับ 2 k $\Omega$  เพราะฉะนั้น  $R_i$  จึงมีค่าเท่ากับ 8.33 k $\Omega$  ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือก  $R_{i1}$  เท่ากับ 5 k $\Omega$  และ  $R_{i2}$  ที่เป็นความต้านทานปรับค่าได้เท่ากับ 5 k $\Omega$  ส่วนค่า  $R$  ในวงจรรูปที่ 8.4 กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 k $\Omega$  และเนื่องจากวงจรปรั้งแต่งสัญญาณนี้ต้องการเลือกรูปสัญญาณให้มีแต่ค่าบวก ตามที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งตัวกำหนดปริมาณการเคลื่อนขึ้นของรูปสัญญาณที่ต้องการ ทำได้โดยการปรับค่าความต้านทาน  $R_{s2}$  ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8-3) ค่า  $b$  ในสมการ หมายถึง ปริมาณของการเลือกรูปสัญญาณ ซึ่งการเลือกรูปสัญญาณของสัญญาณเอาต์พุตจากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าจะเลือกรูปสัญญาณดังกล่าวขึ้น 1.6 โวลต์

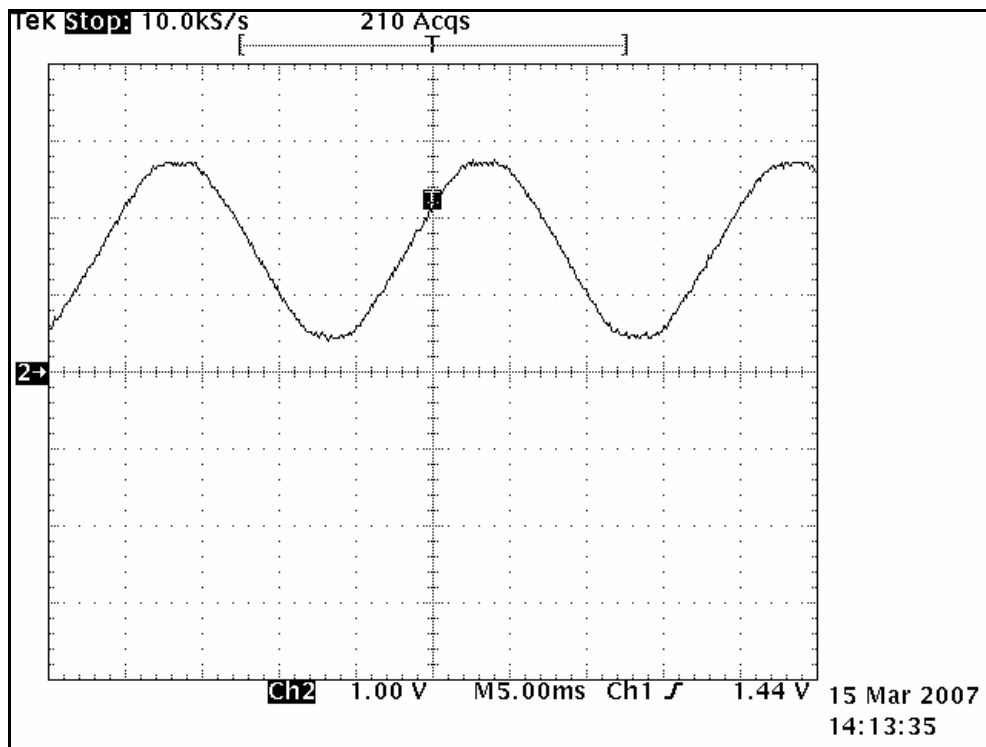
$$b = \frac{R_f}{R_{os}} \times \left[ \frac{R_{s2} \times V_{cc}}{R_{s1} + R_{s2}} \right] \quad (8-3)$$

ดังนั้นค่า  $b$  ในสมการที่ (8-3) จึงมีค่าเท่ากับ 1.6 ส่วนค่า  $R_{s1}$  และ  $R_{os}$  กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 3 k $\Omega$  และ 2 k $\Omega$  ตามลำดับ เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (8-3) จะได้ค่า  $R_{s2}$  เท่ากับ 360  $\Omega$  ได้เลือกใช้  $R_{s2}$  เป็นความต้านทานปรับค่าได้ 2 k $\Omega$  ส่วนการออกแบบค่า  $R_{comp1}$  คำนวณได้จากสมการที่ (8-4) ซึ่งเมื่อแทนค่าความต้านทานต่าง ๆ ลงในสมการที่ (8-4) จะได้ค่า  $R_{comp1}$  เท่ากับ 890  $\Omega$  จึงได้  $R_{co1}$  เท่ากับ 500  $\Omega$  และ  $R_{co2}$  เป็นความต้านทานปรับค่าได้ 500  $\Omega$  นอกจากนี้การออกแบบค่า  $R_{comp2}$  ในรูปที่ 8.4 คำนวณได้จากสมการที่ (8-5) และเมื่อแทนค่า  $R$  เท่ากับ 2 k $\Omega$  จะได้ค่า  $R_{comp2}$  เท่ากับ 1 k $\Omega$

$$\frac{1}{R_{\text{comp1}}} = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{os}} \quad (8-4)$$

$$R_{\text{comp2}} = \frac{R}{2} \quad (8-5)$$

จากการอธิบายข้างต้น เมื่อป้อนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรป้อนแต่งสัญญาณดังรูปที่ 8.4 โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า (รูปสัญญาณในช่องสัญญาณที่ 2 ของรูปที่ 8.2) รูปสัญญาณเอาต์พุต ( $V_{\text{out}}$ ) ของวงจรป้อนแต่งสัญญาณจะได้ดังรูปที่ 8.5 จากรูปดังกล่าวค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก และมีค่า



รูปที่ 8.5 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรป้อนแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

ไม่เกิน 3 โวลต์ ซึ่งตรงกับความต้องการในการออกแบบวงจรป้อนแต่งสัญญาณ โดยรูปสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรป้อนแต่งสัญญาณนี้จะถูกส่งเข้าการ์ด DSP เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

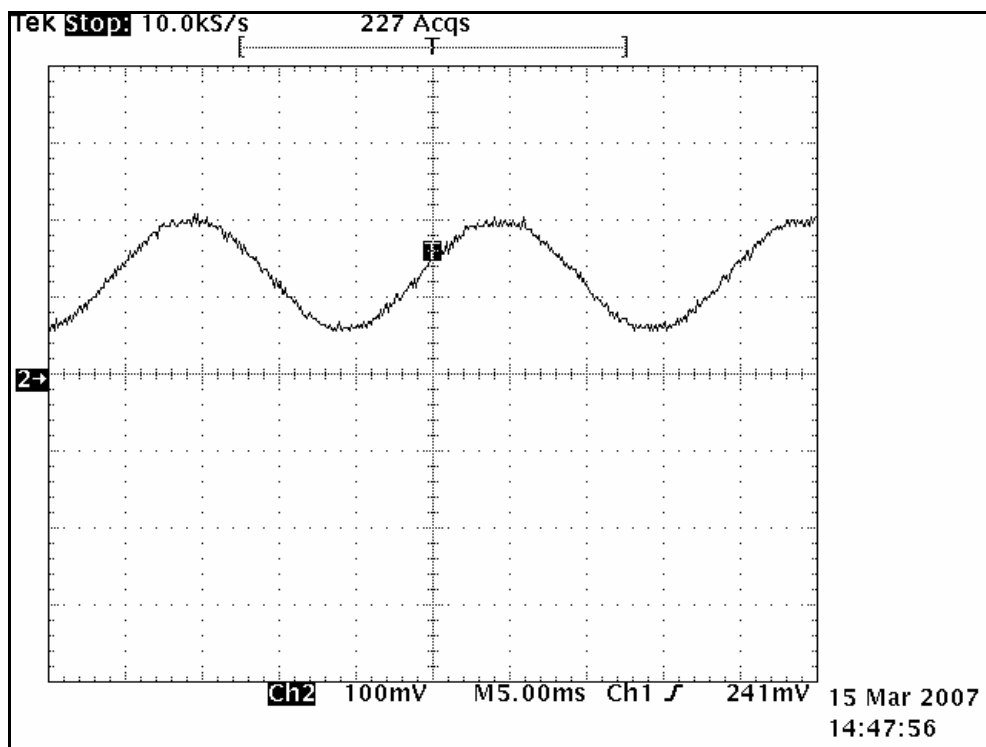
### 8.3.2 การออกแบบวงจรปรั้งแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

วงจรปรั้งแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดกระแสไฟฟ้า จะมีลักษณะของวงจรเหมือนกับวงจรปรั้งแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ที่แสดงไว้ดังรูปที่ 8.4 แต่ความต้านทานต่าง ๆ ในวงจรจะมีขนาดต่างกัน การออกแบบค่าความต้านทานในวงจรเริ่มต้นจากการกำหนดค่าอัตราขยายของวงจรขยายกลับขั้วสัญญาณชุดแรก อัตราขยาย ( $g$ ) ดังกล่าวคำนวณได้จากสมการที่ (8-6) โดยแทนค่า  $V_o$  เท่ากับ 3 โวลต์เช่นเดียวกับการออกแบบในหัวข้อที่ 8.3.1 ส่วนค่า  $V_{in}$  คือ ค่าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่มีค่าขดแรงดันจากซีกลบถึงซีกบวกลบเท่ากับ 1.77 โวลต์ จากการคำนวณตามสมการที่ (8-6) จะได้ค่าอัตราขยายเท่ากับ 1.77 ค่าอัตราขยาย  $g$  มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานในวงจรดังสมการที่ (8-7) เมื่อแทนค่า  $R_f$  เท่ากับ 2 k $\Omega$  ในสมการที่ (8-7) จะได้  $R_i$  เท่ากับ 1.13 k $\Omega$  เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้  $R_{i1}$  เท่ากับ 0.5 k $\Omega$  ในขณะที่

$$g = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{3}{1.77} = 1.77 \quad (8-6)$$

$$g = \frac{R_f}{R_i} = 1.77 \quad (8-7)$$

ค่า  $R_{i2}$  เป็นความต้านทานปรับค่าได้ 1 k $\Omega$  การเลือกรูปสัญญาณทำได้โดยการปรับค่าความต้านทาน  $R_{s2}$  ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8-3) ในหัวข้อที่ 8.3.1 แต่ค่า  $b$  สำหรับการออกแบบในหัวข้อนี้ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.13 โวลต์ ในขณะที่ค่า  $R_{s1}$  ใช้เหมือนกับการออกแบบในหัวข้อที่ 8.3.1 ส่วน  $R_{os}$  ใช้เท่ากับ 10 k $\Omega$  เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (8-3) จะได้ค่า  $R_{s2}$  เท่ากับ 140  $\Omega$  และได้เลือกใช้  $R_{s2}$  เป็นความต้านทานปรับค่าได้ 2 k $\Omega$  ส่วนการคำนวณค่า  $R_{comp1}$  และ  $R_{comp2}$  คำนวณได้จากสมการที่ (8-4) และ (8-5) ตามลำดับ โดยที่ค่า  $R_{co1}$   $R_{co2}$   $R$  และ  $R_{comp2}$  จะใช้ค่าเดียวกันกับวงจรปรั้งแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 8.3.1 จากการอธิบายข้างต้น เมื่อป้อนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรปรั้งแต่งสัญญาณ โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (รูปสัญญาณในช่องสัญญาณที่ 2 ของรูปที่ 8.3) รูปสัญญาณเอาต์พุต ( $V_{out}$ ) ของวงจรปรั้งแต่งสัญญาณจะได้ดังรูปที่ 8.6 จากรูปดังกล่าวค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก และมีค่าไม่เกิน 3 โวลต์ ซึ่งตรงกับความต้องการในการออกแบบวงจรปรั้งแต่งสัญญาณ โดยรูปสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรปรั้งแต่งสัญญาณนี้จะถูกส่งเข้าการ์ด DSP เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป



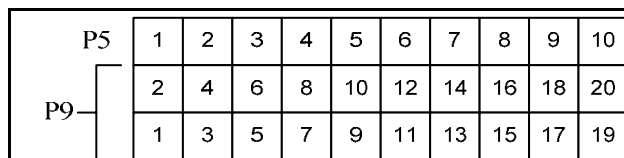
รูปที่ 8.6 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรปรุงแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

#### 8.4 การ์ด DSP

การ์ด DSP ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ สำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก เป็นของบริษัท Texas Instruments รุ่น eZdsp™ F2812 ความเร็วในการประมวลผลของซีพียูเท่ากับ 150 เมกะเฮิร์ตซ์ สถาปัตยกรรมของซีพียูเป็น 32 บิต การ์ดดังกล่าวมีวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลในตัว ทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีความแยกชัด (resolution) 12 บิต ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพียง 4 ช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณแรก รับข้อมูลแรงดันไฟฟ้าเฟส  $u$  จากวงจรปรุงแต่งสัญญาณที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 8.3.1 ส่วนอีกสามช่องสัญญาณรับข้อมูลกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส จากวงจรปรุงแต่งสัญญาณที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 8.3.2 นอกจากนี้การ์ด DSP รุ่น eZdsp™ F2812 มีพอร์ตไอโอ (I/O ports) ทั้งหมด 3 ชุด ได้แก่ พอร์ต P4 P7 และ P8 ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้พอร์ตไอโอเพียง 2 ชุด คือ P4 และ P8 เพื่อส่งข้อมูลผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก รายละเอียดเกี่ยวกับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 8.5 ส่วนการอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการ์ด DSP ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเฉพาะการเชื่อมต่อวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลกับวงจรปรุงแต่งสัญญาณ และการเชื่อมต่อกับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกผ่านพอร์ตไอโอเท่านั้น

รายละเอียดอื่น ๆ เกี่ยวกับการ์ด DSP รุ่น eZdsp™ F2812 สามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จาก <http://www.ti.com>

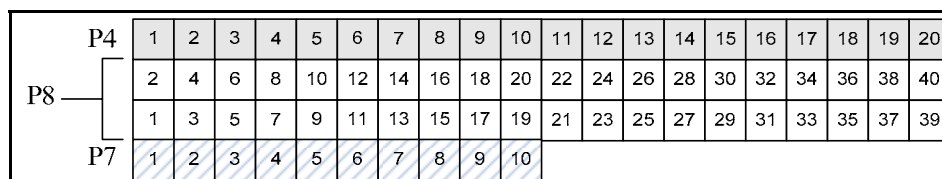
การจัดเรียง핀สำหรับวงจรแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของการ์ด DSP แสดงไว้ในรูปที่ 8.7 ซึ่งมีอยู่สองพอร์ตด้วยกัน คือ P5 และ P9 โดยรายละเอียดของพอร์ตดังกล่าวควู้ได้จากตารางที่ 8.1 พิน 1



รูปที่ 8.7 การจัดเรียง핀สำหรับวงจรแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของ eZdsp™ F2812

ตารางที่ 8.1 รายละเอียดของพอร์ต P5 และ P9 ของ eZdsp™ F2812

| พินของพอร์ต<br>P5 | ช่องสัญญาณ<br>แอนะล็อก | พินของพอร์ต<br>P9 | ช่องสัญญาณ<br>แอนะล็อก | พินของพอร์ต<br>P9 | ช่องสัญญาณ<br>แอนะล็อก |
|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
| 1                 | ADCB0                  | 1                 | GND                    | 2                 | ADCA0                  |
| 2                 | ADCB1                  | 3                 | GND                    | 4                 | ADCA1                  |
| 3                 | ADCB2                  | 5                 | GND                    | 6                 | ADCA2                  |
| 4                 | ADCB3                  | 7                 | GND                    | 8                 | ADCA3                  |
| 5                 | ADCB4                  | 9                 | GND                    | 10                | ADCA4                  |
| 6                 | ADCB5                  | 11                | GND                    | 12                | ADCA5                  |
| 7                 | ADCB6                  | 13                | GND                    | 14                | ADCA6                  |
| 8                 | ADCB7                  | 15                | GND                    | 16                | ADCA7                  |
| 9                 | ADCREFM                | 17                | GND                    | 18                | VREFLO                 |
| 10                | ADCREFP                | 19                | GND                    | 20                | No connect             |



รูปที่ 8.8 การจัดเรียง핀สำหรับพอร์ตไอโอของ eZdsp™ F2812

ตารางที่ 8.2 รายละเอียดพอร์ตไอโอ P4 และ P8 ของ eZdsp™ F2812

| พินของ<br>พอร์ต<br>P4 | รายละเอียด<br>ของพิน    | พินของ<br>พอร์ต P8 | รายละเอียดของพิน              | พินของ<br>พอร์ต<br>P8 | รายละเอียดของพิน              |
|-----------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1                     | +3.3 V                  | 1                  | +3.3 V                        | 2                     | +3.3 V                        |
| 2                     | XINT2/ADCSOC            | 3                  | SCITXDA                       | 4                     | SCIRXDA                       |
| 3                     | MCLKXA                  | 5                  | XINT1n/XBIO <sub>n</sub>      | 6                     | A8                            |
| 4                     | MCLKRA                  | 7                  | A9                            | 8                     | A10                           |
| 5                     | MFSXA                   | 9                  | A0                            | 10                    | A1                            |
| 6                     | MFSRA                   | 11                 | A2                            | 12                    | A3                            |
| 7                     | MDXA                    | 13                 | A4                            | 14                    | A5                            |
| 8                     | MDRA                    | 15                 | A6                            | 16                    | A7                            |
| 9                     | No connect              | 17                 | A11                           | 18                    | A12                           |
| 10                    | GND                     | 19                 | GND                           | 20                    | GND                           |
| 11                    | B9                      | 21                 | No connect                    | 22                    | XINT1N/XBIO <sub>n</sub>      |
| 12                    | B10                     | 23                 | SPISIMOA                      | 24                    | SPISOMIA                      |
| 13                    | B6                      | 25                 | SPICLKA                       | 26                    | SPISTEA                       |
| 14                    | B7                      | 27                 | CANTXA                        | 28                    | CANRXA                        |
| 15                    | B11                     | 29                 | XCLKOUT                       | 30                    | B0                            |
| 16                    | B12                     | 31                 | B1                            | 32                    | B2                            |
| 17                    | XF/XPLLDIS <sub>n</sub> | 33                 | B3                            | 34                    | B4                            |
| 18                    | SCITXDB                 | 35                 | B5                            | 36                    | B8                            |
| 19                    | SCIRXDB                 | 37                 | T1CTRIIP/PDPINTA <sub>n</sub> | 38                    | T3CTRIIP/PDPINTB <sub>n</sub> |
| 20                    | GND                     | 39                 | GND                           | 40                    | GND                           |

ถึงพิน 8 ของพอร์ต P5 เป็นช่องรับข้อมูลสัญญาณแอนะล็อก 8 ช่องสัญญาณ (ADCB0 ถึง ADCB7) ส่วนพิน 2 4 6 8 10 12 14 และ 16 ของพอร์ต P9 เป็นช่องรับข้อมูลสัญญาณแอนะล็อกอีก 8 ช่องสัญญาณ (ADCA0 ถึง ADCA7) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส u จากวงจรป้อนแต่งสัญญาณต่อกับพิน 7 ของพอร์ต P5 ในขณะที่สัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส u เฟส v และเฟส w จากวงจรป้อนแต่งสัญญาณจะต่อกับพิน 2 4 และ 6 ของพอร์ต P9 ตามลำดับ

การจัดเรียงพินของพอร์ตไอโอ P4 P7 และ P8 แสดงไว้ในรูปที่ 8.8 โดยที่รายละเอียดของพอร์ต P4 และ P8 คูได้จากตารางที่ 8.2 ส่วนรายละเอียดของพอร์ต P7 คูได้จากตารางที่ 8.3 ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้พิน 13 และ 14 ของพอร์ต P4 (ส่วนที่แรเงา) พิน 6 ถึง 18 และพิน 30 ถึง 35 ของพอร์ต P8 ในขณะที่พอร์ต P7 ใช้พิน 1 ถึง 3 (ส่วนที่แรเงา) สำหรับการเชื่อมต่อพอร์ตไอโอกับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ที่เป็นวงจรมอนิเตอร์การ์ด DSP รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 8.5

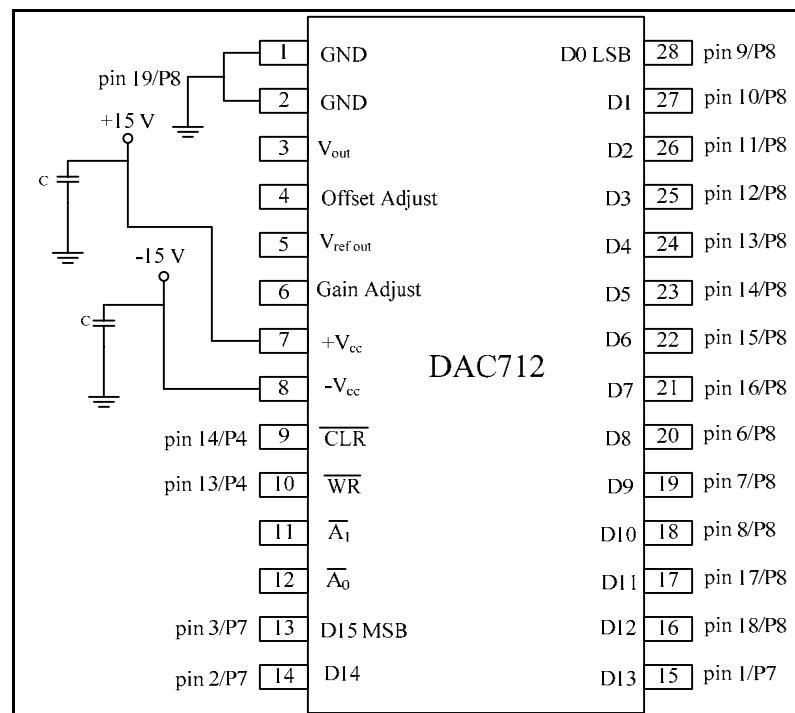
ตารางที่ 8.3 รายละเอียดพอร์ตไอโอ P7 ของ eZdsp™ F2812

| พินของพอร์ต P7 | รายละเอียดของพิน |
|----------------|------------------|
| 1              | A13              |
| 2              | A14              |
| 3              | A15              |
| 4              | T2TRIPn/EVASOCn  |
| 5              | B13              |
| 6              | B14              |
| 7              | B15              |
| 8              | T4TRIPn/EVBSOCn  |
| 9              | No connect       |
| 10             | GND              |

### 8.5 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

ไอซีที่ใช้สำหรับการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ที่เชื่อมต่อกับพอร์ตไอโอของการ์ด DSP ใช้เบอร์ DAC712 ของ Burr-Brown ซึ่งมีความแยกชัด 16 บิต การเชื่อมต่อระหว่าง DAC712 กับพอร์ตไอโอของการ์ด DSP แสดงไว้ในรูปที่ 8.9 ซึ่งเชื่อมต่อกับพอร์ต P4 P7 และ P8 DAC712 ให้เอาต์พุตออกทางขา 3 ของไอซี และเนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้การ์ด DSP เป็นอุปกรณ์สำหรับระบบเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก ซึ่งผลการระบุเอกลักษณ์จะได้กระแสอ้างอิงสามเฟส ( $i_{u.ref}$ ,  $i_{v.ref}$  และ  $i_{w.ref}$ ) กระแสอ้างอิงทั้งสามจะถูกส่งออกมาทางไอซี DAC712 เพื่อส่งต่อไปที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (วงจรกรองกำลังแอกทีฟจะนำเสนอในหัวข้อที่ 8.7) ดังนั้นจึงใช้ DAC712 จำนวน 3 ตัว สำหรับการแปลงสัญญาณกระแสอ้างอิงแต่ละเฟส การเชื่อมต่อระหว่างไอซี DAC712 ทั้งสามตัวกับพอร์ตไอโอของการ์ด DSP จะเหมือนกันดังรูปที่ 8.9 แต่จะต่างกันที่ขา 11 และ 12 ของ

DAC712 แต่ละตัว โดยการเชื่อมต่อระหว่างขา 11 และ 12 ของ DAC712 แต่ละตัวกับพอร์ตไอโอของการ์ด DSP แสดงไว้ดังตารางที่ 8.4 นอกจากนี้ลำดับขั้นตอนควบคุมการทำงานของไอซี DAC712 ตัวที่ 1 ทำได้โดยใช้คำสั่งดิจิทัลเวิร์ด 8 บิต (B0 ถึง B7) ของการ์ด DSP ตามขั้นตอนดังตารางที่ 8.5 ลำดับขั้นตอนควบคุมการทำงานของไอซี DAC712 ตัวที่ 2 และตัวที่ 3 มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน จึงได้แสดงรายละเอียดดิจิทัลเวิร์ดไว้ในตารางที่ 8.6 และ 8.7 ตามลำดับ จากตารางดังกล่าว B0 ถึง B5 คือ พิน 30 ถึงพิน 35 ของพอร์ต P8 ในขณะที่ B6 และ B7 คือ พิน 13 และพิน 14



รูปที่ 8.9 การเชื่อมต่อพอร์ตไอโอของการ์ด DSP กับไอซี DAC712

ของพอร์ต P4 (ดูตารางที่ 8.2 ประกอบ) โดยขั้นตอนที่ 1 เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับ DAC712 ขั้นตอนที่ 2 เป็นการโหลดข้อมูล 16 บิต ซึ่งเป็นกระแสดำเนินการในแต่ละเฟสผ่านพิน A0 ถึง A15 (ขา 13 ถึงขา 28 ของ DAC712 ในรูปที่ 8.9) ขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนที่บ่งบอกถึงการสิ้นสุดการโหลดข้อมูล ขั้นตอนที่ 4 ถึง 6 เป็นขั้นตอนสำหรับโหลดอินพุตแลตช์ (load input latch) ส่วนขั้นตอนที่ 7 ถึง 9 เป็นขั้นตอนสำหรับโหลดดีทิวเอแลตช์ (load D/A latch) รายละเอียดต่างๆ ของไอซี DAC712 สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก <http://www.burr-brown.com>



ตารางที่ 8.4 การเชื่อมต่อระหว่าง DAC712 กับพอร์ตไอโอของการ์ด DSP ที่ใช้ DAC712 สามตัว

| ไอซี DAC712 |                  | พิน/พอร์ต ที่เชื่อมต่อกับการ์ด DSP | รายละเอียดของพิน |
|-------------|------------------|------------------------------------|------------------|
| ตัวที่ 1    | $\overline{A}_0$ | pin 30/P8                          | B0               |
|             | $\overline{A}_1$ | pin 31/P8                          | B1               |
| ตัวที่ 2    | $\overline{A}_0$ | pin 32/P8                          | B2               |
|             | $\overline{A}_1$ | pin 33/P8                          | B3               |
| ตัวที่ 3    | $\overline{A}_0$ | pin 34/P8                          | B4               |
|             | $\overline{A}_1$ | pin 35/P8                          | B5               |

ตารางที่ 8.5 ขั้นตอนควบคุมการทำงานของไอซี DAC712 ตัวที่ 1

| ลำดับขั้นตอนการสั่งการสำหรับ DAC712 ตัวที่ 1 | B7                                             | B6 | B5 | B4 | B3 | B2 | B1 | B0 |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| ขั้นตอนที่ 1                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 2                                 | โหลดข้อมูลกระแสอ้างอิงเฟส u ผ่านพิน A0 ถึง A15 |    |    |    |    |    |    |    |
| ขั้นตอนที่ 3                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 4                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  |
| ขั้นตอนที่ 5                                 | 1                                              | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  |
| ขั้นตอนที่ 6                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  |
| ขั้นตอนที่ 7                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 8                                 | 1                                              | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 9                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  |

ตารางที่ 8.6 ขั้นตอนควบคุมการทำงานของไอซี DAC712 ตัวที่ 2

| ลำดับขั้นตอนการสั่งการสำหรับ DAC712 ตัวที่ 2 | B7                                             | B6 | B5 | B4 | B3 | B2 | B1 | B0 |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| ขั้นตอนที่ 1                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 2                                 | โหลดข้อมูลกระแสอ้างอิงเฟส v ผ่านพิน A0 ถึง A15 |    |    |    |    |    |    |    |
| ขั้นตอนที่ 3                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 4                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 5                                 | 1                                              | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 6                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 7                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 8                                 | 1                                              | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 9                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  |

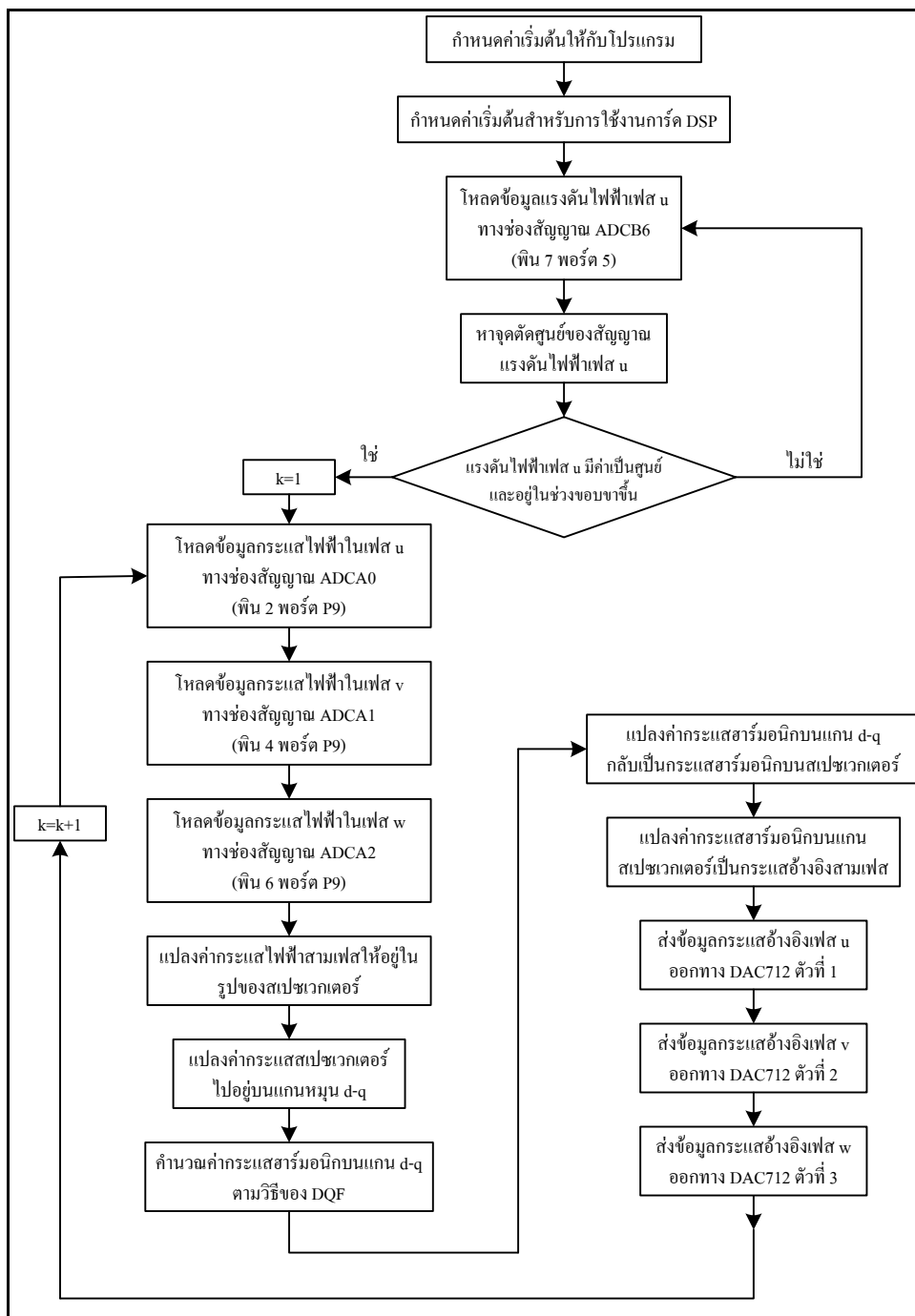
ตารางที่ 8.7 ขั้นตอนควบคุมการทำงานของไอซี DAC712 ตัวที่ 3

| ลำดับขั้นตอนการสั่งการสำหรับ DAC712 ตัวที่ 3 | B7                                             | B6 | B5 | B4 | B3 | B2 | B1 | B0 |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| ขั้นตอนที่ 1                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 2                                 | โหลดข้อมูลกระแสอ้างอิงเฟส w ผ่านพิน A0 ถึง A15 |    |    |    |    |    |    |    |
| ขั้นตอนที่ 3                                 | 1                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 4                                 | 1                                              | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 5                                 | 1                                              | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 6                                 | 1                                              | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 7                                 | 1                                              | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 8                                 | 1                                              | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| ขั้นตอนที่ 9                                 | 1                                              | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |

## 8.6 ซอฟต์แวร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่โปรแกรมด้วยภาษาซีบนการ์ด DSP สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธี DQF ในการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 5 ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่โปรแกรมบนการ์ด DSP แผนภูมิขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 8.10 โดยในเบื้องต้นเป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับโปรแกรมและกำหนดสถานะเริ่มต้นสำหรับการใช้งานการ์ด DSP หลังจากนั้นเป็นการโหลดข้อมูลแรงดันไฟฟ้าเฟส u ผ่านวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลทางช่องสัญญาณ ADCB6 เพื่อคำนวณหาจุดตัดศูนย์ ถ้าแรงดันดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์และอยู่ในช่วงขอบขาขึ้น จะดำเนินการโหลดข้อมูลกระแสไฟฟ้าสามเฟสผ่านทางวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ทางช่องสัญญาณ ADCA0 ADCA1 และ ADCA2 สำหรับกระแสไฟฟ้าในเฟส u เฟส v และเฟส w ตามลำดับ เมื่อโหลดข้อมูลกระแสไฟฟ้าสามเฟสแล้ว จะดำเนินการแปลงค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่ในรูปของสเปซเวกเตอร์ และแปลงค่ากระแสสเปซเวกเตอร์ไปอยู่บนแกนหมุน d-q (สมการที่ใช้ในการแปลงคือ สมการที่ (5-1) และ (5-2) ในบทที่ 5) หลังจากนั้นคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d-q ตามวิธีการคำนวณของ DQF และเมื่อได้กระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d-q แล้ว จะดำเนินการแปลงกระแสดังกล่าวกลับเป็นกระแสฮาร์มอนิกบนสเปซเวกเตอร์ และแปลงต่อไปเป็นกระแสอ้างอิงสามเฟส เมื่อได้กระแสอ้างอิงสามเฟส ในขั้นต่อไปจะดำเนินการส่งข้อมูลกระแสอ้างอิงเฟส u เฟส v และเฟส w ออกทางไอซี DAC712 ตัวที่ 1 ตัวที่ 2 และตัวที่ 3 ตามลำดับ การอธิบายขั้นตอนการโปรแกรมข้างต้นเป็นการดำเนินการเพียงหนึ่งรอบการทำงานเท่านั้น ซึ่งการคำนวณในรอบ

ถัดไปจะเริ่มต้นที่โหลดข้อมูลกระแสไฟฟ้าสามเฟสชุดใหม่ และดำเนินการซ้ำเดิมตามแผนภูมิในรูปที่ 8.10

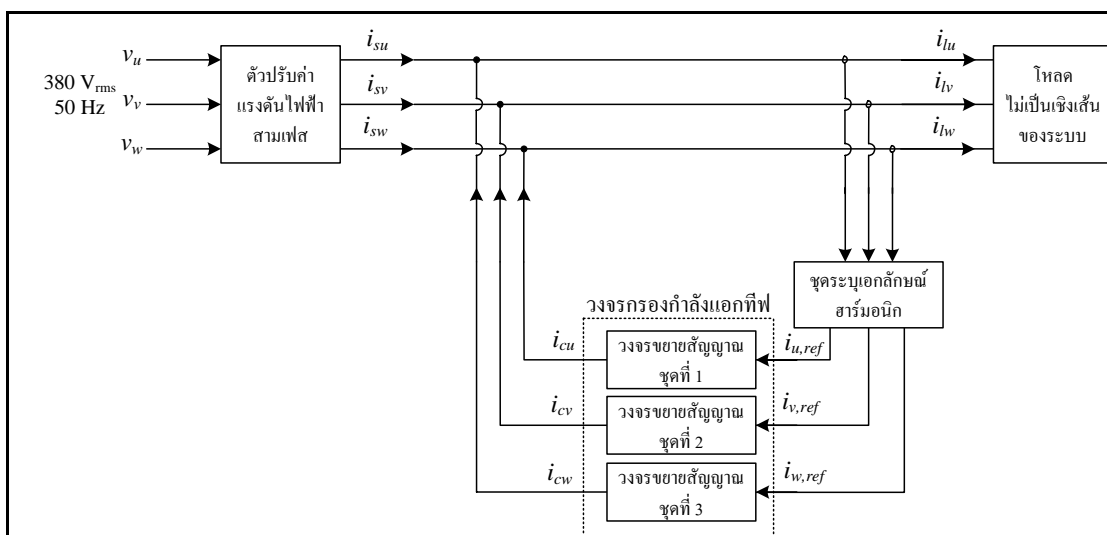


รูปที่ 8.10 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี DQF บนการ์ด DSP

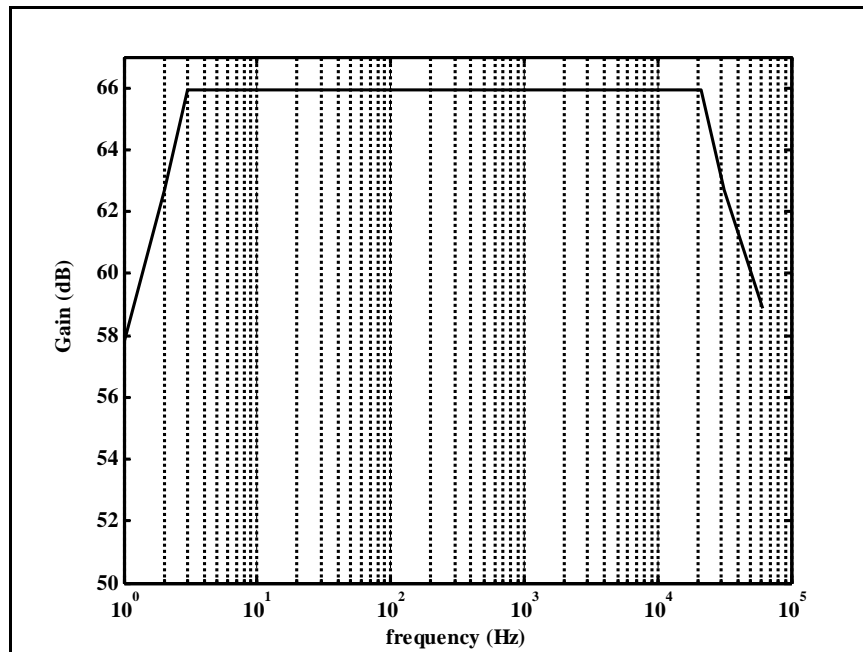
### 8.7 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้วงจรถายสัญญาณ ทำหน้าที่ขยายสัญญาณกระแสอ้างอิง ( $i_{u,ref}$ ,  $i_{v,ref}$  และ  $i_{w,ref}$ ) ที่คำนวณได้จากการ์ด DSP ซึ่งการขยายสัญญาณนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อฉีดกระแสชดเชย ( $i_{cu}$ ,  $i_{cv}$  และ  $i_{cw}$ ) เข้าสู่ระบบ การต่อชุดขยายสัญญาณแสดงไว้ดังรูปที่ 8.11 โดยที่วงจรถายสัญญาณชุดที่ 1 ใช้สำหรับขยายสัญญาณกระแสอ้างอิงเฟส u ในขณะที่วงจรถายสัญญาณชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ใช้สำหรับขยายสัญญาณกระแสอ้างอิงเฟส v และเฟส w ตามลำดับ โครงสร้างของวงจรถายสัญญาณทั้งสามชุดจะเหมือนกัน ซึ่งรายละเอียดของวงจรแสดงไว้ในภาคผนวก ง. โดยอ้างอิงจากวารสาร Popular Electronics วงจรถายสัญญาณดังกล่าวมีพิกัดกำลังไฟฟ้า 150 วัตต์ โดยพิกัดแรงดันสูงสุดของวงจรเท่ากับ 80 โวลต์ ในขณะที่พิกัดกระแสสูงสุดเท่ากับ 1.8 แอมแปร์ การตอบสนองทางความถี่ของวงจรถายสัญญาณดังกล่าวที่ได้จากการทดสอบได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 8.12 ค่าอัตราขยายในรูปที่ 8.12 ก) คำนวณได้จากสมการที่ (8-8) จากสมการดังกล่าว  $V_{out}$  คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรถายสัญญาณ และ  $V_{in}$  คือ ค่าแรงดันอินพุตของวงจรถายสัญญาณ จากผลทดสอบสังเกตได้ว่าอัตราขยายของวงจรมีค่าคงที่ประมาณ 66 เดซิเบล ในย่านความถี่ 3 เฮิรตซ์ถึง 20 กิโลเฮิรตซ์ ในขณะที่ลักษณะสมบัติทางเฟสเป็น

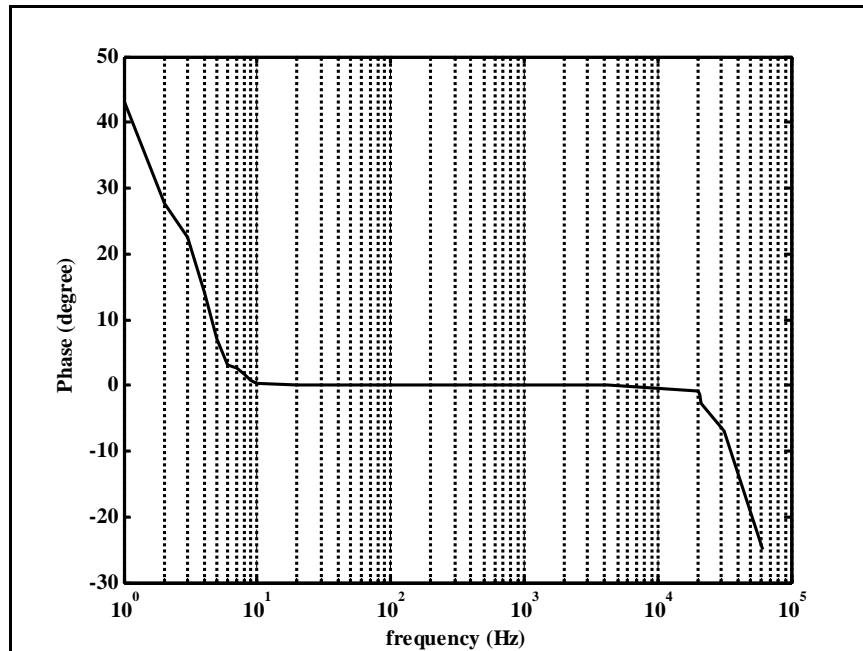
$$Gain = 20\log \frac{V_{out}}{V_{in}} \tag{8-8}$$



รูปที่ 8.11 แผนภาพแสดงโครงสร้างของระบบทดสอบ



ก) อัตราขยาย (เดซิเบล)



ข) เฟส (องศา)

รูปที่ 8.12 กราฟการตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายสัญญาณ

0 องศา ในย่านความถี่ประมาณ 10 เฮิร์ตซ์ถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยดูได้จากรูปที่ 8.12 ข) จากการทดสอบข้างต้นอาจกล่าวโดยประมาณได้ว่าวงจรมายสัญญาณนี้มีแบนด์วิดท์ประมาณ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยย่านความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานวงจรมายสัญญาณนี้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 10 เฮิร์ตซ์ถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ การใช้วงจรมายสัญญาณ เพื่อขยายสัญญาณกระแสอ้างอิงสามเฟส ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกด้วยการ์ด DSP ที่นำเสนอในหัวข้อนี้ จะนำไปใช้ในการทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกจริง โดยผลการทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกได้นำเสนอไว้ในบทที่ 9 ซึ่งเป็นบทต่อไป

## บทที่ 9

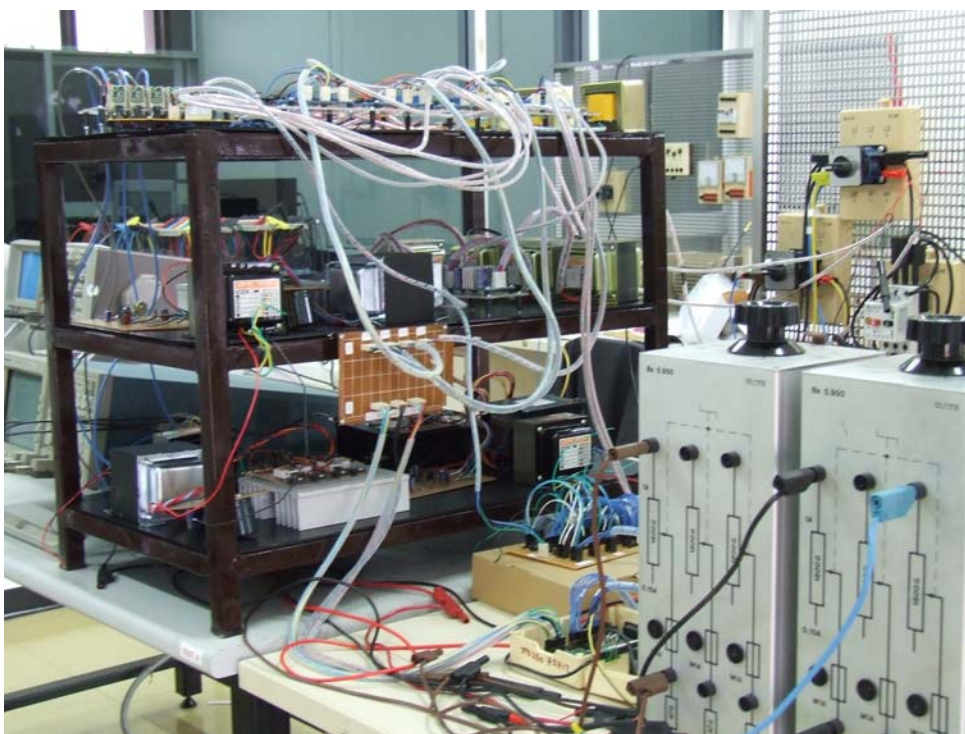
### ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิก

#### 9.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอเนื้อหาผลการทดสอบ และอภิปรายผล วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก DQF ได้รับการอนุมัติลงบนหน่วยประมวลผลสัญญาณ DSP รุ่น eZdsp™ F2812 วงจรรองกำลังแอกทีฟ มีรูปแบบเป็นวงจรขยายสัญญาณ ที่นำกระแสชดเชยกำลังต่ำจาก DSP ไปผ่านการขยายกำลัง และฉีดกระแสชดเชยที่ขยายกำลังแล้วเข้าสู่ระบบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นของระบบที่ใช้ทดสอบ เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นตัวแทนของโหลดทางไฟฟ้ากำลัง เช่น เครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกสำหรับโหลดที่เป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 9.2 และในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 9.3 ตลอดจนนำเสนอเนื้อหาที่มีการวิเคราะห์ และอภิปรายผลไปพร้อม ๆ กัน

#### 9.2 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

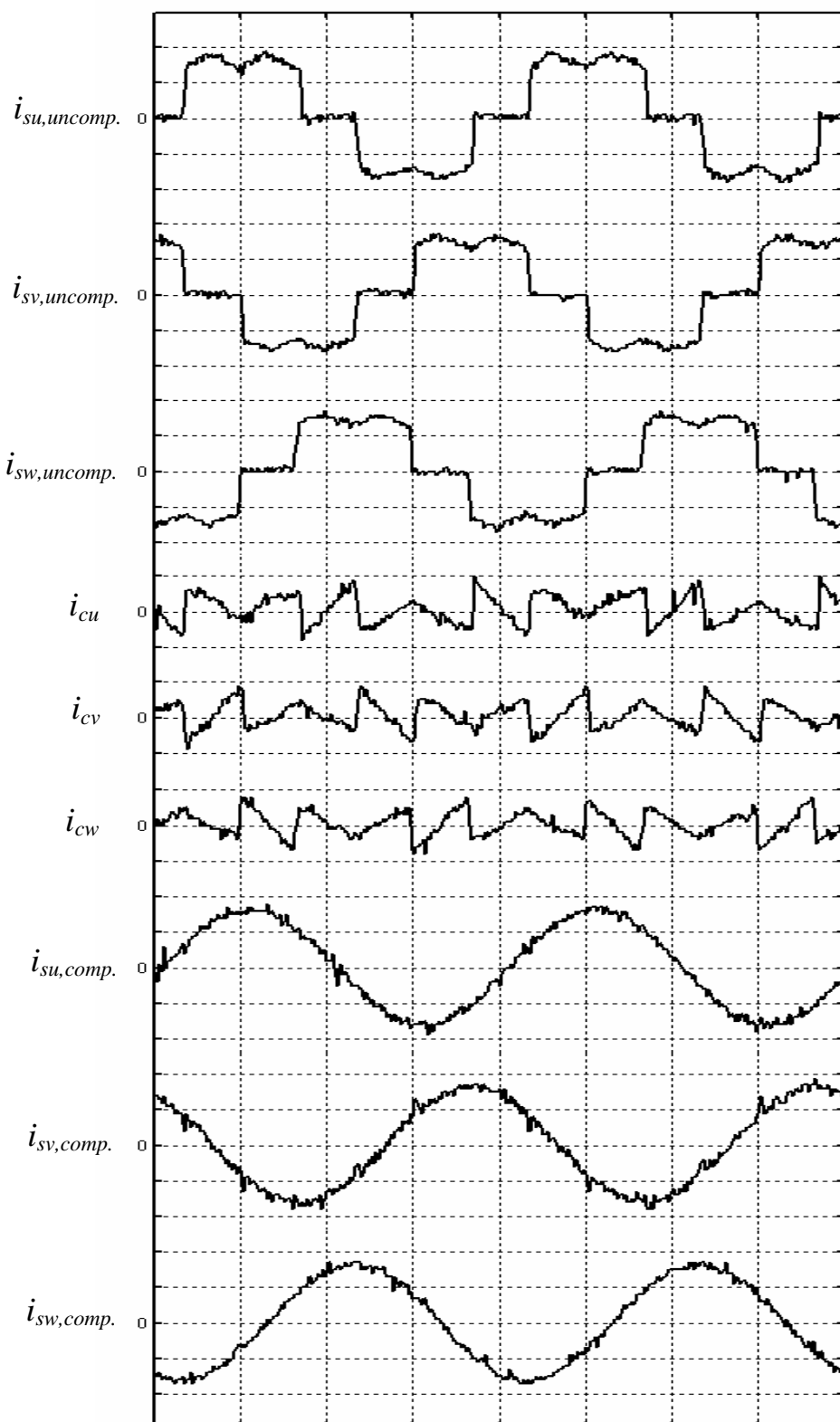
ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิก ที่นำเสนอในหัวข้อนี้ ระบบที่ใช้ในการทดสอบมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดหนึ่งชุดเป็นความต้านทาน การทดสอบดังกล่าวมีการลดพิคแรงดันไฟฟ้าของระบบสามเฟส จาก 220 โวลต์อาร์เอ็มเอสในแต่ละเฟส เหลือเพียง 60 โวลต์อาร์เอ็มเอส ทั้งนี้เพื่อลดพิคของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับการสร้างวงจรรองกำลังแอกทีฟ และเพื่อความปลอดภัย ความต้านทานหนึ่งชุดที่เป็นโหลดของวงจรเรียงกระแส มีขนาด 400 โอห์ม วงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้สำหรับฉีดกระแสชดเชย เพื่อหักล้างกับกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ ใช้วงจรขยายสัญญาณ ที่ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 8 ชุดระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกใช้การ์ด DSP ในการคำนวณ โดยวิธีระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกใช้วิธี DQF ตามที่ได้ นำเสนอรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 5 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ากับการ์ด DSP รวมถึงการเชื่อมต่อวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกกับพอร์ตไอโอของการ์ด DSP ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 8 เมื่อต่ออุปกรณ์ดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นเข้าด้วยกัน จะมีลักษณะดังรูปที่ 9.1 โดยผลการทดสอบของระบบได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 9.2 โดยที่สเกลในแกนนอนของรูปที่ 9.2 มีค่าเท่ากับ 5 มิลลิวินาทีต่อช่อง ในขณะที่สเกลในแกนตั้งมีค่าเท่ากับ 0.2



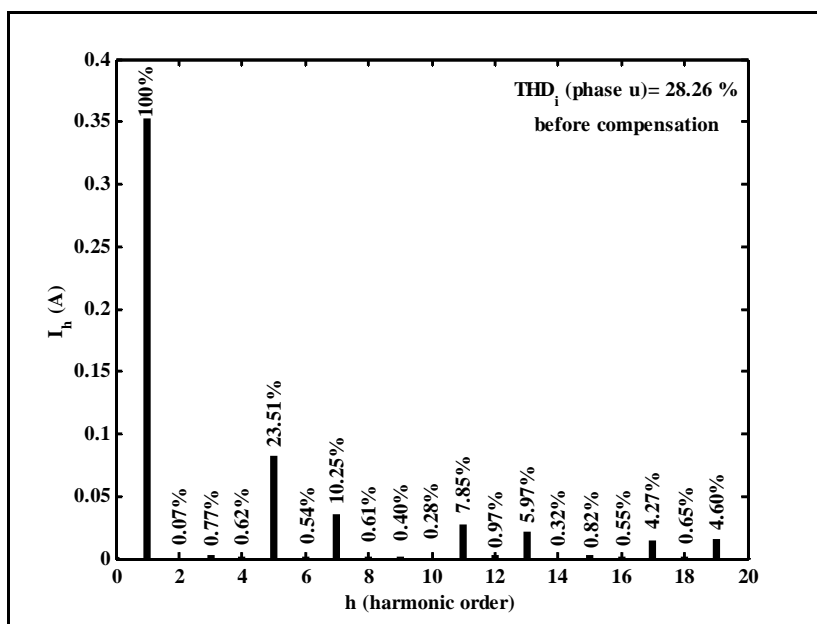
รูปที่ 9.1 ระบบที่ใช้ทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

แอมแปร์ต่อช่อง จากรูปดังกล่าว กระแสไฟฟ้าก่อนการชดเชย ( $i_{su,uncomp.}$ ,  $i_{sv,uncomp.}$  และ  $i_{sw,uncomp.}$ ) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ โดยที่ค่า %THD<sub>i</sub> ในแต่ละเฟส ดูได้จากตารางที่ 9.1 ค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 28.28 เปอร์เซ็นต์ (สมการที่ใช้คำนวณ %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยดูได้จากสมการที่ (7-2) ในบทที่ 7) 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 9.1 ค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 2.64 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนมีการชดเชย เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการชดเชยของเฟส u ไปวิเคราะห์หาสเปกตรัม เพื่อดูปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น สามารถดูได้จากรูปที่ 9.3 แกนนอนของรูปดังกล่าว คือ ลำดับฮาร์มอนิก (h) แกนตั้ง คือ ค่ากระแสสูงสุดแต่ละลำดับฮาร์มอนิก ( $I_h$ ) จากรูปที่ 9.3 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

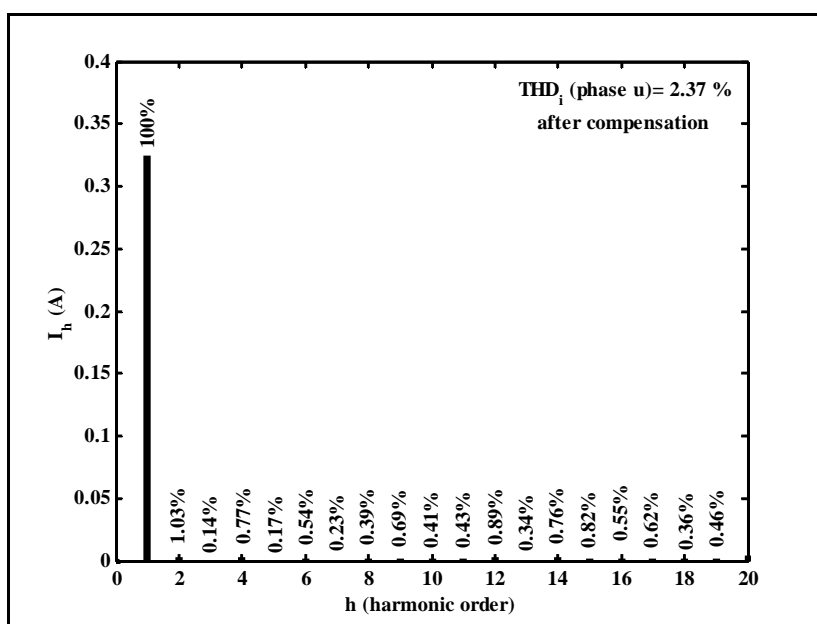




รูปที่ 9.2 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว  
(สเกลในแกนนอนเท่ากับ 5 ms/div. แกนตั้งเท่ากับ 0.2 A/div.)



ก) ก่อนการชดเชย



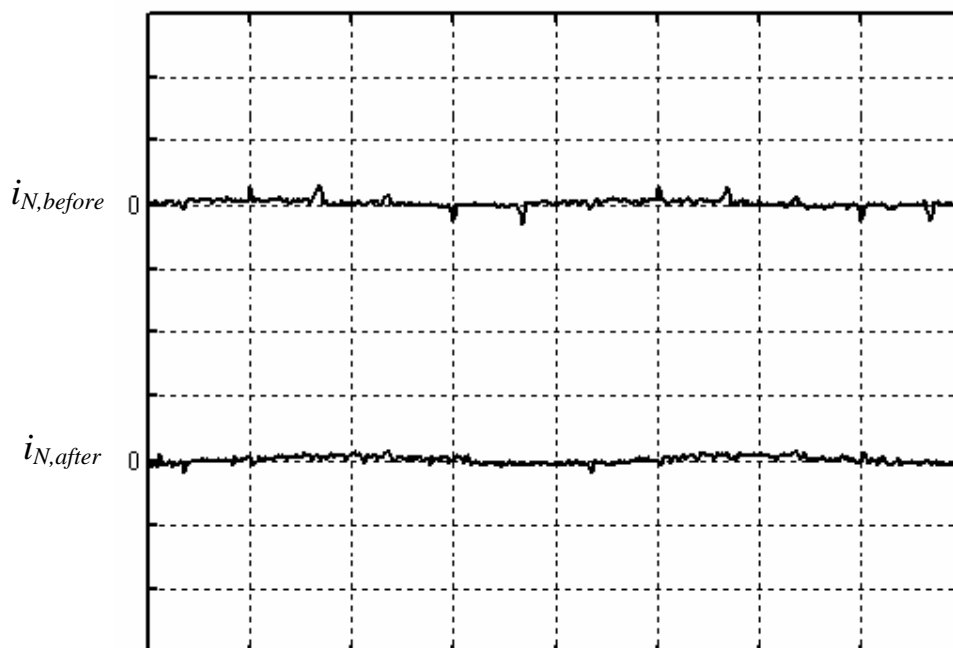
ข) หลังการชดเชย

รูปที่ 9.3 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเฟส u ก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลด  
ของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

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 และ ลำดับที่ 19 ลดลงจาก 4.60 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งภายหลังการชดเชย ปริมาณ ฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ และค่า %THD<sub>i</sub> อยู่ในกรอบมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 ส่วนผลการ วิเคราะห์สเปกตรัม เพื่อดูปริมาณฮาร์มอนิกสำหรับเฟส v และ w จะมีลักษณะในทำนองเดียวกับเฟส u จึงไม่ได้นำเสนอไว้ ณ ที่นี้ และเมื่อพิจารณาความสมดุลก่อนและหลังการชดเชย สังเกตได้ว่า ใน สภาวะก่อนการชดเชยมีความไม่สมดุลเกิดขึ้นเล็กน้อย โดยดูได้จากค่า %unbalance ในตารางที่ 9.1 มีค่าเท่ากับ 6.85 เปอร์เซ็นต์ (สมการที่ใช้คำนวณ %unbalance ดูได้จากสมการที่ (7-3) ในบทที่ 7) แต่ ภายหลังการชดเชยปรากฏว่าค่า %unbalance มีค่าเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายถึง ภายหลังการ ชดเชยระบบอยู่ในสภาวะสมดุล ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกใช้วิธี DQF ซึ่งเป็นวิธีที่มีการคำนวณกระแสเชิงอนุพันธ์ ดังนั้นกระแสอ้างอิงที่คำนวณได้จะรวมผลการชดเชย กระแสเชิงอนุพันธ์ดังกล่าวด้วย จึงส่งผลให้ระบบภายหลังการชดเชยอยู่ในสภาวะสมดุล นอกจากนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีการตรวจวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลก่อนการชดเชย ( $i_{N,before}$ ) และหลังการชดเชย ( $i_{N,after}$ ) ซึ่งจากการตรวจวัดพบว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล ภายหลังการชดเชย ดังผลการตรวจวัดที่แสดงไว้ในรูปที่ 9.4 อาจกล่าวได้ว่า ผลการทดสอบทาง ปฏิบัติในกรณีนี้ ให้ผลดีที่น่าพึงพอใจมากตลอดจนผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับผลการจำลอง สถานการณ์ที่ได้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 7.7

ตารางที่ 9.1 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแส สามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว

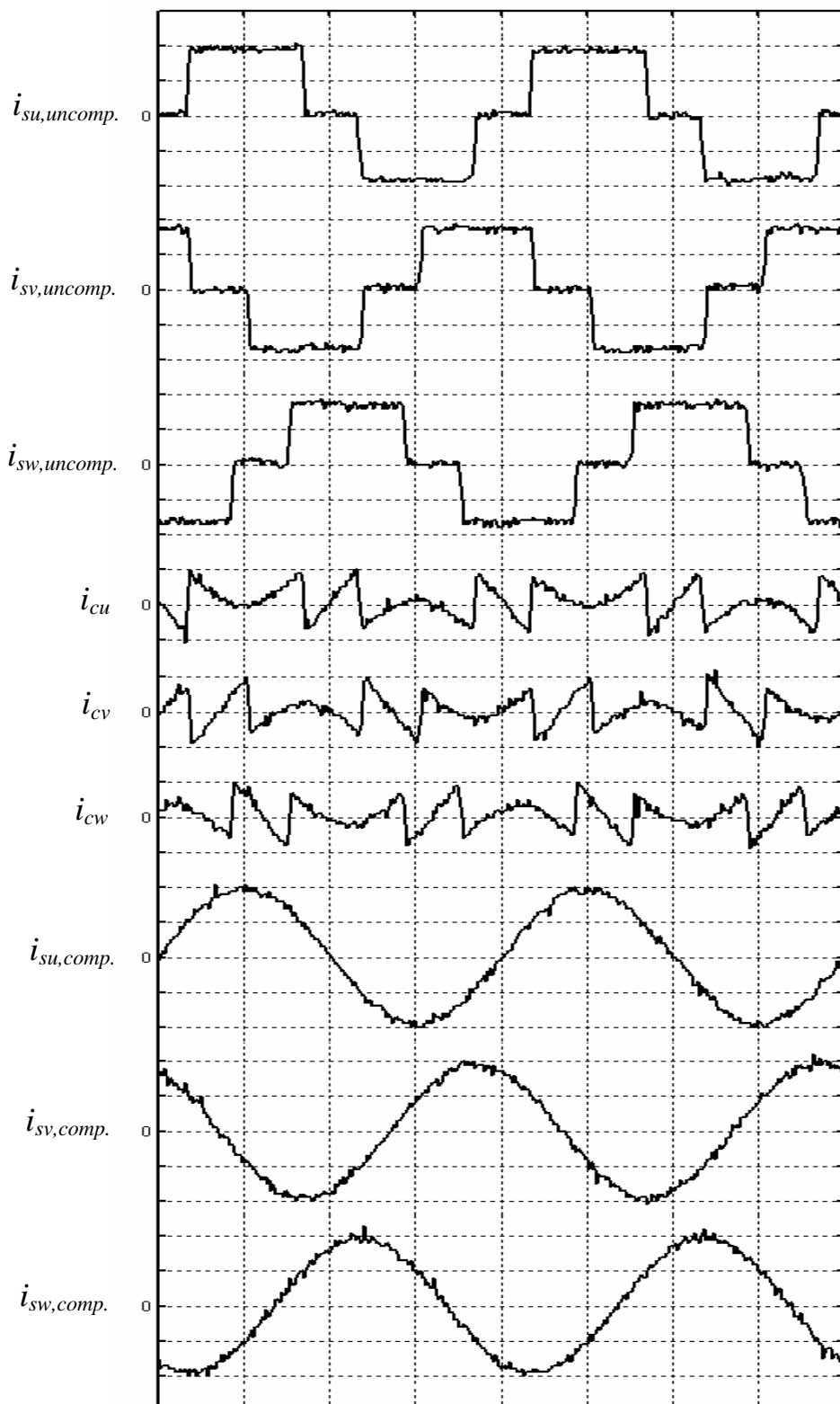
| สภาวะของ ระบบ | %THD <sub>i</sub><br>เฟส u | %THD <sub>i</sub><br>เฟส v | %THD <sub>i</sub><br>เฟส w | %THD <sub>i</sub><br>เฉลี่ย | $i_{su}$<br>(rms) | $i_{sv}$<br>(rms) | $i_{sw}$<br>(rms) | unbalance<br>(%) |
|---------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| ก่อนการ ชดเชย | 28.26                      | 28.31                      | 28.28                      | 28.28                       | 0.26              | 0.24              | 0.23              | 6.85             |
| หลังการ ชดเชย | 2.37                       | 2.43                       | 3.06                       | 2.64                        | 0.23              | 0.23              | 0.23              | 0                |



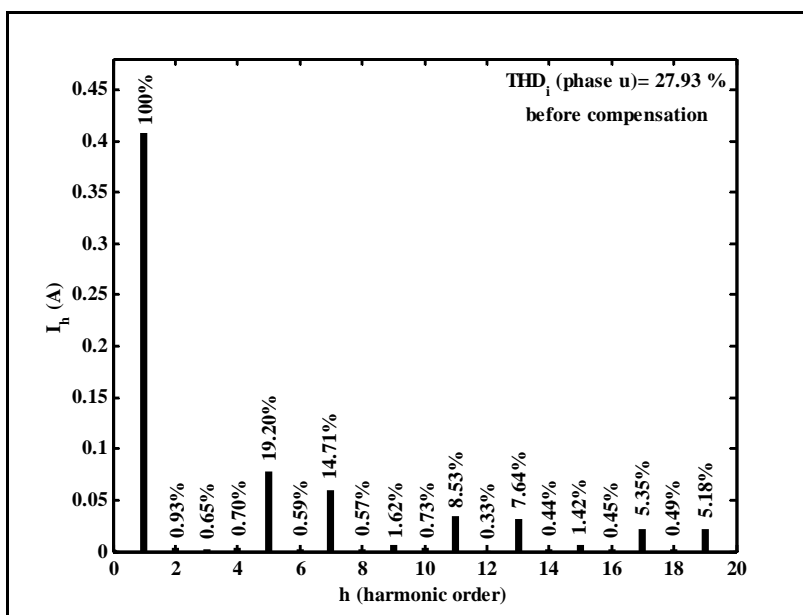
รูปที่ 9.4 รูปคลื่นกระแสในสายนิวทรัลก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดเป็นความต้านทาน (สเกลในแกนนอนเท่ากับ 5 ms/div. แกนตั้งเท่ากับ 0.2 A/div.)

### 9.3 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

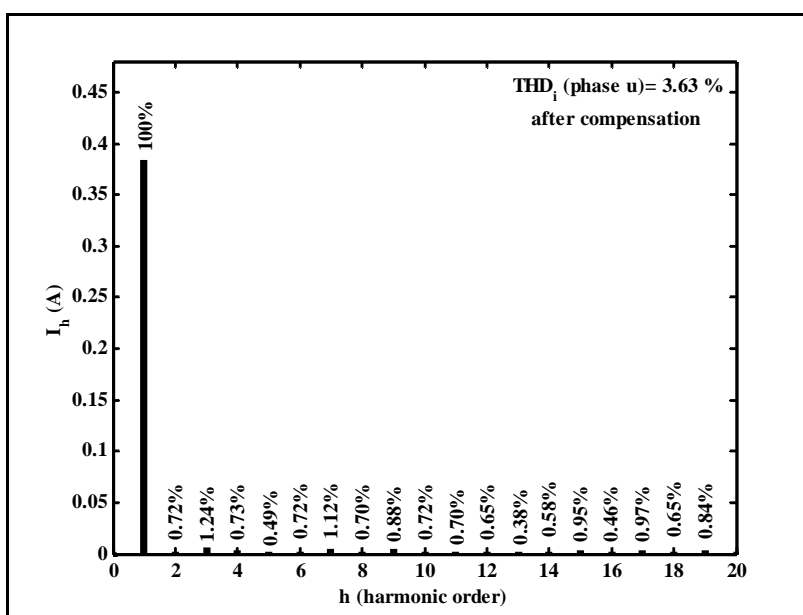
ระบบที่ใช้ในการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในหัวข้อนี้ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดหนึ่งชุดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ พิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบเหมือนกันกับที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 9.2 ความต้านทานที่ใช้เป็นโหลดให้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีขนาด 300 โอห์ม ในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำมีขนาด 1.95 เฮนรี รูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ที่บันทึกไว้จากการทดสอบ ได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 9.5 ซึ่งสังเกตได้ว่ากระแสไฟฟ้าก่อนการชดเชยมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ มีค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชยเท่ากับ 27.98 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 9.2 ภายหลังจากชดเชยกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์อย่างมาก ซึ่งค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชยเท่ากับ 2.79 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะก่อนการชดเชย และเมื่อดำเนินการวิเคราะห์สเปกตรัม เพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิก ก่อนและหลังการชดเชยของเฟส  $u$  ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อก่อนหน้า จะได้สเปกตรัมดังรูปที่ 9.6 โดยก่อนการชดเชยปริมาณ



รูปที่ 9.5 ผลการทดสอบกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ  
(สเกลในแกนนอนเท่ากับ 5 ms/div. แกนตั้งเท่ากับ 0.2 A/div.)



ก) ก่อนการชดเชย



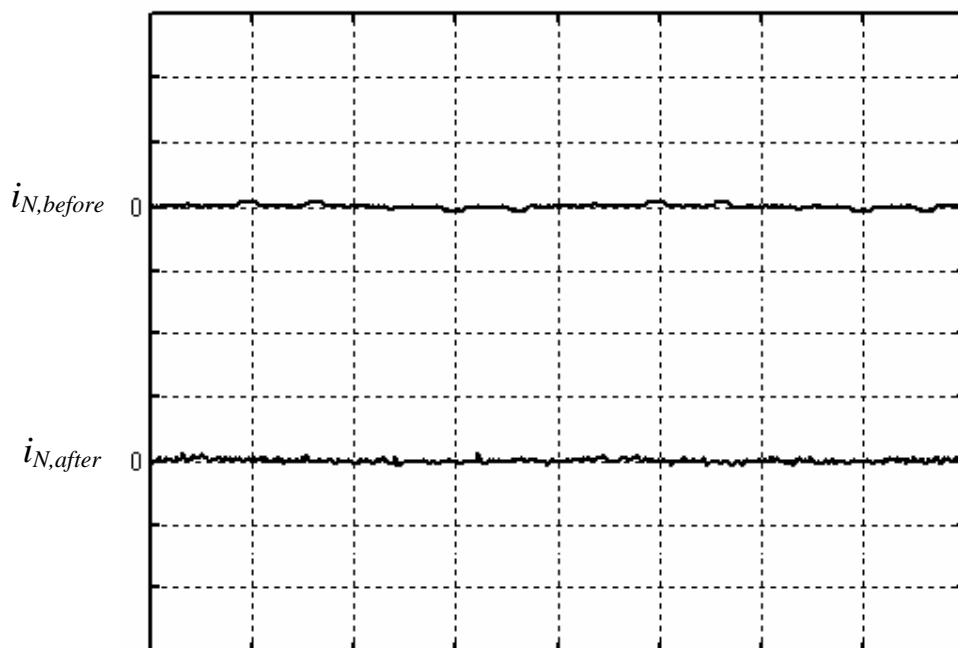
ข) หลังการชดเชย

รูปที่ 9.6 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเฟส u ก่อนและหลังการชดเชยกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 7 11 13 17 และ 19 มีค่าเกินขอบเขตมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 อยู่มาก แต่หลังการชดเชย 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 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 จะมีลักษณะในการทำงานเดียวกันกับเฟส u จึงไม่ได้นำเสนอไว้ ณ ที่นี้ และเมื่อพิจารณาความสมดุลของระบบ ก่อนและหลังการชดเชย สังเกตได้ว่าที่สภาวะก่อนการชดเชยระบบมีความไม่สมดุลเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย โดยดูได้จาก %unbalance มีค่าเท่ากับ 5.88 เปอร์เซ็นต์ ในตารางที่ 9.2 แต่ภายหลังจากชดเชยระบบกลับเข้าสู่สภาวะสมดุล และมีค่า %unbalance ภายหลังจากชดเชยเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ซึ่งการระบุนอกลักษณะด้วยวิธีนี้ ส่งผลให้ภายหลังจากชดเชยระบบจะอยู่ในสภาวะสมดุล (รายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับการความสมดุล หลังการชดเชยที่ใช้การระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธีDQF ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 7) นอกจากนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ทำการวัดรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล ก่อนและหลังการชดเชย ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 9.7 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าภายหลังจากชดเชย ไม่ปรากฏกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล เช่นเดียวกับผลการทดสอบในหัวข้อที่ 9.2

ตารางที่ 9.2 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแส สามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

| สภาวะของระบบ | %THD <sub>i</sub><br>เฟส u | %THD <sub>i</sub><br>เฟส v | %THD <sub>i</sub><br>เฟส w | %THD <sub>i</sub><br>เฉลี่ย | $i_{su}$<br>(rms) | $i_{sv}$<br>(rms) | $i_{sw}$<br>(rms) | unbalance<br>(%) |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 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 9.7 รูปสัญญาณกระแสในสายนิวทรัลก่อนและหลังการชดเชยกรณี โหลดเป็นความต้านทาน  
อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ (สเกลในแกนนอนเท่ากับ 5 ms/div. แกนตั้งเท่ากับ 0.2 A/div.)

#### 9.4 สรุป

ผลทดสอบในทางปฏิบัติ ของการใช้วิธี DQF ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ความคู่กับวงจรรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นวงจรขยายสัญญาณ ให้ผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจอย่างมาก ทั้งในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โหลดที่ทดสอบดังกล่าวถือเป็นโหลดแหล่งจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (current source nonlinear load, CSNL) เนื่องจากไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อการปรับเรียบแรงดัน ซึ่งก่อนการชดเชยค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยมีค่ามากกว่า IEEE Std. 519-1992 อยู่มากทั้งสองกรณี ภายหลังจากชดเชยด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟ ปรากฏว่า รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงความเป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์อย่างมาก และค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ย หลังการชดเชยอยู่ในขอบเขตมาตรฐานของ IEEE Std. 519-1992 อาจกล่าวได้ว่า ในภาพรวมปริมาณฮาร์มอนิกลดลงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ภายหลังจากชดเชยระบบจะกลับสู่สถานะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ถึงแม้ว่าก่อนการชดเชยระบบมีความไม่สมดุลเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากข้อดี ของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ที่พิจารณาค่ากระแสซีแควนซ์ศูนย์ ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟ จากการอธิบายทั้งหมดข้างต้นจึงสรุปได้ว่า



การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่สร้างขึ้น ประกอบกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก ด้วยวิธี DQF ให้ผลการกำจัดฮาร์โมนิกเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

## บทที่ 10

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 10.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ เพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบไฟฟ้าสามเฟส ทั้งนี้เนื่องจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ งานวิจัยวิทยานิพนธ์เริ่มต้นจากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2 และจากการศึกษาค้นคว้า พบว่า การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน กลุ่มแรกเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจผลรวมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ โดยไม่แสดงรายละเอียดอันดับของฮาร์มอนิก การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกประเภทนี้เหมาะกับการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ ส่วนกลุ่มที่สองเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่แสดงรายละเอียดอันดับของฮาร์มอนิก ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกประเภทนี้เหมาะกับการกำจัดฮาร์มอนิกบางอันดับ แต่เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ต้องการพัฒนาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ที่กำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ ดังนั้นจึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจผลรวมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบเพียงอย่างเดียว และจากการศึกษา พบว่า วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่นิยมใช้ในอดีตมีหลายวิธี วิธีการที่มีผู้สนใจประยุกต์ใช้กันกว้างขวางมี 4 วิธี ได้แก่ วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (วิธี PQ) วิธีการหมุนแกน (วิธี DQ) วิธีตรวจจับซิงโครไนส์ (วิธี SD) และวิธีวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (วิธี SWFA) วิธีการทั้งสี่นี้มีความน่าสนใจตรงที่รูปแบบและหลักการของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกทั้งสี่มีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยสิ้นเชิง นั่นคือ วิธี PQ ใช้หลักการคำนวณกำลังแอกทีฟ และรีแอกทีฟ เพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิก ส่วนวิธี DQ ใช้หลักการหมุนแกน เพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิกทั้งหมด บนแกน  $d$  และแกน  $q$  วิธี SD ใช้หลักการคำนวณกำลังแอกทีฟ เพื่อหาค่ากระแสมูลฐาน และนำกระแสมูลฐานที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ วิธีสุดท้ายที่ศึกษา คือ วิธี SWFA ที่ใช้หลักการคำนวณหาค่ากระแสมูลฐานด้วยอนุกรมฟูริเยร์ ผสมผสานเทคนิควินโดว์เลื่อน และเมื่อได้ค่ากระแสมูลฐานแล้ว จะนำค่ากระแสดังกล่าวไปคำนวณหาปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบอีกต่อหนึ่ง รายละเอียดต่าง ๆ

เกี่ยวกับวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสี่วิธีข้างต้นได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 นอกจากนี้ในการศึกษาและวิจัยเรื่องฮาร์มอนิก มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ควรทำความเข้าใจทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก อาทิเช่น ความหมายของฮาร์มอนิก นิยามของฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ผลเสียของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า การคำนวณค่าตัวประกอบความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า วิธีการกำจัดฮาร์มอนิก รวมถึงข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก ตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ เหล่านี้ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3

การพัฒนาวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ตั้งต้นจากการศึกษา และทำความเข้าใจ เกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในอดีต ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ถึงข้อดี และข้อเสียของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี วิธีระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีใหม่ที่พัฒนาขึ้น เป็นการผสมผสานข้อดีของวิธี DQ และวิธี SWFA เข้าไว้ด้วยกัน จึงเรียกวินี้ว่า วิธี DQF (DQ axis with Fourier) ข้อดีของวิธี DQ ที่นำมาใช้ คือ มีการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์ (zero sequence current) หรือ  $i_0$  ซึ่งกระแสดังกล่าวจะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุล เมื่อค่านึงกระแสลำดับศูนย์ จะส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ระบบกลับมาอยู่ในสภาวะสมดุลหลังกำจัดฮาร์มอนิก ส่วนข้อดีของวิธี SWFA คือ การคำนวณเพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิก ตามหลักการของวิธี SWFA เหมาะกับการใช้งานในเวลาจริง อีกทั้งมีความถูกต้องสูง เมื่อเทียบกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ DQ และ SD จากข้อดีของวิธี DQ และวิธี SWFA ดังกล่าวข้างต้น ส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี DQF ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้อง ใช้เวลาดำเนินการสั้น และส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟทำได้ดีที่สุด 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 5

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF กับวิธีอื่น ๆ ในอดีตสี่วิธี เปรียบเทียบโดยใช้ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก ที่พิจารณาแบบจำลองของวงจรกรองเป็นแหล่งจ่ายกระแสอดุมคคิต ที่กำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียว โดยยังไม่คำนึงถึงข้อจำกัดในทางปฏิบัติของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ดัชนีชี้วัดสมรรถนะของวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี พิจารณาจากค่า %THD และค่า %unbalance หลังการกำจัดฮาร์มอนิกเป็นสำคัญ การจำลองสถานการณ์ได้พิจารณาระบบ 4 รูปแบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแตกต่างกัน ได้แก่ วงจร

เรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเหล่านี้ ไม่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุในการปรับเรียบแรงดัน จึงจัดเป็นโหลดในกลุ่มแหล่งจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (current-source nonlinear load, CSNL) ที่ทำให้เกิดเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกในระบบเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีกรอบของการศึกษาวิจัยในด้านการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเป็นการ โดยเฉพาะ จึงยังไม่พิจารณาผลเนื่องจากแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชยในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว มีค่าเท่ากับ 28.65 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายหลังการชดเชยที่ใช้วิธีการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ DQ SD SWFA และ DQF มีค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชย เท่ากับ 0.99 1.02 0.88 0 และ 0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ พบว่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชย มีค่าเท่ากับ 28.52 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายหลังการชดเชยที่อาศัยวิธี PQ DQ SD SWFA และ DQF ในการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิก มีค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชย เท่ากับ 0.77 0.93 0.27 0 และ 0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และถ้าเปลี่ยนโหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชยของระบบนี้มีค่าเท่ากับ 28.63 เปอร์เซ็นต์ แต่หลังการชดเชยค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ย ลดลงเหลือเพียง 0.98 1.12 1.12 0 และ 0 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้การระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ DQ SD SWFA และ DQF ตามลำดับ ระบบดังกล่าวสามระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ ดังที่กล่าวข้างต้น เป็นระบบที่อยู่ในสถานะสมดุลก่อนการชดเชย แต่ในระบบสุดท้ายที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อกับโหลดไม่สมดุลในแต่ละเฟส โดยก่อนการชดเชย %THD<sub>i</sub> เฉลี่ย และ %unbalance มีค่าเท่ากับ 28.39 และ 6.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และภายหลังการชดเชย ที่ใช้วิธี PQ ระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิก มีค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ย และ %unbalance เท่ากับ 3.91 และ 1.74 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความไม่สมดุลยังคงมีอยู่บ้างเล็กน้อย ภายหลังการชดเชย และถ้าใช้วิธี DQ ในการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิก พบว่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ย และ %unbalance ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 2.84 และ 2.10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังปรากฏความไม่สมดุลอยู่บ้าง เช่นเดียวกับวิธี PQ และในกรณีที่ใช้วิธี SD ระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิก พบว่า ภายหลังการชดเชย ความไม่สมดุลปรากฏอยู่น้อยมาก เมื่อเทียบกับวิธี PQ และ DQ โดย %unbalance ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0.66 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ %THD<sub>i</sub> เฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 10.25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกินข้อกำหนดมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และถ้าใช้การระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA %THD<sub>i</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 1.76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในกรอบมาตรฐานของ IEEE Std.519-1992 แต่การระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA มีข้อเสียคือ ไม่สามารถทำให้ระบบอยู่ในสถานะสมดุลได้หลังการชดเชย โดยค่า %unbalance ภายหลังการชดเชย

มีค่าเท่ากับ 10.03 เปอร์เซ็นต์ วิธีการสุดท้ายของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ คือ วิธี DQF โดย %THD<sub>r</sub> เฉลี่ย และ %unbalance หลังการชดเชยที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้ มีค่าเท่ากับ 1.60 และ 0.16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีข้างต้น ดังนั้นจากผลดังกล่าว จึงอาจสรุปได้ว่า วิธี DQF เป็นวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี PQ DQ SD และ SWFA โดยวิธี DQF ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถให้ข้อมูลฮาร์มอนิกที่มีความถูกต้องมากที่สุด นำไปสู่การกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบได้ดีที่สุด รวมถึงสามารถรักษาสถานะสมดุลหลังการกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างดี ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวทั้ง 4 ระบบได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 7 โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งหมด ที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้รับการนำเสนอรายละเอียดไว้ในบทที่ 6 ภาคผนวก ก, ข และ ค

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการทดสอบในทางปฏิบัติ เพื่อเป็นการยืนยันถึงสมรรถนะของวิธี DQF เมื่อใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การทดสอบดำเนินการกับระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายกระแสให้ความต้านทาน และระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายกระแสให้ความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ สาร์ควอเตอร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกได้รับการอธิบายไว้ในบทที่ 8 สาร์ควอเตอร์ดังกล่าวประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า วงจรปรุงแต่งสัญญาณ การ์ด DSP Texas Instruments-eZdsp™ F2812 ดำเนินงานที่พิกัด 60 โวลต์อาร์เอ็มเอส 0.3 แอมแปร์อาร์เอ็มเอส ปริมาณฮาร์มอนิกที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์นั้นอยู่ในรูปของกระแสอ้างอิงสามเฟส กระแสอ้างอิงเหล่านี้ถูกส่งออกมาทางวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่มีความแยกชัด 16 บิต และส่งต่อให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ เพื่อสร้างกระแสชดเชยฮาร์มอนิกให้กับระบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรขยายสัญญาณ 150 วัตต์ ที่อ้างอิงมาจากวารสาร Popular Electronics คังแผนภาพวงจรที่ปรากฏในภาคผนวก ง ย่านที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานวงจรกรองกำลังแอกทีฟนี้อยู่ในช่วง 10 เฮิร์ตซ์ถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลทดสอบในทางปฏิบัติของการใช้วิธี DQF ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ควบคู่กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นวงจรขยายสัญญาณ ให้ผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจอย่างมาก ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว ค่า %THD<sub>r</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 28.28% และในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ค่า %THD<sub>r</sub> เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 27.98% ซึ่งค่าทั้งสองมีค่ามากกว่าที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 แต่ภายหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ปรากฏว่า รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงความเป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ทั้งสองกรณี และค่า %THD<sub>r</sub> เฉลี่ยหลังการชดเชยในกรณีโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว และ โหลดของ

วงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 2.64 % และ 2.79% ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 โดยในภาพรวม ปริมาณฮาร์มอนิกลดลงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 9

## 10.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการเปรียบเทียบสมรรถนะของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นวงจรขยายสัญญาณ กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน การเปรียบเทียบอาจพิจารณาในหลาย ๆ ด้านด้วยกัน เช่น ราคาที่ใช้ในการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยพิจารณาเปรียบเทียบราคาที่พักัดกำลังเท่ากัน ประสิทธิภาพการฉีดกระแสชดเชยในการกำจัดฮาร์มอนิก ซึ่งอาจดูจากค่า %THD<sub>i</sub> เหลือ หลังการชดเชย การเปรียบเทียบสมรรถนะของวงจรรอกกำลังแอกทีฟนี้ จะนำไปสู่การตัดสินใจในการเลือกใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อได้ข้อสรุปในการเปรียบเทียบข้างต้น ควรมีการพัฒนาวงจรรอกกำลังแอกทีฟต่อไป จนกว่าการฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิก จะมีสมรรถนะใกล้เคียงกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟอุดมคติ ที่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ทั้งหมดอย่างสมบูรณ์

2. ควรพัฒนาอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี DQF ให้สามารถใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลังไฮบริด ที่เป็นการผสมผสานข้อดีระหว่างวงจรรอกกำลังพาสซีฟ และวงจรรอกกำลังแอกทีฟเข้าด้วยกัน อีกทั้งในปัจจุบัน ต้นทุนของวงจรรอกกำลังไฮบริดมีราคาถูกกว่าวงจรรอกกำลังแอกทีฟ จึงอาจส่งผลให้ในอนาคตมีการใช้วงจรรอกกำลังไฮบริดกันอย่างแพร่หลายด้วยเหตุนี้จึงควรพัฒนาอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี DQF เพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับได้ แบบแยกอันดับ เพื่อใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลังไฮบริดได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ควรหาข้อสรุปเกี่ยวกับการใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟ ร่วมกับวงจรรอกกำลังพาสซีฟ ว่าวงจรรอกประเภทใด เหมาะสมกับการกำจัดฮาร์มอนิกอันดับใด ทั้งนี้อาจดูความเหมาะสมเกี่ยวกับต้นทุนการสร้างวงจรดังกล่าวด้วย

3. ควรพัฒนา และขยายขีดความสามารถของอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี DQF ให้ใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ที่ใช้สำหรับกำจัดแรงดันฮาร์มอนิก เนื่องจากในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอการใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับการกำจัดเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียว ด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน แต่ในความเป็นจริง ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นมีทั้งกระแสฮาร์มอนิก และแรงดันฮาร์มอนิก ดังนั้นถ้าพัฒนาอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี DQF ให้สามารถหาปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกได้ อย่าง

ถูกต้อง จะส่งผลให้วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมกำจัดฮาร์โมนิกได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ควรศึกษา ค้นคว้า รวมถึงการพัฒนาวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดแรงดันฮาร์โมนิก ได้ใกล้เคียงกับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมในอุดมคติด้วยเช่นกัน

4. ควรศึกษาค้นคว้า และหาข้อสรุป เกี่ยวกับการทำงานร่วมกันของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน กับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ซึ่งจัดเป็นวงจรรองกำลังไฮบริดประเภทหนึ่ง ประเด็นสำคัญที่ควรสนใจมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเด็น โดยในประเด็นแรก ควรพัฒนาอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกวิธี DQF ให้สามารถใช้งานร่วมกับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และแบบอนุกรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไปพร้อม ๆ กัน ประเด็นที่สอง ควรพิจารณาหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งวงจรรองกำลังแอกทีฟทั้งสอง เพื่อให้ผลการกำจัดฮาร์โมนิกได้ดีที่สุด ทั้งนี้อาจพิจารณาได้จากค่า %THD<sub>i</sub> เฉลี่ย และ %THD<sub>v</sub> เฉลี่ย หลังการชดเชย

5. ควรศึกษาค้นคว้า และหาข้อสรุป เกี่ยวกับตำแหน่งการติดตั้งวงจรรองกำลังแอกทีฟทั้งแบบขนาน และแบบอนุกรมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อหาตำแหน่งการติดตั้งที่ดีที่สุด ที่ทำให้กำจัดฮาร์โมนิกได้มากที่สุด อีกทั้งควรพิจารณาถึงพิกัด และจำนวนของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ โดยพิจารณาจากความเหมาะสมในเรื่องต้นทุน และผลการกำจัดฮาร์โมนิกเป็นสำคัญ โดยข้อสรุปที่ได้จากการศึกษา และวิจัย ควรมีวิธีการประเมินพิกัด และจำนวนวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ สำหรับโรงงานใด ๆ ได้อย่างเหมาะสมที่สุด ซึ่งอาจหมายถึง ใช้ต้นทุนน้อยที่สุด แต่ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์โมนิกมีค่าสูงที่สุดนั่นเอง

6. การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง เป็นประเด็นสำคัญที่ควรให้ความสนใจ ไปพร้อม ๆ กับการกำจัดฮาร์โมนิก ซึ่งถ้าไม่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง อาจส่งผลให้ผู้ใช้ไฟต้องจ่ายค่าไฟมากขึ้น ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมมีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นควรศึกษาค้นคว้า อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก ที่พิจารณาผลการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไปพร้อม ๆ กับการกำจัดฮาร์โมนิก โดยหลังจากที่วงจรรองกำลังแอกทีฟฉีดกระแสชดเชยตามค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก ที่รวมผลการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ปริมาณฮาร์โมนิกควรมีค่าลดลงภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และค่าตัวประกอบกำลังควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ด้วยเช่นกัน จากที่กล่าวข้างต้น วงจรรองกำลังแอกทีฟจะสามารถกำจัดฮาร์โมนิกไปพร้อม ๆ กับการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ซึ่งจะลดต้นทุนการซื้ออุปกรณ์สำหรับปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง แต่ซื้อวงจรรองกำลังแอกทีฟเพียงตัวเดียว ที่สามารถทำงานได้ทั้งกำจัดฮาร์โมนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

7. ควรพัฒนาวิธีการกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยมีประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาอยู่ 3 ประเด็นด้วยกัน โดยประเด็นแรกเป็นการค้นคว้าเกี่ยวกับโครงสร้างของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้สำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส รวมถึงเทคนิคการควบคุม

การทำงานของวงจรรองดังกล่าวนั้นให้มีประสิทธิภาพ ประเด็นที่สองเป็นการค้นคว้า และพัฒนาเกี่ยวกับอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ที่สามารถใช้งานร่วมกับวงจรรองกำลังแอกทีฟได้อย่างได้ผล และในประเด็นสุดท้ายที่ต้องพิจารณา คือ ต้นทุนการสร้างวงจรรองกำลังแอกทีฟ ที่รวมชุดระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ไม่ควรมีราคาสูงมากเกินไป ทั้งนี้เพื่อการขยายผลเชิงพาณิชย์ต่อไป



## รายการอ้างอิง

- สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ. (2544). ฮาร์มอนิกในกระแสของอุปกรณ์ไฟฟ้า. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.
- 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.
- Akagi, H., Ogasawara, S., Kim, H. (1999). The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: a comprehensive approach. **IEEE Industry Applications Conference**. 1: 431-439.
- 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.
- Chang, G. W., Chen, S. K., and Chu, M. (2002). An Efficient  $a-b-c$  Reference Frame-based Compensation Strategy for Three-Phase Active Power Filter Control. **Electric Power Systems Research**. 60 (3): 161-166.
- Chen, C. L., Lin, C. E., and Huang, C. L. (1994). The Reference Active Source Current for Active Power Filter in an Unbalanced Three-Phase Power System via the Synchronous Detection Method. **IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference**. 2: 502-505.
- Chen, C. L., Lin, C. E., and Huang, C. L. (1994). The Reference Active Source Current for Active Power Filter in an Unbalanced Three-Phase Power System via the Method of Instantaneous Power Theory. **IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC/94)**. 1020-1023.

- Chen, C. L., Lin, C. E., and Huang, C. L. (1994). An active filter for unbalanced three-phase system using synchronous detection method. **IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC '94)**. 2: 1451-1455.
- 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.
- EI-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.
- Elham, B. M., Clarence, L. W., and Adly, A. G. (1992). A Harmonic Analysis of the Induction Watthour Meter's Registration Error. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 7 (3): 1080-1088.
- Furuhashi, T., Okuma, S., and Uchikawa, Y. (1990). A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 37 (1): 86-90.
- 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.
- Ho, J. M., and Liu, C. C. (2001). The Effects of Harmonics on Differential Relay for a Transformer. **IEE International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)**. 2 (482).
- 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**.
- Indrajit, P., and Paul, J. S. (1989). Effect of Harmonics on Power Measurement. **IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference**, 129-132.
- 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.

- Jung, Y.-G., Kim, W.-Y., Lim, Y.-C., Yang, S.-H., and Harashima, F. (2003). The Algorithm of Expanded Current Synchronous Detection for Active Power Filters Considering Three-Phase Unbalanced Power System. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 50 (5): 1000–1006.
- Laurene, V. F. (1999). **Applied numerical analysis using MATLAB**. United States of America: Prentice-Hall.
- Lin, B. R., Yang, B. R., and Tsai, H. R. (2002). Analysis and Operation of Hybrid Active Filter for Harmonic Elimination. **Electric Power Systems Research**. 62 (3): 191-200.
- Lin, C. E., Chen, C. L., and Huang, C. L. (1992). Calculating Approach and Implementation for Active Filters in Unbalanced Three-Phase System using Synchronous Detection Method. **Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, 1992. 'Power Electronics and Motion Control'**. 1: 374-380.
- Naewngerndee, N., Sukcharoen, C., and Kulworawanichpong, T. (2006). Simulation of Single-Phase Induction Motor Drives with Non-sinusoidal Power Supply. **The WSEAE Transactions on Systems**. 5(5): 1029-1034.
- Ong, C. M. (1998). **Dynamic Simulation of Electric Machinery**. United States of America: Prentice-Hall.
- Peng, F. Z., Ott, G. W., Jr., and Adams, D. J. (1998). Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Four-Wire Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 13 (6): 1174-1181.
- Singh, B. N. , Singh, B. , Chandra, A. and Al-Haddad, K. (1999). Digital implementation of a new type of hybrid filter with simplified control strategy. **IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'99)**. 1: 642 – 648.
- Soares, V., Verdelho, P., and Marques, G. D. (2000). An Instantaneous Active and Reactive Current Component Method for Active Filters. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 15 (4): 660-669.
- Srianthumrong, S. (2003). **Study of Series Active and Shunt Hybrid Filters for Harmonic Compensation of Large-Capacity Three-Phase Diode Rectifiers**. Ph.D. Dissertation, Tokyo Institute of Technology, Japan.

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 ก

การคำนวณหาค่ากระแส  $i_{78A}(kT)$  และ  $i_{78B}(kT)$

### การคำนวณหาค่ากระแส $i_{78A}(kT)$ และ $i_{78B}(kT)$

การพิจารณาหาค่า  $i_{78A}(kT)$  และ  $i_{78B}(kT)$  เริ่มต้นจากการใช้กฎของเคอร์ชอฟระหว่าง โหนดที่ (7) และ โหนดที่ (8) ในเบื้องต้นพิจารณาในช่วงเวลา  $0 < t \leq t_{switch}$  ซึ่ง  $i_{78B}(t)$  เป็นศูนย์ ดังนั้น จะมีการความสัมพันธ์ทางวงจรเป็น

$$v_7(t) - v_8(t) = R_1 i_{78A}(t) + v_{L1}(t) \quad (\text{ก-1})$$

จากสมการที่ (ก-1) เมื่อทำการแปลงเป็นเชิงเลขจะได้ดังสมการที่ (ก-2)

$$v_7(kT) - v_8(kT) = R_1 i_{78A}(kT) + v_{L1}(kT) \quad (\text{ก-2})$$

จากสมการที่ (ก-2) การหาค่า  $v_{L1}(kT)$  ในโดเมนเวลาเต็มหน่วยเริ่มต้นจากการพิจารณาสมการ  $v_{L1}(t) = L_1 \frac{di_{78A}(t)}{dt}$  ซึ่งเป็นสมการในเวลาต่อเนื่อง โดยถ้าจัดเทอมสมการดังกล่าวใหม่จะได้ดัง สมการที่ (ก-3)

$$v_{L1}(t)dt = L_1 di_{78A}(t) \quad (\text{ก-3})$$

ดำเนินการอินทิเกรตสมการที่ (ก-3) ตั้งแต่  $t_0$  ถึง  $t$  ของสมการดังกล่าวจะได้ดังสมการที่ (ก-4)

$$\int_{t_0}^t v_{L1}(t)dt = L_1 \int_{t_0}^t di_{78A}(t) \quad (\text{ก-4})$$

เมื่อประมาณเทอมอินทิเกรตในสมการที่ (ก-4) โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู จะได้ดังสมการที่ (ก-5)

$$\frac{T}{2} \{v_{L1}(kT) + v_{L1}(k-1)T\} = L_1 \{i_{78A}(kT) - i_{78A}(k-1)T\} \quad (\text{ก-5})$$

จากสมการที่ (ก-5) ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ จึงมีค่าดังสมการที่ (ก-6) (Arrillaga and Watson, 2001)

$$v_{L1}(kT) = \frac{2L_1}{T} \{i_{78A}(kT) - i_{78A}(k-1)T\} - v_{L1}(k-1)T \quad (\text{ก-6})$$

เมื่อนำ  $v_{L1}(kT)$  จากสมการที่ (ก-6) แทนลงในสมการที่ (ก-2) จะได้สมการที่ (ก-7)

$$\begin{aligned} v_7(kT) - v_8(kT) &= R_1 i_{78A}(kT) \\ &+ \frac{2L_1}{T} \{i_{78A}(kT) - i_{78A}(k-1)T\} - v_{L1}(k-1)T \end{aligned} \quad (\text{ก-7})$$

จากสมการที่ (ก-7) จะได้ค่ากระแส  $i_{78A}(kT)$  ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (ก-8)

$$\begin{aligned} i_{78A}(kT) &= \frac{T}{R_1 T + 2L_1} v_7(kT) - \frac{T}{R_1 T + 2L_1} v_8(kT) \\ &+ \frac{2L_1}{R_1 T + 2L_1} i_{78A}(k-1)T + \frac{T}{R_1 T + 2L_1} v_{L1}(k-1)T \end{aligned} \quad (\text{ก-8})$$

ส่วนการหาค่า  $i_{78B}(kT)$  ดำเนินการได้ในทำนองเดียวกันกับการหาค่า  $i_{78A}(kT)$  และผลลัพธ์สุดท้ายของการหาค่า  $i_{78B}(kT)$  แสดงไว้ดังสมการที่ (ก-9)

$$\begin{aligned} i_{78B}(kT) &= \frac{T}{R_2 T + 2L_2} v_7(kT) - \frac{T}{R_2 T + 2L_2} v_8(kT) \\ &+ \frac{2L_2}{R_2 T + 2L_2} i_{78B}(k-1)T + \frac{T}{R_2 T + 2L_2} v_{L2}(k-1)T \end{aligned} \quad (\text{ก-9})$$

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาค่ากระแส  $i_a(kT)$  และ  $\omega_m(kT)$



### การคำนวณหาค่ากระแส $i_a(kT)$ และ $\omega_m(kT)$

การพิจารณาหาค่า  $i_a(kT)$  เริ่มต้นจากการใช้กฎของเคอร์ชอฟระหว่างโหนดที่ (7) และ โหนดที่ (8) จะมีความสัมพันธ์ทางวงจรไฟฟ้าดังสมการที่ (ข-1)

$$v_7(t) - v_8(t) = i_a(t)R_a + v_{L_a}(t) + k_b\omega_m(t) \quad (\text{ข-1})$$

สมการดังกล่าวอยู่ในโดเมนเวลาต่อเนื่อง เมื่อทำการแปลงเป็นเชิงเลขจะได้สมการในโดเมนเวลาเต็มหน่วยดังสมการที่ (ข-2)

$$v_7(kT) - v_8(kT) = i_a(kT)R_a + v_{L_a}(kT) + k_b\omega_m(kT) \quad (\text{ข-2})$$

เมื่อแทนค่า  $v_{L_a}(kT) = \frac{2L_a}{T} \{i_a(kT) - i_a(k-1)T\} - v_{L_a}(k-1)T$  ซึ่งเป็นค่าแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ ลงในสมการที่ (ข-2) จะได้ดังสมการที่ (ข-3) แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $v_{L_a}(kT)$  ได้รับการแสดงรายละเอียดที่มาไว้แล้วในภาคผนวก ก.

$$v_7(kT) - v_8(kT) = i_a(kT)R_a + \frac{2L_a}{T} \{i_a(kT) - i_a(k-1)T\} - v_{L_a}(k-1)T + k_b\omega_m(kT) \quad (\text{ข-3})$$

จากสมการที่ (ข-3) จะได้  $i_a(kT)$  ดังสมการที่ (ข-4)

$$i_a(kT) = \frac{T}{R_a T + 2L_a} v_7(kT) - \frac{T}{R_a T + 2L_a} v_8(kT) + \frac{2L_a}{R_a T + 2L_a} i_a(k-1)T + \frac{T}{R_a T + 2L_a} v_{L_a}(k-1)T - \frac{k_b T}{R_a T + 2L_a} \omega_m(kT) \quad (\text{ข-4})$$

จากการอธิบายข้างต้นเป็นการดำเนินการเพื่อหาค่า  $i_a(kT)$  แต่ถ้าต้องการหาค่า  $\omega_m(kT)$  จะเริ่มต้นการพิจารณาจากกฎการเคลื่อนที่แบบหมุนของนิวตันดังสมการที่ (ข-5) โดยที่  $\alpha(t)$  คือ ความเร่งเชิงมุมของมอเตอร์ (เรเดียน/วินาที<sup>2</sup>)

$$T_e(t) - T_L(t) - B_m \omega_m(t) = J_m \alpha(t) \quad (\text{ข-5})$$

จากสมการที่ (ข-5) เมื่อทำการแปลงเป็นเชิงเลขจะได้ดังสมการที่ (ข-6)

$$T_e(kT) - T_L(kT) - B_m \omega_m(kT) = J_m \alpha(kT) \quad (\text{ข-6})$$

การหาค่า  $\alpha(kT)$  ในสมการที่ (ข-6) เริ่มต้นพิจารณาจากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (ข-7)

$$\alpha(t) = \frac{d\omega_m(t)}{dt} \quad (\text{ข-7})$$

จากสมการที่ (ข-7) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (ข-8)

$$\alpha(t)dt = d\omega_m(t) \quad (\text{ข-8})$$

เมื่อดำเนินการอินทิเกรตสมการที่ (ข-8) จะได้ดังสมการที่ (ข-9)

$$\int_{t_0}^t \alpha(t)dt = \int_{t_0}^t d\omega_m(t) \quad (\text{ข-9})$$

จากสมการที่ (ข-9) เมื่อใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูในการประมาณค่าเทอมอินทิเกรตจะได้ดังสมการที่ (ข-10)

$$\frac{T}{2} \{ \alpha(kT) + \alpha(k-1)T \} = \omega_m(kT) - \omega_m(k-1)T \quad (\text{ข-10})$$

เมื่อปรับรูปสมการที่ (ข-10) จะได้ค่า  $\alpha(kT)$  ดังสมการที่ (ข-11)

$$\alpha(kT) = \frac{2\omega_m(kT)}{T} - \frac{2\omega_m(k-1)T}{T} - \alpha(k-1)T \quad (\text{ข-11})$$

แทนค่า  $\alpha(kT)$  จากสมการที่ (ข-11) และใช้การประมาณ  $T_e(kT) \cong k_t i_a(k-1)T$  เพื่อให้ความสัมพันธ์ต่าง ๆ อยู่ในกรอบที่สามารถคำนวณได้โดยไม่ยุ่งยาก ภายใต้ข้อสมมติว่า  $i_a$  มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากภายในช่วงเวลาสั้น ๆ ในสมการที่ (ข-6) จะได้ค่า  $\omega_m(kT)$  ดังสมการที่ (ข-12)

$$\begin{aligned} \omega_m(kT) = & \frac{k_t T}{2J_m + B_m T} i_a(k-1)T - \frac{T}{2J_m + B_m T} T_L(kT) \\ & + \frac{2J_m}{2J_m + B_m T} \omega_m(k-1)T + \frac{J_m T}{2J_m + B_m T} \alpha(kT) \end{aligned} \quad (\text{ข-12})$$

ภาคผนวก ค

การคำนวณหาค่ากระแส  $i_{qs}(kT)$  และ  $i_{ds}(kT)$

### การคำนวณหาค่ากระแส $i_{qs}(kT)$ และ $i_{ds}(kT)$

การคำนวณหาค่ากระแส  $i_{qs}(kT)$  และ  $i_{ds}(kT)$  เริ่มต้นจากการพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ที่มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (ค-1)

$$\frac{d}{dt}[i] = [A][i] + [B][v] \quad (\text{ค-1})$$

โดยที่

$$[A] = [D]^{-1}[E] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix}$$

$$[B] = [D]^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} \end{bmatrix}$$

$$[i] = [i_{qs} \quad i_{ds} \quad i'_{qr} \quad i'_{dr}]^T$$

$$[v] = [v_{qs} \quad v_{ds} \quad v'_{qr} \quad v'_{dr}]$$

รายละเอียดของเมตริกซ์  $[E]$  และเมตริกซ์  $[D]$  แสดงไว้ในสมการที่ (ค-2) และ (ค-3) ตามลำดับ

$$[E] = \begin{bmatrix} -r_{qs} & 0 & \omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & \omega_r L_{mqs} \cos \theta_r \\ 0 & -r'_{ds} & -\omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & \omega_r L_{mqs} \sin \theta_r \\ \omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & -\omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & -r'_r & 0 \\ \omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & \omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & 0 & -r'_r \end{bmatrix} \quad (\text{ค-2})$$

$$[D] = \begin{bmatrix} L'_{lqs} + L_{mqs} & 0 & L_{mqs} \cos \theta_r & -L_{mqs} \sin \theta_r \\ 0 & (L'_{lds} + L_{mqs}) & L_{mqs} \sin \theta_r & L_{mqs} \cos \theta_r \\ L_{mqs} \cos \theta_r & L_{mqs} \sin \theta_r & (L'_{lr} + L_{mqs}) & 0 \\ -L_{mqs} \sin \theta_r & L_{mqs} \cos \theta_r & 0 & (L'_{lr} + L_{mqs}) \end{bmatrix} \quad (\text{ค-3})$$

การคำนวณค่า  $i_{qs}(kT)$  คำนวณได้จากสมการที่ (ค-4) ส่วนการคำนวณ  $i_{ds}(kT)$  คำนวณได้จากสมการที่ (ค-5) ดังนี้

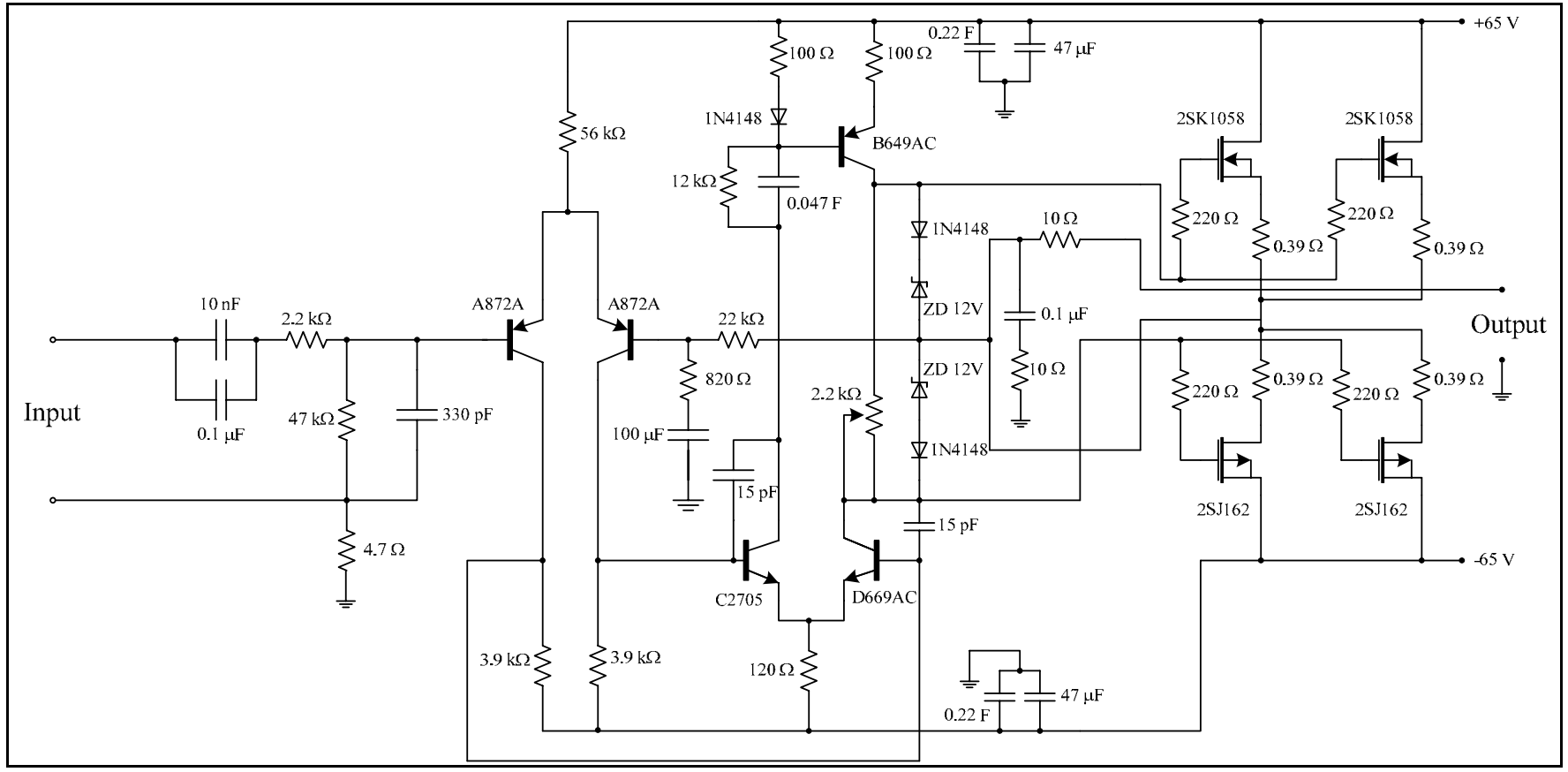
$$i_{qs}(kT) = \frac{TA_{12}i_{ds}(k-1)T + TA_{13}i_{qr}(k-1)T + TA_{14}i_{dr}(k-1)T + TB_{11}v_{qs}(k-1)T + TB_{12}v_{ds}(k-1)T + i_{qs}(k-1)T}{1 - TA_{11}} \quad (\text{ค-4})$$

$$i_{ds}(kT) = \frac{TA_{21}i_{qs}(k-1)T + TA_{23}i_{qr}(k-1)T + TA_{24}i_{dr}(k-1)T + TB_{21}v_{qs}(k-1)T + TB_{22}v_{ds}(k-1)T + i_{ds}(k-1)T}{1 - TA_{22}} \quad (\text{ค-5})$$

รายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ที่นำเสนอในภาคผนวกนี้ ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากบทความตีพิมพ์ของ Naewngerndee, Sukcharoen, และ Kulworawanichpong ในปี 2006 เรื่อง Simulation of Single-Phase Induction Motor Drives with Non-sinusoidal Power Supply ในวารสาร The WSEAS Transactions on Systems เล่มที่ 5 หน้าที่ 1029 ถึง 1034

ภาคผนวก ง

วงจรขยายสัญญาณที่ใช้เป็นวงจรรองกำลังแอกทีฟ



รูปที่ ง.1 แผนภาพวงจรขยายสัญญาณที่ใช้เป็นวงจรรอกำลังแอกทิฟ



## ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และผลงานการจดสิทธิบัตร

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และผลงานการจดสิทธิบัตร

### รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ

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.

### รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1. 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, vol. 3215, 2004, pp. 687-694.

2. 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, vol. 3215, 2004, pp. 695-702.

3. 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.

### รายการจดสิทธิบัตร

1. สราวุฒิ สุจิตจร และ กองพล อารีรักษ์, “วิธีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำตัวเก็บประจุและความถี่ในการสวิตซ์ของไอจีบีที สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ควบคุมกระแสด้วยวิธีสี่สแควร์ชีส”, 25 มีนาคม 2548, เลขที่คำขอ 099011.

## ประวัติผู้เขียน

นายกองพล อารีรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 24 มกราคม พ.ศ. 2522 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดพิจิตร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2543 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2546 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้รับทุนอุดหนุนวิจัยทางด้านอนุรักษ์พลังงานจากสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ และได้รับทุนพัฒนาอาจารย์ จากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) สำหรับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระดับปริญญาโท และปริญญาเอก โดยในปี พ.ศ. 2546 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี