



## รายงานการวิจัย

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

สำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

(The Harmonic Elimination via Shunt Active Power Filter

for Single-Phase Systems)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

สำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

(The Harmonic Elimination via Shunt Active Power Filter  
for Single-Phase Systems)

หัวหน้าโครงการวิจัย

อาจารย์ ดร.ทศพร ณรงค์ฤทธิ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561  
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤศจิกายน 2562

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส การตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับคำนวณกระแสอ้างอิงในการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (วิธี SWFA) เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการคำนวณที่ให้ผลตรวจจับฮาร์มอนิกที่ถูกต้อง แม่นยำ และรวดเร็ว การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้เลือกใช้วิธีการคำนวณที่อาศัยค่าพิกัดและองค์ประกอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ทั้งนี้เพื่อให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับระบบที่พิจารณา กำจัดฮาร์มอนิก การควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อให้สามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะของกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมฮิสเทอรีซิสสำหรับควบคุมการฉีดกระแสชดเชย และใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง สำหรับการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวจะปรับใช้วิธีการดั้งเดิมที่เคยถูกนำเสนอในอดีตที่ผ่านมา การตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมรวมถึงประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้ออกแบบไว้ จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ร่วมกับการใช้ตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรูปสัญญาณของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยสามารถกลับมามีลักษณะเป็นรูปไซน์ และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (%THD) ของกระแสดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 2.90% ซึ่งอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 นอกจากนี้ ได้มีการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ไปดำเนินการสร้างเป็นระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส สำหรับการทดสอบจริงในทางปฏิบัติ โดยผลการทดสอบพบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้นและค่า %THD มีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 8.4% ในขณะที่ก่อนการชดเชยที่มีค่าสูงถึง 35.3%

## Abstract

This research presents the harmonic elimination via shunt active power filter for single-phase systems. The harmonic detection by Sliding Window with Fourier Analysis (SWFA) method is used for the reference current calculation of active power filter because this method can calculate harmonic components fast, accurately and precisely. The parameters design of active power filter is based on the system rating and components in order to allow it eliminate harmonics from the system appropriately and effectively. The control systems for active power filter are divided into two parts: current compensation control and dc bus voltage control. In this research, hysteresis controller is selected for current compensation control and PI controller is used for dc bus voltage control. The conventional design method that was published in the past is applied for finding the controller parameters. The basic testing of the controllers performance and harmonic elimination using active power filter effectiveness that has been designed is done by the simulation on Simulink/MATLAB program. The simulation results shown that the active power filter using SWFA harmonic detection cooperate with the designed controllers can inject compensating current and eliminate harmonics from the system effectively. The waveform of source current after compensation has comeback into sinusoidal waveform. The total harmonic distortion percentage (%THD<sub>i</sub>) of the source current is equal to 2.90% which is satisfied under IEEE std. 519-2014. Moreover, the harmonic elimination using shunt active power filter in single-phase system is implemented and the designed parameters are applied for practical experiment. The experimental results shown that the active power filter with the designed control system can mitigate harmonic components in the electric system effectively. The waveform of source current after compensation has become more sinusoidal. The %THD<sub>i</sub> of this current is lowered into 8.4%, whereas the %THD<sub>i</sub> before compensation is high up to 35.3%.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อาริรัักษ์ ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ที่ให้คำปรึกษาทางวิชาการและคำแนะนำแนวทางการทำงานวิจัยอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณนางสาว มณีรัตน์ ผดุงศิลป์ ผู้ช่วยวิจัย ที่ดำเนินงานด้วยความทุ่มเทและเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยนี้ทุกท่านที่ช่วยเหลือให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปด้วยความเรียบร้อย

ทศพร ณรงค์ฤทธิ์

พฤศจิกายน 2562



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูป .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.6 การจัดรูปเล่มรายงานการวิจัย.....	4
<b>2 การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฮาร์มอนิก</b>	
<b>ด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....</b>	<b>5</b>
2.1 กล่าวนำ .....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	8
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก.....	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสขดลวดของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	12
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	16
2.7 สรุป.....	17
<b>3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิก.....</b>	<b>19</b>
3.1 กล่าวนำ .....	19
3.2 นิยามของฮาร์มอนิก.....	19
3.3 ประเภทของฮาร์มอนิก.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	21
3.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิก.....	22
3.6 วิธีการกำจัดฮาร์มอนิก.....	23
3.7 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก.....	24
3.8 สรุป.....	27
<b>4 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน.....</b>	<b>28</b>
4.1 กล่าวนำ.....	28
4.2 ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA.....	28
4.3 การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA.....	31
4.4 สรุป.....	36
<b>5 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและตัวควบคุม.....</b>	<b>37</b>
5.1 กล่าวนำ.....	37
5.2 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	37
5.3 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน .....	39
5.3.1 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ $L_f$ .....	39
5.3.2 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ $C_{DC}$ .....	41
5.4 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส.....	42
5.5 การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ.....	45
5.6 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก .....	46
5.7 สรุป.....	49
<b>6 ระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน</b>	
<b>ในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส .....</b>	<b>50</b>
6.1 กล่าวนำ.....	50
6.2 การสร้างระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	
ในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	50
6.2.1 การสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และการควบคุมค่าแรงดัน	
บัสไฟตรงบนบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit .....	59

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.2 การสร้างวงจรควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส	
แบบแอนาล็อก .....	61
6.3 การทดสอบระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบ	
ขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	63
6.3.1 การทดสอบระบบกำจัดฮาร์มอนิกกรณีไม่มีการชดเชย .....	63
6.3.2 การทดสอบระบบกำจัดฮาร์มอนิกกรณีมีการชดเชย.....	65
6.4 สรุป.....	68
<b>7 บทสรุป.....</b>	<b>69</b>
รายการอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โค้ดโปรแกรมการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และการควบคุม	
แรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	76
ภาคผนวก ข. รายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	84



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส .....2
2.1	แผนภาพสรุปผลการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส .....18
3.1	การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังพาสซีฟ ..... 22
3.2	การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ..... 23
3.3	การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังไฮบริด ..... 24
3.4	แผนภาพแสดงจุด PCC ตามมาตรฐาน IEEE 519-2014 ..... 24
4.1	แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ $A_1$ และ $B_1$ .....30
4.2	แผนภาพการโปรแกรมตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA..... 31
4.3	ระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก..... 32
4.4	ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ..... 32
4.5	ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ..... 33
4.6	ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ..... 33
4.7	สเปกตรัมของ $i_s$ ก่อนการชดเชย ..... 34
4.8	สเปกตรัมของ $i_s$ หลังการชดเชยด้วยวิธี SWFA..... 34
4.9	สเปกตรัมของ $i_s$ หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ..... 34
4.10	สเปกตรัมของ $i_s$ หลังการชดเชยด้วยวิธี SRF..... 35
5.1	ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ..... 38
5.2	โครงสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน (SAPF).....38
5.3	สเปกตรัมของกระแสโหลด ( $i_L$ ) ในระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก..... 40
5.4	ผลการคำนวณค่า $\int v_{PCC} \cdot i_h dt$ ของระบบที่พิจารณา..... 41
5.5	แผนภาพบล็อกการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์รีซิส ..... 42
5.6	หลักการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์รีซิส.....43
5.7	การสร้างพัลส์ควบคุมสวิตช์วงจร SAPF ด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์รีซิส ..... 43
5.8	แผนภาพบล็อกการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ..... 45
5.9	ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ ..... 46
5.10	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน ..... 47

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส	47
5.12 สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการกำจัดฮาร์มอนิก	48
5.13 ผลการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ	48
6.1 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่พิจารณาสร้างเป็นระบบฮาร์ดแวร์	51
6.2 การควบคุมภายในบอร์ด TMS32028335 Experimental Kit	51
6.3 ระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส	51
6.4 หม้อแปลงหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ รุ่น TSB-10M	52
6.5 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ รุ่น GBPPC3510	52
6.6 ชุดโหลดหลอดไฟฟ้ากระแสตรง (โหลด $R_L$ )	53
6.7 โหลดตัวเหนี่ยวนำ $L_L$ ขนาด 0.3 H	53
6.8 ตัวเก็บประจุ $C_{DC}$ ความจุไฟฟ้า 2800 $\mu\text{F}$	54
6.9 ไอซีพีทีโมดูล รุ่น SK45GH063	54
6.10 ตัวเหนี่ยวนำ $L_f$ ขนาด 3 mH	55
6.11 ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟารุ่น HX10-P	55
6.12 ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟารุ่น LV25-P	55
6.13 บอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit	56
6.14 ไอซี DAC เบอร์ DAC712P	58
6.15 การเชื่อมต่อไอซี DAC712P กับพินของบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit	58
6.16 ไอซี Hysteresis comparator เบอร์ LM319N	59
6.17 แผนภาพการโปรแกรมชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และ ระบบควบคุมค่า $V_{DC}$ ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ	60
6.18 วงจรควบคุมกระแสชดเชยด้วยฮีสเตอร์ซิส	62
6.19 วงจรควบคุมกระแสชดเชยด้วยฮีสเตอร์ซิสแบบแอนาล็อก	62
6.20 ผลการทดสอบวงจรควบคุมกระแสชดเชยด้วยฮีสเตอร์ซิส	63
6.21 ผลการทดสอบระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีไม่มีการชดเชย	64
6.22 สเปกตรัมของกระแส $i_s$ กรณีไม่มีการชดเชย	64

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.23 ผลการทดสอบความถูกต้องของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA บนบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit .....	65
6.24 ผลการทดสอบระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีมีการชดเชย.....	66
6.25 สเปกตรัมของกระแส $i_s$ กรณีมีการชดเชย.....	67
6.26 ผลการทดสอบค่า $V_{DC}$ ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	67



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....5
2.2	การเปรียบเทียบคุณสมบัติโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน .....8
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน .....9
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ..... 10
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสขดลวดของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ..... 13
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....16
3.1	ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบพิกัดแรงดันต่าง ๆ.....25
3.2	ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบที่มีพิกัดแรงดัน 120 V ถึง 69 kV ..... 25
3.3	ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกของระบบที่มีพิกัดแรงดันมากกว่า 69 kV ถึง 161 kV ...25
3.4	ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบที่มีพิกัดแรงดันมากกว่า 161 kV..... 26
4.1	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสที่แหล่งจ่าย (%THD <sub>i</sub> ) ..... 35
5.1	โหมดการทำงานของสวิตช์ไอจีบีทีในวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน .....39
5.2	สรุปผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับระบบก้าจัดฮาร์มอนิกที่พิจารณา .....46
6.1	รายละเอียดแต่ละพินของบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit .....57
6.2	ขั้นตอนการสั่งการควบคุมสำหรับไอซี DAC712P .....59

# บทที่ 1

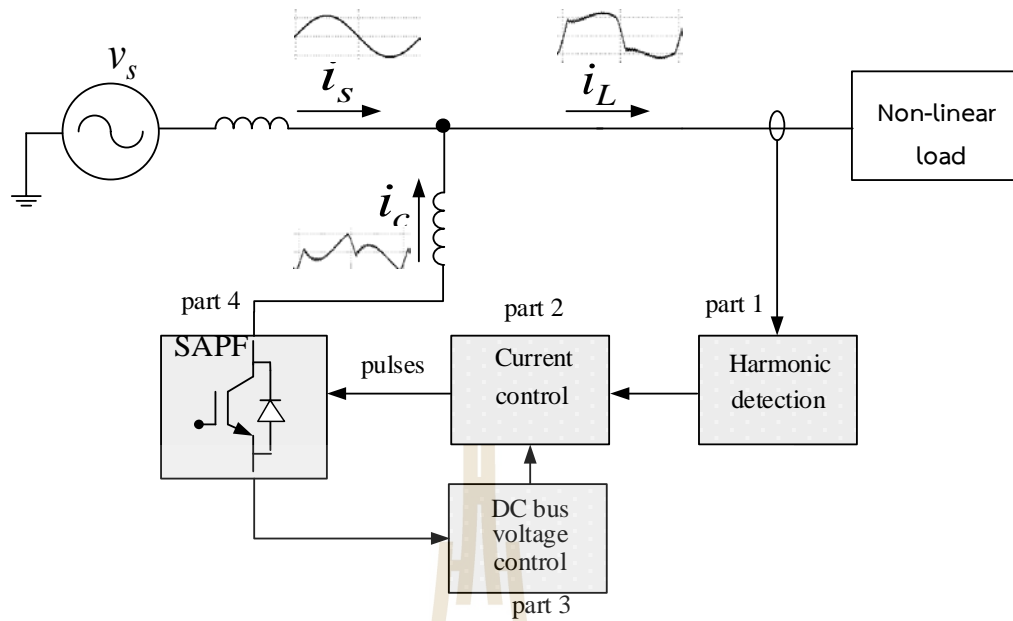
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม สถานประกอบการ สำนักงาน และรวมถึงบ้านพักอาศัยต่าง ๆ ได้ต่อใช้งานโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear load) เป็นจำนวนมาก เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ วงจรคอนเวอร์เตอร์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบอาร์ค หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น การใช้งานโหลดดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งฮาร์มอนิกเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อทำให้คุณภาพทางไฟฟ้าของระบบลดลง เนื่องจากเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาและผลเสียต่าง ๆ เช่น ก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่สายส่ง ทำให้อุปกรณ์ประเภทมอเตอร์วัด อุปกรณ์ป้องกัน และรีเลย์มีการทำงานผิดพลาด และยังทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่สั้นลง เป็นต้น [1-4] จากผลเสียดังกล่าวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการกำจัดฮาร์มอนิกให้หมดหรือลดน้อยลง เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากลับมามีคุณภาพทางมากยิ่งขึ้น วิธีการกำจัดฮาร์มอนิกที่นิยมใช้ในปัจจุบัน พบว่า มีอยู่ 3 วิธีด้วยกัน คือ การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive power filter) [5] การใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟ (Active power filter) [6] และ การใช้วงจรกรองกำลังไฮบริด (Hybrid power filter) [7] อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นที่การศึกษาค้นคว้าการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) ทั้งนี้เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่สามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ดี มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า และไม่ต้องเสี่ยงกับปัญหาจากสถานะเรโซแนนซ์ การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.1

จากรูปที่ 1.1 สอนประกอบของระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานหนึ่งเฟสสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนที่สำคัญ ดังนี้

*ส่วนที่ 1* การตรวจจับฮาร์มอนิก (Harmonic detection) ทำหน้าที่คำนวณหากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ซึ่งกระแสดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เป็นค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอคทีฟ ดังนั้น ในส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิกนี้ จึงถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญอย่างยิ่ง และจำเป็นจะต้องเลือกใช้วิธีที่ให้ผลลัพธ์การคำนวณกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด



รูปที่ 1.1 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

ส่วนที่ 2 การควบคุมกระแสชดเชย (Current control) ทำหน้าที่ควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยในส่วนนี้จำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมที่มีสมรรถนะการควบคุมที่ดี และมีการออกแบบให้เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา ทั้งนี้เพื่อให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงที่ได้จากส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิกให้ได้มากที่สุด

ส่วนที่ 3 การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (DC bus voltage control) ทำหน้าที่ควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้มีค่าคงที่ตามค่าอ้างอิงที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อส่งเสริมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี

ส่วนที่ 4 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน หรือวงจร SAPF ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ลดผลกระทบจากปัญหาฮาร์มอนิก และเพิ่มคุณภาพทางไฟฟ้าให้สูงขึ้น ซึ่งวงจรนี้จำเป็นต้องมีการออกแบบพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับระบบที่พิจารณาด้วยเช่นกัน

จากการอธิบายในข้างต้น จะเห็นได้ว่า สมรรถนะในส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิก สมรรถนะตัวควบคุมกระแสชดเชยและตัวควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ รวมถึงการออกแบบวงจร ถือเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ความรู้ด้านการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

1.2.2 เพื่อศึกษาการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (วิธี SWFA) สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส

1.2.3 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส

1.2.4 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมการกระแสดัดเซด้วยวิธีฮิสเทอรีซิสสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส

1.2.5 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ด้วยตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส

1.2.6 เพื่อจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟสด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB

1.2.7 เพื่อสร้างฮาร์ดแวร์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

1.3.2 แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายพิจารณาในกรณีรูปสัญญาณแรงดันไม่มีฮาร์มอนิก

1.3.3 การวัดผลการกำจัดฮาร์มอนิกจะใช้ค่า %THD เป็นตัวชี้วัด โดยค่า %THD ภายหลังการชดเชยจะต้องมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีก่อนการชดเชย

1.3.4 โหลดของระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก คือ โหลดวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่นที่มีโหลดตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้องค์ความรู้ด้านการกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.4.2 ได้โปรแกรมสำหรับจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟชนิดหนึ่งเฟสที่สร้างโดยใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB

1.4.3 ได้บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (วิธี SWFA) สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟชนิดหนึ่งเฟส

1.4.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส

1.4.5 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส

1.4.6 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส

1.4.7 ได้ระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

1.4.8 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.4.9 สามารถนำผลงานวิจัยไปต่อยอดเพื่อสร้างเทคโนโลยีสำหรับการใช้งานจริงในอนาคต

## 1.5 การจัดรูปเล่มรายงานการวิจัย

รายงานวิจัยเล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาจำนวน 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอสาระต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟ

บทที่ 3 อธิบายความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

บทที่ 4 นำเสนอวิธีการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อนสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส รวมถึงนำเสนอผลการตรวจจับฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ

บทที่ 5 นำเสนอโครงสร้างของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ หลักการควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีฮิสเทอรีซิส การควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ การออกแบบตัวควบคุม และการจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB

บทที่ 6 นำเสนอการสร้างและทดสอบระบบฮาร์ดแวร์ต้นแบบของการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

บทที่ 7 คือ บทสรุป โดยจะกล่าวสรุปภาพรวมในแต่ส่วนของงานวิจัยนี้



## บทที่ 2

### การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟ

#### 2.1 กล่าวนำ

จากอดีตจนถึงปัจจุบัน องค์ความรู้เกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสถูกคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงถือเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญในการทำงานวิจัย ซึ่งจะช่วยให้ผู้วิจัยทราบถึงแนวคิดพื้นฐานหลักการการกำจัดฮาร์มอนิก และสามารถเลือกใช้วิธีการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องอย่างเหมาะสม รวมถึงสามารถพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ต่าง ๆ ที่มีอยู่เดิมได้ ในบทนี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยและเทคนิคการสวิตช์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง โดยผลการสำรวจงานวิจัยดังกล่าวจะนำเสนอโดยการอธิบายรายละเอียด ปีที่ตีพิมพ์ คณะผู้วิจัย และเนื้อหาสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยแบบพอสังเขป

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างวงจรรอกำลังแอกทีฟ

วงจรรอกำลังแอกทีฟมีโครงสร้างหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละโครงสร้างมีคุณสมบัติของวงจรลักษณะการใช้งาน และวิธีการควบคุมการทำงานที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีเรื่องของราคาต้นทุนในการสร้างที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาและเลือกใช้งานให้เหมาะสม โดยผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟสามารถดูได้จากตารางที่ 2.1

#### ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1995 [8]	D. A. Torrey and A. M. A. M. Al-Zamel	นำเสนอโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบเต็มบริดจ์ (Voltage source full-bridge

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		inverter) สำหรับกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยทางด้านฝั่งกระแสสลับของวงจรได้เชื่อมต่อกับตัวเหนี่ยวนำวงจรรอก และทางด้านกระแสตรงจะเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งสะสมพลังงานที่เป็นตัวเก็บประจุ
1999 [9]	B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra	นำเสนอโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ การควบคุมการออกแบบ การใช้งานในทางปฏิบัติ และความคุ้มค่าในการลงทุน สำหรับใช้ในการกำจัดฮาร์มอนิกและชดเชยกำลังรีแอกทีฟ โดยสรุปได้ว่า วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเหมาะสมต่อการใช้กำจัดกระแสฮาร์มอนิกร่วมกับการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ ส่วนวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมเหมาะกับการใช้กำจัดแรงดันฮาร์มอนิก และรักษาความสมดุลและระดับของแรงดัน และวงจรรอกกำลังไฮบริดเหมาะกับการใช้กำจัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก ร่วมกับการชดเชยกำลังรีแอกทีฟและรักษาระดับแรงดันของแหล่งจ่าย
1999 [10]	L Benchaïta, S. Saadate, and A S. Nia	นำเสนอเปรียบเทียบโครงสร้างและคุณสมบัติของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันและชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current source inverter) ซึ่งผลการเปรียบเทียบ พบว่า วงจรทั้งสองโครงสร้างสามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีทั้งคู่ แต่วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นแหล่งสะสมพลังงานจะมีราคาต้นทุนต่ำกว่ากรณีวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ
2000 [11]	W.-L. Lu, S.-N. Yeh, J.-C. Hwang and H.-P.Hsieh	นำเสนอใช้งานวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบครึ่งบริดจ์แยกตัวเก็บประจุ (Voltage source half-bridge inverter) โดยระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกเป็นระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2000 [12]	M. El-Habrouk, M. K. Darwish and P. Mehta	นำเสนอเกี่ยวกับโครงสร้างและการใช้งานวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันและแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งพบว่า วงจรรองกำลังแอกทีฟที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสโดยส่วนใหญ่จะถูกใช้งานในงานในระบบไฟฟ้าสามเฟส และมีความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานมากกว่าวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน
2004 [13]	B.-R. Lin and T.-Y. Yang	นำเสนอวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบครึ่งบริดจ์สำหรับการทำงานร่วมกับ พีดีบีแอลเอ็ม 3 ระดับ (Three-level operation) ซึ่งถูกปรับปรุงเพื่อลดจำนวนไดโอดลงจากโครงสร้างแบบเดิม ทำให้ง่ายต่อการสร้างจริงและมีความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวทรัล
2014 [14]	W. R. N. Santos, E. R. C. Silva and et al.,	นำเสนอวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบยูนิเวอร์แซลที่มีโครงสร้างตัวเก็บประจุแยก เป็นวงจรที่รวมวงจรรองแอกทีฟแบบอนุกรมและแบบขนานเข้าด้วยกัน สามารถชดเชยได้ทั้งแรงดันฮาร์มอนิกกระแสฮาร์มอนิก และกำลังรีแอกทีฟ
2016 [15]	Y. Hu, Y. Xie, D.Fu, and L. Cheng	นำเสนอวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบ 5 ระดับ (แบบมัลติเลเวล (Multilevel)) โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์ใช้ตัวเก็บประจุแยก และมีการออกแบบการควบคุมระดับแรงดันของตัวเก็บประจุทั้งสองตัวให้เท่ากัน

จากผลการสำรวจงานวิจัยในตารางที่ 2.1 พบว่า วงจรรองกำลังแอกทีฟที่เหมาะสมต่อการชดเชยหรือกำจัดกระแสฮาร์มอนิก คือ วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดหลัก ๆ คือ วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน และวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส โดยทั้งสองวงจรสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกได้ดีใกล้เคียงกัน แต่วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันจะใช้ตัวเก็บประจุเป็นแหล่งสะสมพลังงานจึงมีราคาสูงกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเป็น

แหล่งสะสมพลังงาน โครงสร้างของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันยังสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 3 รูปแบบโครงสร้าง คือ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ และวงจรอินเวอร์เตอร์แบบมัลติเลเวล อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้จะเลือกโครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ที่มีจำนวนสวิตช์ 4 ตัว เนื่องจากโครงสร้างวงจรดังกล่าวสามารถช่วยลดความเครียดของแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ได้ดีกว่าโครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ที่ใช้จำนวนสวิตช์เพียง 2 ตัว อีกทั้งการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียว (วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์) ยังทำได้ง่ายกว่าการควบคุมค่าแรงดันสองค่าของโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก (วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์และมัลติเลเวล) สามารถดูสรุปการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสามรูปแบบโครงสร้างดังกล่าวได้จากตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** การเปรียบเทียบคุณสมบัติโครงสร้างของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

คุณสมบัติ	โครงสร้างของวงจร		
	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบมัลติเลเวล
1. จำนวนตัวเก็บประจุ	2	1	2
2. จำนวนสวิตช์	2	4	มากกว่าหรือเท่ากับ 4
3. จุดเด่น	จำนวนอุปกรณ์สวิตช์น้อย	ความเครียดของแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ต่ำ	- ความเครียดของแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ต่ำ - ให้ประสิทธิภาพการฉีดกระแสชดเชยที่ดีกว่า
4. จุดด้อย	ต้องการตัวควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสองตัว	ต้องการตัวเก็บประจุที่มีขนาดพิกัดสูง	- จำนวนอุปกรณ์สวิตช์มาก - ต้องการตัวควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสองตัว

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรองกำลังแอกทีฟ

วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีโครงสร้างประกอบด้วยตัวเก็บประจุสะสมพลังงานฝั่งกระแสดตรง และตัวเหนี่ยวนำวงจรรองฝั่งกระแสลับ ซึ่งจำเป็นต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมกับระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก เพื่อให้วงจรรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการ

ออกแบบค่าพารามิเตอร์ทั้งสองได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งวิธีการคำนวณแบบดั้งเดิมของ D. M. E. Ingram and S. D. Round และ T. Thomas and et al. จะถูกนำไปปรับใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง และตัวเก็บประจุสำหรับสะสมพลังงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในงานวิจัยนี้ต่อไป

**ตารางที่ 2.3** งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1996 [16]	C.Y. Hsu and H. Y. Wu	นำเสนอการออกแบบขนาดตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสโดยใช้หลักการพลังงานสมดุล (Energy Balance)
1997 [17]	D. M. E. Ingram and S. D. Round	นำเสนอการออกแบบขนาดของตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยค่าตัวเหนี่ยวนำที่ได้จะเป็นขอบเขตค่าสูงสุด ซึ่งจะต้องเลือกค่าน้อยกว่าค่าดังกล่าวอีกครั้งหนึ่ง
1998 [18]	T. Thomas, K. Haddad, G. Joos, and A. Jaafari	นำเสนอวิธีการออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน โดยให้ผลลัพธ์ของการออกแบบเป็นขอบเขตต่ำสุดของค่าความจุไฟฟ้า และจะต้องเลือกค่าที่มากกว่าค่าดังกล่าวอีกครั้งหนึ่ง
2011 [19]	T. Narongrit, K-L. Areerak, and K-N. Areerak	นำเสนอวิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและค่าแถบฮีสเตอร์ซิสสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้วิธีการค้นหาแบบ PSO (Particle Swarm Optimization)

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงในการชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานมีหลายวิธีให้เลือกใช้งาน ซึ่งแต่ละวิธีมีหลักการคำนวณ ความซับซ้อน และการใช้อินพุตในการคำนวณที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ

วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกต่าง ๆ สำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งสามารถดูได้ในตารางที่ 2.4 ต่อไปนี้

**ตารางที่ 2.4** งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1999 [20]	J. Liu, J. Yang, and Z. Wang	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง หรือวิธี PQ สำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งเดิมเป็นวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าสามเฟสแต่ได้ปรับปรุงสมมุติเฟสของแรงดันและกระแสเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสตามขั้นตอนวิธีที่ใช้กับระบบไฟฟ้าสามเฟส
2001 [21]	M. El-Habrouk and M. K. Darwish	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน หรือวิธี SWFA ที่ถูกพัฒนาให้มีความรวดเร็วในการคำนวณมากกว่าวิธีการคำนวณฟูรีเยร์แบบเร็ว (FFT) และให้ผลการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกต้องแม่นยำ
2002 [22]	M. Rukonuzzaman and M. Nakaoka	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network: NN) แบบปรับตัวได้ โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แทนการใช้การฝึก ทำให้สามารถระบุกระแสฮาร์มอนิกตามเวลาจริงได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ โดยสามารถให้ผลลัพธ์การคำนวณภายในหนึ่งคาบเวลาของสัญญาณมูลฐาน
2002 [23]	S. Mariethoz, and A. C. Rufer	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีฟูรีเยร์แบบเร็ว (FFT) ในการทำงานแบบวงเปิดและวงปิด ซึ่งพบว่า การทำงานแบบวงปิดให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการทำงานแบบวงเปิด
2003 [24]	M. Saitou, N. Matsui and T. Shimizu	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสด้วยวิธีการอั้งอิงซิงโครนัส หรือวิธี DQ ด้วยการประยุกต์ใช้การแปลงฮิลเบิร์ต ซึ่งเดิมเป็นวิธีที่ถูกใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสเท่านั้น โดยวิธีดังกล่าวสามารถคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะคงตัวได้ดี

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004 [25]	M. Gonzalez, V. Cardenas, and F. Pazos	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ ในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส การคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกจะมีการสมมุติเฟสของกระแสเพิ่มเติม และมีขั้นตอนการคำนวณเช่นเดียวกันกับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส วิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้อัลกอริทึมที่ซับซ้อนในการสร้างจริง นอกจากนี้วิธีดังกล่าวยังสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกและกำลังรีแอกทีฟได้
2005 [26]	B-M Han, B-Y Bae, and S. J. Ovaska	นำเสนอการปรับปรุงการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยตัวกรองทำนายแบบปรับตัวได้ โดยใช้อัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด (Least Mean Square: LMS) สร้างตัวกรองที่สามารถปรับตัวและคาดคะเนกระแสมูลฐานเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง
2006 [27]	L. P. Kunjumammed, and M. K. Mishra	นำเสนอเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ได้แก่ วิธีการคูณฟังก์ชันไซน์ วิธี DQ วิธี PQ วิธีแปลงฟูริเยร์ ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า วิธีการแปลงฟูริเยร์เป็นวิธีที่ให้ผลการตรวจจับถูกต้องแม่นยำที่สุด โดยใช้เวลาการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวที่รวดเร็วและให้ผลการทำงานที่ดีแม้แหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปไซน์
2008 [28]	M. Cirrincione, M. Pucci, and G. Vitale	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกผ่านวิธีโครงข่ายประสาทเทียม หรือวิธี NN แบบปรับตัวที่มีพื้นฐานจาก ADALINE โดยใช้วงจรกรองนอตช์ (Notch Filter) ร่วมกับวิธีโครงข่ายประสาทสำหรับการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก นอกจากนี้ยังนำเสนอการใช้อัลกอริทึมกำลังสองต่ำสุด (Least Square: LS) เพื่อปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักของตัวประสาทแบบออนไลน์แทนการฝึกสอน (training) ในโครงข่ายประสาทแบบทั่วไป
2009 [29]	M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale and A. Miraoui	นำเสนอเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี NN แบบปรับตัวได้ กับวิธี PQ ซึ่งพบว่า ทั้งสองวิธีการให้ประสิทธิภาพการตรวจจับที่ดีใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การตรวจจับ ฮาร์มอนิกด้วยวิธี NN แบบปรับตัว จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธี PQ

**ตารางที่ 2.4** งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009 [30]	V. Khadkikar, A. Chandra and B. N. Singh	นำเสนอพัฒนาการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ในรูปแบบทั่วไป (General PQ) โดยมีการจำลองผลการทำงานบนโปรแกรม Simulink และประมวลผลผ่านบอร์ด DSP เพื่อเปรียบเทียบกับวิธี PQ แบบดั้งเดิม (conventional PQ) ซึ่งจากการทดสอบ พบว่า วิธี General PQ ที่นำเสนอให้ผลการตรวจจับที่ดีกว่าวิธี conventional PQ
2014 [31]	S. Tiyyarachakun, K-L. Areerak and K-N. Areerak	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ร่วมกับการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (SWFA) ซึ่งให้ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าการใช้วิธี PQ แบบดั้งเดิม เนื่องจากการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อนจะสามารถตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิกได้ถูกต้องแม่นยำกว่าการใช้วงจรกรองภายในวิธี PQ แบบดั้งเดิม
2014 [32]	B. A. Angélico, L. B. G. Campanhol, and S. A. Oliveira da Silva	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ ร่วมกับการใช้เทคนิค Phase Lock Loop (PLL) สำหรับคำนวณหา มุมเฟสของแรงดันกริดในระบบที่พิจารณา เพื่อนำไปใช้คำนวณการหมุนด้วยมุมของแรงดันดังกล่าว

จากผลการสำรวจงานวิจัยในตารางที่ 2.4 พบว่า มีหลายวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่นิยมใช้ เช่น วิธี PQ วิธี DQ วิธี FFT วิธี SWFA และวิธี NN ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยจะเลือกใช้วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (วิธี SWFA) เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถให้ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ถูกต้องแม่นยำ และมีความรวดเร็วในการประมวลผล ซึ่งจะเหมาะสำหรับการสร้างทดสอบจริงในทางปฏิบัติ

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

ผลการสำรวจงานวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ สามารถแสดงดังตารางที่ 2.5 ดังนี้



ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1995 [33]	N. R. Zargari and G. Joos	นำเสนอการควบคุมกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) โดยมีการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการทำงานภายใต้กรอบอ้างอิงคงที่และกรอบอ้างอิงซิงโครนัส ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า การควบคุมกระแสภายใต้กรอบอ้างอิงซิงโครนัสให้ค่าความผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัวที่ดีกว่า
1995 [8]	D. A. Torrey, and A. M. A. M. Al-Zamel	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการควบคุมแบบโหมดเลื่อน (Sliding Mode Control) ในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งมีจุดเด่นที่ความเรียบง่ายในการออกแบบและสามารถสร้างทดสอบจริงในทางปฏิบัติ
2000 [34]	M. Sedighy, S. B. Dewan, and F. P. Dawson	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีการควบคุมแบบดิจิตอล ซึ่งมีการคำนวณผลการประวิงเวลาร่วมด้วย ทำให้การตอบสนองของเอาต์พุตต่อสัญญาณกระแสอ้างอิงมีประสิทธิภาพที่ดี
2004 [35]	K. Nishida, M. Rukonuzzman and M. Nakaoka	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสด้วยวิธีเดทบีท (Deadbeat Control) โดยใช้ Adaptive Line Enhancer (ALE) ช่วยในการทำนายความผิดพลาดของการควบคุมกระแสชดเชย ทำให้การควบคุมมีความยืดหยุ่นมากขึ้น
2004 [36]	R. Costa-Castelló, R. Griñó, and E. Fossas	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยแบบดิจิตอลด้วยวิธีการควบคุมแบบซ้ำ (Repetitive Control) ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะตามกระแสอ้างอิง และสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกอันดับสูงได้ดี
2008 [37]	J. Matas, L. G. de Vicuña, J. Miret, and et al.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยวิธีการควบคุมแบบโหมดเลื่อนในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยมีความยืดหยุ่นและไม่อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ในระบบ

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2008 [38]	P.A. Dahano	นำเสนอการควบคุมกระแสด้วยวิธีฮิสเทอรีซิส (Hysteresis control) แบบดั้งเดิม และแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้น โดยมีการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมทั้งสอง ซึ่งพบว่า ทั้งสองวิธีให้ผลตอบสนองการควบคุมในสภาวะพลวัตได้ดี แต่วิธีฮิสเทอรีซิสแบบใหม่ใช้ความถี่สวิตช์น้อยกว่าแบบดั้งเดิม
2009 [29]	M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale and A. Miraoui	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมมัลติเรโซแนนซ์ (Multi Resonance) ซึ่งประกอบด้วย ตัวควบคุมที่ค่าความถี่เรโซแนนซ์ต่าง ๆ โดยอาศัยการออกแบบด้วยวิธีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์แบบออฟไลน์ก่อนการใช้งาน ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2014 [32]	B. A. Angélico, L. B. G. Campanhol, and S. A. Oliveira da Silva	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมพีไอและพีไอดี (PID controller) ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM ซึ่งตัวควบคุมทั้งสอง สามารถให้ประสิทธิภาพในการควบคุมที่ใกล้เคียงกัน แต่ตัวควบคุมพีไอดีให้ผลค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (%THD) ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยต่ำกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอ
2014 [39]	S. K. Khadem, M. Basu, and M. F. Conlon	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยวิธีฮิสเทอรีซิส และนำเสนอวิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน
2014 [40]	A. Martins, S. Vale, V. Sobrado, and A. Carvalho	นำเสนอเปรียบเทียบวิธีการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟ 3 วิธี คือ วิธีการควบคุมแบบเชิงเส้น วิธีการควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส และวิธีการควบคุมแบบกรอบอ้างอิงซิงโครนัส ซึ่งจากผลการ

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ทดสอบ พบว่า การควบคุมกระแสแบบเชิงเส้นและแบบฮิสเตอร์ซิสสามารถให้ประสิทธิภาพการควบคุมที่ดีใกล้เคียงกัน และวิธีฮิสเตอร์ซิสให้ผลการตอบสนองทางพลวัตที่ดีกว่า
2015 [41]	S. Kwak, S-E Kim, and J-C Park	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีการทำนาย (Predictive control) ที่พัฒนาขึ้นใหม่ ทำให้สามารถลดความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวของกระแส และลดการกระเพื่อมของสัญญาณลงได้
2018 [42]	M. H. Alaei, S. A. Taher and Z. D. Arani	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟสด้วยวิธีการควบคุมแบบทำนาย หรือแบบ Predictive control โดยได้มีการสร้างระบบฮาร์ดแวร์เพื่อทดสอบในทางปฏิบัติ ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟได้ดี ทำให้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้

จากผลการสำรวจงานวิจัยในตารางที่ 2.5 พบว่า วิธีการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานมีหลายวิธี เช่น วิธีการควบคุมด้วยตัวควบคุมเชิงเส้นกลุ่ม พีไอ พีเอดี ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM วิธีการควบคุมแบบโหมดเลื่อน วิธีการควบคุมแบบฮิสเตอร์ซิส วิธีการควบคุมแบบเดทพิทหรือวิธีการทำนาย วิธีการควบคุมแบบทำซ้ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม หากคำนึงถึงการสร้างจริงในทางปฏิบัติ วิธีที่การที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อนแต่ยังคงให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดี คือวิธีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิค PWM และวิธีการควบคุมแบบฮิสเตอร์ซิส โดยวิธีฮิสเตอร์ซิสจะมีความไวต่อการตอบสนองในทางพลวัตที่ดีกว่า และสามารถควบคุมกระแสชดเชยได้โดยไม่ต้องใช้เทคนิคการสวิตช์ PWM เข้ามาเกี่ยวข้อง จึงเหมาะสำหรับการนำไปสร้างเป็นฮาร์ดแวร์ในทางปฏิบัติ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีฮิสเตอร์ซิส สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ( $V_{DC}$ ) ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1996 [43]	J.-C. Wu and H.-L. Jou	นำเสนอใช้ตัวควบคุมพีไอ สำหรับควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน และนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดังกล่าว ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้สามารถคงค่าแรงดันบัลไฟตรงไว้ที่ค่าอ้างอิงได้ ทำให้การฉีดกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2002 [22]	M.Rukonuzzaman and M. Nakaoka	นำเสนอใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งผลการทำงานของตัวควบคุมพีไอดังกล่าวพบว่า สามารถควบคุมค่าแรงดันได้ดี นอกจากนี้ ยังสามารถใช้งานร่วมกับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีอีเอสเตอร์ซีเอส โดยผลการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมทั้งสอง ส่งผลให้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้ดี
2010 [44]	L. Colak, and R. Bayindir	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) โดยตัวควบคุมดังกล่าวให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ และสามารถควบคุมได้ดีกว่าตัวควบคุมพีไอในระบบที่ซับซ้อน
2014 [32]	B. A. Angélico, L. B. G. Campanhol, and S. A. Oliveira da Silva	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งจากผลจำลองสถานการณ์ พบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถรักษาระดับแรงดันบัลไฟตรงให้มีค่าตามที่ตามค่าอ้างอิงได้ ถึงแม้ระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงโหลด

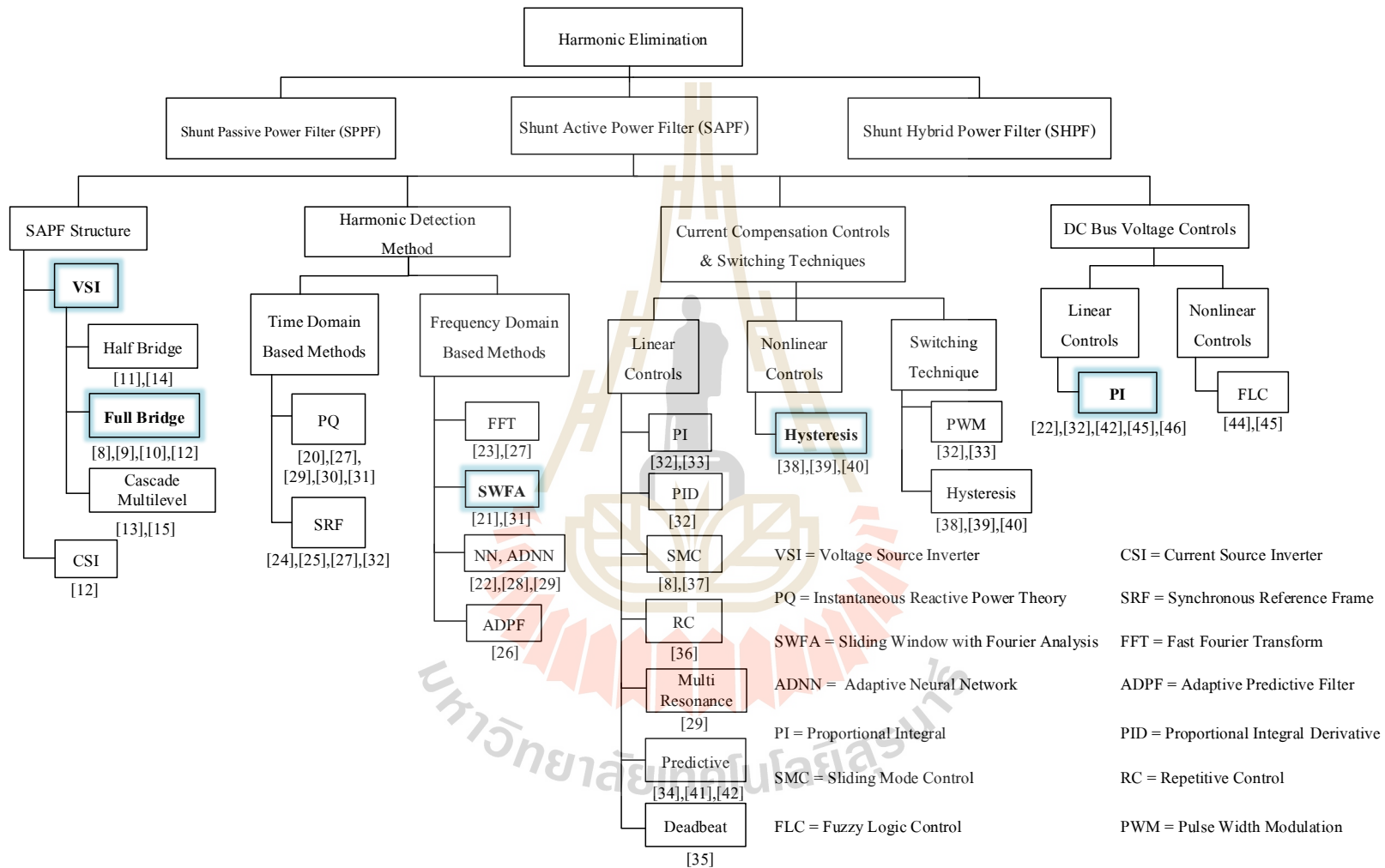
**ตารางที่ 2.6** งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2016 [45]	A. M. Zainuri, M. Radzil, and et al.	นำเสนอเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมพีซีลอจิก และตัวควบคุมพีไอ ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุมพีซีลอจิกให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ แต่อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมพีซีลอจิกมีความซับซ้อนและยุ่งยากในการออกแบบมากกว่าตัวควบคุมพีไอ
2018 [46]	H. Afghoul, F. Krim, A. Beddar, and B. Babes	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุม FO-PI (fractional order integral plus proportional controller) โดยผลการทดสอบระบบฮาร์ดแวร์ในทางปฏิบัติ พบว่า ตัวควบคุมดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงได้แม้โหลดของระบบที่พิจารณาจะมีการเปลี่ยนแปลง

จากการสำรวจผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟในตารางที่ 2.6 พบว่า โดยส่วนใหญ่จะใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน ทั้งนี้เนื่องจากสามารถออกแบบได้ง่าย และให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีเพียงพอ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟต่อไป

## 2.7 สรุป

การศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสช่วยให้ผู้วิจัยทราบถึงองค์ประกอบและวิธีการต่าง ๆ ที่ถูกคิดค้นและพัฒนาจากอดีตจนถึงปัจจุบัน และช่วยให้ผู้วิจัยสามารถเลือกใช้งานวิธีการควบคุมวงจรรอกกำลังแอกทีฟในการกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้การศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมดังกล่าวยังถือเป็นพื้นฐานที่สำคัญที่ช่วยให้ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงแนวทางการต่อยอดและพัฒนาองค์ความรู้ที่มีอยู่เดิมด้วย สำหรับภาพรวมของการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยทั้งหมดที่ผู้วิจัยได้ศึกษาในบทนี้สามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.1 โดยบล็อกส่วนที่แสดงเป็นอักษรตัวหนาเข้มในแต่ละส่วน คือวิธีการที่ได้เลือกใช้สำหรับงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.1 แผนภาพสรุปผลการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

## บทที่ 3

### ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

#### 3.1 กล่าวนำ

การกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานของฮาร์มอนิกเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ถึงปัญหา และเลือกใช้วิธีการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม ในบทนี้จึงนำเสนอความรู้พื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิก ซึ่งประกอบด้วย นิยามของฮาร์มอนิก ประเภทของฮาร์มอนิก แหล่งกำเนิดของฮาร์มอนิก ผลกระทบของฮาร์มอนิก วิธีการกำจัดฮาร์มอนิก และมาตรฐานเกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้ในแต่ละหัวข้อต่อไป

#### 3.2 นิยามของฮาร์มอนิก

นิยามของฮาร์มอนิก (Harmonics) คือ องค์ประกอบของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier equation) ดังสมการที่ 3.1 โดยที่  $f(t)$  คือ ฟังก์ชันของรูปสัญญาณแรงดันหรือกระแสไฟฟ้า และ  $h$  คือ อันดับฮาร์มอนิก

$$f(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_n \cos(h\omega t) + \sum_{h=1}^{\infty} b_n \sin(h\omega t) \quad (3.1)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์  $a_0$   $a_h$  และ  $b_h$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2) ถึง (3.4)

$$a_0 = \frac{1}{T} \int f(t) dt \quad (3.2)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int f(t) \cos(h\omega t) dt \quad (3.3)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int f(t) \sin(h\omega t) dt \quad (3.4)$$

โดยที่  $T$  คือ คาบของสัญญาณ (s)

$\omega$  คือ ความถี่มูลฐานเชิงมุม (rad/s)

เนื่องจากแรงดันหรือกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ( $h > 1$ ) จะมีค่าความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน ( $h = 1$ ) ดังนั้น ในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีความถี่มูลฐาน 50 Hz จะมีแรงดันหรือกระแสที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 5 และ 7 เท่ากับ 150 Hz 250 Hz และ 350 Hz ตามลำดับ

การวัดปริมาณฮาร์มอนิกจะระบุด้วยค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion: THD) ซึ่งคือ อัตราส่วนระหว่างรากที่สองขององค์ประกอบฮาร์มอนิกกำลังสอง (แรงดันหรือกระแสฮาร์มอนิก) ต่อองค์ประกอบมูลฐาน โดยจะพิจารณาองค์ประกอบฮาร์มอนิกถึงอันดับที่ 50 สำหรับองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่มีอันดับมากกว่า 50 โดยปกติจะไม่ถูกใช้ในการคำนวณค่า THD และจะถูกนิยามเป็นสัญญาณรบกวนแทน

มาตรฐานสากล IEEE และ IEC พิจารณาปริมาณของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (%THD) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า %THD ของแรงดัน ฮาร์มอนิก และค่า %THD ของกระแสฮาร์มอนิกได้จากสมการที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ [47]

$$\% \text{THD}_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (3.5)$$

$$\% \text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (3.6)$$

โดยที่  $V_h$  คือ ค่า RMS ของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่  $h$

$V_1$  คือ ค่า RMS ของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน

$I_h$  คือ ค่า RMS ของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่  $h$

$I_1$  คือ ค่า RMS ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

### 3.3 ประเภทของฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกสามารถแยกออกเป็นประเภทย่อย ๆ ตามลักษณะกลุ่มอันดับฮาร์มอนิกได้ดังนี้

ประเภทที่ 1 Harmonic (อันดับเป็นจำนวนเต็ม) คือ องค์ประกอบของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน พบในโหลดที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้นทั่วไป (สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 3.4)

ประเภทที่ 2 Interharmonic คือ องค์ประกอบของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าแบบไม่ลงตัวของความถี่มูลฐาน (อันดับฮาร์มอนิกไม่ใช่จำนวนเต็ม) พบมากใน



กระแสไฟฟ้าของโหลเตาหลอมแบบอาร์ก (arc furnace)

ประเภทที่ 3 Characteristic Harmonic คือ ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างขึ้นจากโหลดวงจรแปลงผันไฟฟ้า ซึ่งมีอันดับฮาร์มอนิก ( $h$ ) เป็นไปตามสมการที่ (3.7)

$$h = kp \pm 1 \quad (3.7)$$

โดยที่  $k$  คือ จำนวนเต็มที่มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...

$p$  คือ จำนวนพัลส์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้า

ประเภทที่ 4 Non-characteristic Harmonic คือ ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างขึ้นจากโหลดวงจรแปลงผันไฟฟ้าเช่นเดียวกับ Characteristic Harmonic แต่ Non-characteristic Harmonic มีอันดับฮาร์มอนิกไม่เป็นไปตามสมการที่ (3.7)

ประเภทที่ 5 Triplen Harmonic คือ กลุ่มฮาร์มอนิกที่อันดับถูกหารด้วย 3 ลงตัว เช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 6 9 และ 12 เป็นต้น ซึ่งอยู่ในกลุ่มของลำดับศูนย์ (zero sequence) และจะไหลอยู่ในสายนิวทรัล

### 3.4 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากการต่อใช้งานโหลที่มีคุณสมบัติการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear load) (โหลที่ทำให้แรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามักมีลักษณะไม่เป็นรูปไซน์) ตัวอย่างโหลดังกล่าว เช่น

- โหลอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น
- โหลอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแส วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีการปรับความเร็ว
- โหลอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบอาร์ก เช่น เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ก เตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ก และรวมถึงโหลดปล่อยประจุในก๊าซชนิดต่าง ๆ
- โหลอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น
- อุปกรณ์ตัวชดเชยกำลังรีแอกทีฟในระบบไฟฟ้า สำหรับการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าผ่านตัวเก็บประจุ เป็นต้น

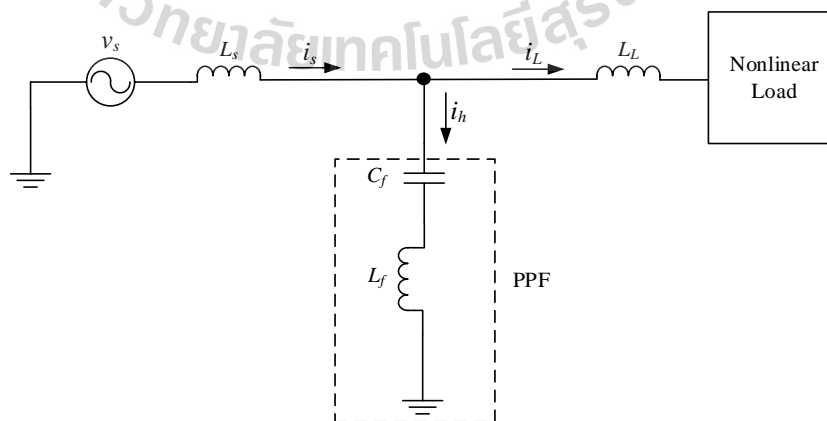
### 3.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิก

โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อถูกเชื่อมต่อใช้งานเข้ากับระบบไฟฟ้าจะส่งผลให้รูปสัญญาณของแรงดันหรือกระแสที่แหล่งจ่ายมีลักษณะบิดเบี้ยวหรือผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ และก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งมีผลกระทบหลายประการตามมา เช่น

- ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในวงจรสื่อสารและอุปกรณ์ประเภทอื่น ๆ ในระบบไฟฟ้า [2]
- ก่อให้เกิดความร้อนและกำลังงานสูญเสียในสายส่งอย่างมาก รวมถึงกำลังสูญเสียในอุปกรณ์ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า และมอเตอร์ [1-3]
- ทำให้อุปกรณ์ป้องกัน เช่น ฟิวส์ เบรกเกอร์ และรีเลย์ทำงานผิดพลาด เนื่องจากผลของฮาร์มอนิกที่ทำให้แรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ อุปกรณ์วัดบางชนิด เช่น มิเตอร์วัดค่ากำลังงานไฟฟ้า (watt-hour meter) ซึ่งโดยปกติถูกปรับแต่งไว้ให้ทำงานที่ความถี่มูลฐาน อาจทำงานผิดพลาดเช่นกัน [2],[48]
- แรงดันฮาร์มอนิกและสภาวะเรโซแนนซ์จะก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียในตัวเก็บประจุ และการขยายตัวของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ กระแสฮาร์มอนิกยังส่งผลให้ความร้อนและความเครียดไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตัวเก็บประจุมีอายุการใช้งานที่สั้นลง [49]

### 3.6 วิธีการกำจัดฮาร์มอนิก

จากการศึกษาค้นคว้าวิธีการกำจัดฮาร์มอนิก พบว่า มีวิธีที่นิยมใช้แก้ปัญหาอยู่ 3 วิธี ได้แก่ การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ และ การใช้วงจรกรองกำลังไฮบริด โดยแต่ละวิธีหลักการทำงาน ข้อดี ข้อเสีย และความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนี้

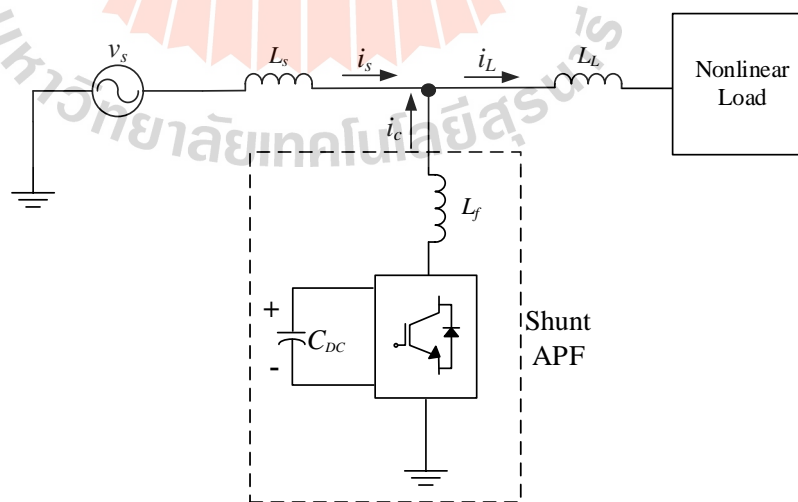


รูปที่ 3.1 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟ

**วิธีที่ 1** การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter: PPF) [50] จะใช้การเชื่อมต่ออุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ ได้แก่ ตัวต้านทาน ( $R_f$ ) ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_f$ ) และตัวเก็บประจุ ( $C_f$ ) เพื่อลดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า วงจรกรองกำลังพาสซีฟสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท และให้ผลของการลดฮาร์มอนิกที่แตกต่างกันออกไป เช่น วงจรกรองจูนแบบอนุกรม (Series Tuned Filter) ให้ผลการลดฮาร์มอนิกอันดับใดอันดับหนึ่งเท่านั้น วงจรกรองผ่านแถบคู่ (Double band-pass Filter) ให้ผลของการลดฮาร์มอนิกสองอันดับ วงจรกรองหน่วง (Damped Filter) ให้ผลการลดฮาร์มอนิกในอันดับใด ๆ ที่สูงกว่าอันดับที่ออกแบบไว้ และวงจรกรองดีจูน (Detuned Filter) ช่วยลดฮาร์มอนิกได้เล็กน้อย แต่มีวัตถุประสงค์หลักในการใช้งาน คือ หลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ เป็นต้น

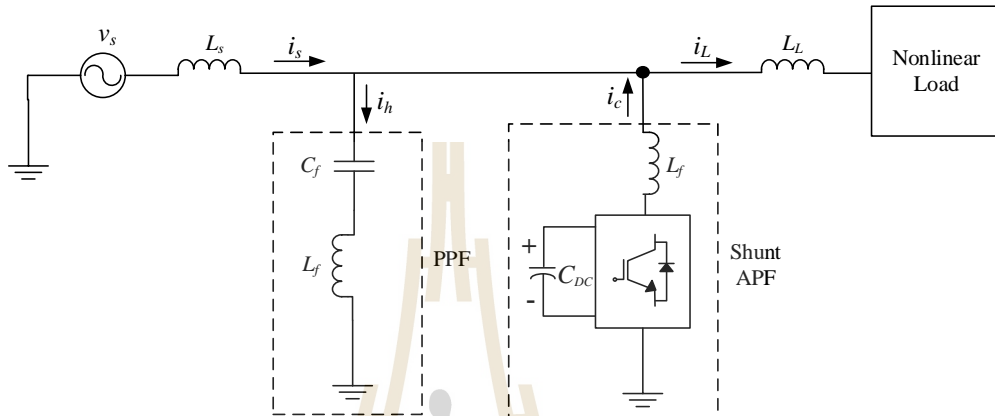
สำหรับแผนภาพระบบการใช่วงจรกรองกำลังพาสซีฟในการกำจัดฮาร์มอนิกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 โดยข้อดีของการใช่วงจรกรองกำลังพาสซีฟ คือ ใช้อุปกรณ์น้อย การออกแบบทำได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องมีตัวควบคุม และมีราคาถูก ส่วนข้อเสีย คือ อาจทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ และไม่ยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบไฟฟ้า

**วิธีที่ 2** การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Active Power Filter: APF) [22,50] จะใช้วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังฉีดกระแสเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งแผนภาพระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 3.2 สำหรับข้อดีของการใช่วงจรกรองกำลังแอกทีฟ คือ มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ ส่วนข้อเสีย คือ มีความซับซ้อนมากกว่าวงจรกรองกำลังพาสซีฟ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์จำนวนมาก และจำเป็นต้องมีการออกแบบตัวควบคุมหลายส่วน



รูปที่ 3.2 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

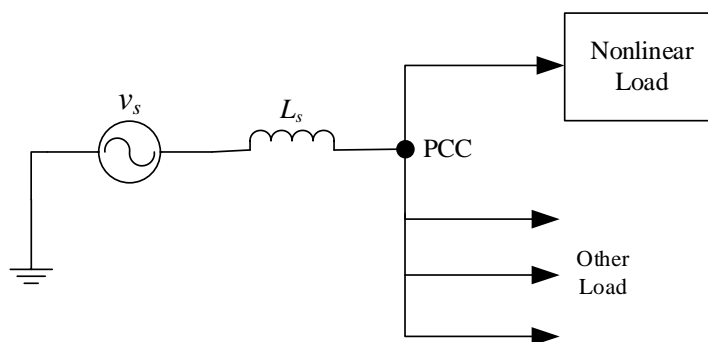
**วิธีที่ 3** การใช้วงจรกรองกำลังไฮบริด (Hybrid Power Filter: HPF) [50] เป็นการนำข้อดีของวงจรกรองกำลังพาสซีฟและวงจรกรองกำลังแอกทีฟมาผสมผสานเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวงจรกรอง แต่จะส่งผลให้มีราคาแพง และการออกแบบมีความยากและซับซ้อนมากกว่าวิธีอื่น ๆ [9] อีกทั้งยังคงต้องเสี่ยงกับปัญหาเรโซแนนซ์ในส่วนของวงจรกรองกำลังพาสซีฟ แผนภาพระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริดสามารถดูได้จากรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริด

### 3.7 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก

มาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [47] ได้กำหนดขีดจำกัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันที่ยอมรับได้ ณ จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้ไฟฟ้าและระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยขีดจำกัดของค่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกสามารถดูได้จากตารางที่ 3.1 ส่วนขีดจำกัดของค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสฮาร์มอนิกสามารถดูได้จากตารางที่ 3.2 ถึง 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงจุด PCC ตามมาตรฐาน IEEE 519-2014

ตารางที่ 3.1 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบพิกัดแรงดันต่าง ๆ

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69$ kV	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161$ kV	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

ตารางที่ 3.2 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบที่มีพิกัดแรงดัน 120 V ถึง 69 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of $I_L$						
Individual harmonic order (odd harmonics) <sup>a,b</sup>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	%TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$> 1000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

ตารางที่ 3.3 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกของระบบที่มีพิกัดแรงดันมากกว่า 69 kV ถึง 161 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of $I_L$						
Individual harmonic order (odd harmonics) <sup>a,b</sup>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	%TDD
$< 20^c$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$20 < 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
$50 < 100$	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
$100 < 1000$	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
$> 1000$	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

ตารางที่ 3.4 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบที่มีพิกัดแรงดันมากกว่า 161 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of $I_L$						
Individual harmonic order (odd harmonics) <sup>a,b</sup>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	%TDD
$< 25^c$	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
$25 < 50$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

<sup>a</sup> ฮาร์มอนิกอันดับคู่ถูกจำกัดให้มีค่าไม่เกิน 25% ของขีดจำกัดของฮาร์มอนิกอันดับคี่ที่มีลำดับสูงกว่า

<sup>b</sup> ไม่อนุญาตให้มีการบิดเบี้ยวของกระแสที่ส่งผลต่อ dc offset เช่น วงจรแปลงผันแบบครึ่งคลื่น

<sup>c</sup> อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดถูกจำกัดตามค่าความบิดเบี้ยวของกระแสเหล่านี้ โดยไม่คำนึงถึง  $I_{sc}/I_L$  ที่แท้จริง

โดย  $I_{sc}$  ในตารางที่ 3.2 ถึง 3.4 คือ ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่จุด PCC และ  $I_L$  คือ ค่าความต้องการกระแสโหลดสูงสุด (ส่วนประกอบที่ความถี่มูลฐาน) ที่จุด PCC ภายใต้การทำงานของโหลดในสภาวะปกติ ส่วนค่า TDD หรือ Total Demand Distortion คือ ค่ารากที่สองของผลรวมกระแสฮาร์มอนิกยกกำลังสองต่อความต้องการกระแสโหลดสูงสุด โดยสามารถคำนวณเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ได้จากสมการที่ 3.8

$$\% \text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (3.8)$$

จากตารางที่ 3.1 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับและค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่ยอมรับได้ ณ จุด PCC จะมีค่าแตกต่างกันตามระดับพิกัดแรงดันไฟฟ้าของระบบ เช่น ที่แรงดันน้อยกว่า 1 kV ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับจะต้องไม่เกิน 5% และค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมจะต้องไม่เกิน 8% เป็นต้น

จากตารางที่ 3.2 ถึง 3.4 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้ ณ จุด PCC จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ  $I_{sc}/I_L$  เช่น กรณีระบบจำหน่ายมีค่าแรงดันอยู่ในช่วง 120 V ถึง 69 kV และมีค่าอัตราส่วนของ  $I_{sc}/I_L$  น้อยกว่า 20 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกของอันดับที่ 3 5 7 และ 9 จะมีค่าเท่ากับ 4% อันดับที่ 11 13 และ 15 มีค่าเท่ากับ 2% อันดับที่ 17 19 และ 21 มีค่าเท่ากับ 1.5% อันดับที่ 23 25 27 29 31 และ 33 มีค่าเท่ากับ 0.6% อันดับที่ 35 37 39 41 43 45 47 และ 50 มีค่าเท่ากับ 0.3% และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมแบบ %TDD จะต้องไม่เกิน 5% เป็นต้น

### 3.8 สรุป

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์โมนิกที่ได้นำเสนอในบทนี้ คือ นิยามของฮาร์โมนิก ประเภทของฮาร์โมนิก แหล่งกำเนิดของฮาร์โมนิก ผลกระทบของฮาร์โมนิก วิธีการกำจัดฮาร์โมนิก และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับฮาร์โมนิก ถือเป็นพื้นฐานสำคัญที่จำเป็นต้องรู้และเข้าใจ เพื่อจะสามารถนำไปใช้ต่อยอดในการศึกษาค้นคว้าวิจัย วิเคราะห์ปัญหา และเลือกใช้วิธีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับฮาร์โมนิกได้อย่างถูกต้องเหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับการกำจัดฮาร์โมนิกซึ่งจะนำเสนอองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องในบทต่อ ๆ ไป



## บทที่ 4

### การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน

#### 4.1 กล่าวนำ

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส จำเป็นจะต้องใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเพื่อสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิงในการฉีดกระแสชดเชยให้กับระบบไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันมีหลากหลายวิธี เช่น วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (Instantaneous Reactive Power Theory หรือวิธี PQ) วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (Synchronous Reference frame: SRF/DQ) วิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (Sliding Window with Fourier Analysis: SWFA) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องแม่นยำ รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ โดยเนื้อหาในบทนี้จะประกอบด้วย การอธิบายขั้นตอนการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA การทดสอบตรวจสอบสมรรถนะของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกกับวิธีอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน

#### 4.2 ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA

ในปี 2001 M. El-Habrouk และ M.K. Darwish [21] ได้นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ที่ใช้สมการฟูรีเยร์ในการวิเคราะห์กระแสโหลดเพื่อคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก โดยประยุกต์ใช้เทคนิควินโดว์เลื่อนสำหรับช่วยลดระยะเวลาในการคำนวณ ทำให้วิธีดังกล่าวมีความถูกต้องแม่นยำในการตรวจจับฮาร์มอนิกและมีความรวดเร็วในการประมวลผลมากกว่าวิธี FFT สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA จะเริ่มต้นจากการพิจารณาสมการความสัมพันธ์ออยเลอร์ฟูรีเยร์ (Euler-Fourier formulas) ของกระแสโหลด ( $i_L$ ) ในระบบไฟฟ้างดสมการที่ (4.1) โดยสมการดังกล่าวประกอบด้วย เทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง (DC Component) และเทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ (AC Component)

$$i_L(kT_s) = \underbrace{\frac{A_0}{2}}_{\text{DC Component}} + \underbrace{\sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega kT_s) + B_h \sin(h\omega kT_s)]}_{\text{AC Component}} \quad (4.1)$$



จากสมการที่ (4.1) พิจารณากระแสไหลตจะพบว่าประกอบไปด้วยสัญญาณที่ความถี่มูลฐาน ( $h=1$ ) และสัญญาณที่ความถี่ฮาร์โมนิกอันดับต่าง ๆ ( $h=[2,\infty)$ ) ดังนั้น ค่ากระแสไหลตที่ความถี่ใด ๆ สามารถหาได้จากสมการที่ (4.2) โดยค่าสัมประสิทธิ์  $A_h$  และ  $B_h$  ในสมการดังกล่าว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.3) และ (4.4) ตามลำดับ

$$i_{Lh}(kT_s) = A_h \cos(h\omega kT_s) + B_h \sin(h\omega kT_s) \quad (4.2)$$

$$A_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_L(nT_s) \cos(h\omega nT_s) \quad (4.3)$$

$$B_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_L(nT_s) \sin(h\omega nT_s) \quad (4.4)$$

โดยที่  $T_s$  คือ ค่าเวลาในการซิกตัวอย่าง (วินาที, s)

$\omega$  คือ ค่าความถี่เชิงมุมที่ความถี่มูลฐาน (เรเดียนต่อวินาที, rad/s)

$h$  คือ อันดับของฮาร์โมนิก

$n$  คือ ค่าตัวบ่งชี้เวลา

$N$  คือ จำนวนจุดข้อมูลในการคำนวณต่อหนึ่งคาบความถี่มูลฐาน

ในการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกจะพิจารณากระแสไหลตที่ความถี่มูลฐาน ( $i_{L1}$ ) ดังสมการที่ (4.5) โดยค่าสัมประสิทธิ์  $A_1$  และ  $B_1$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.6) และ (4.7) ตามลำดับ

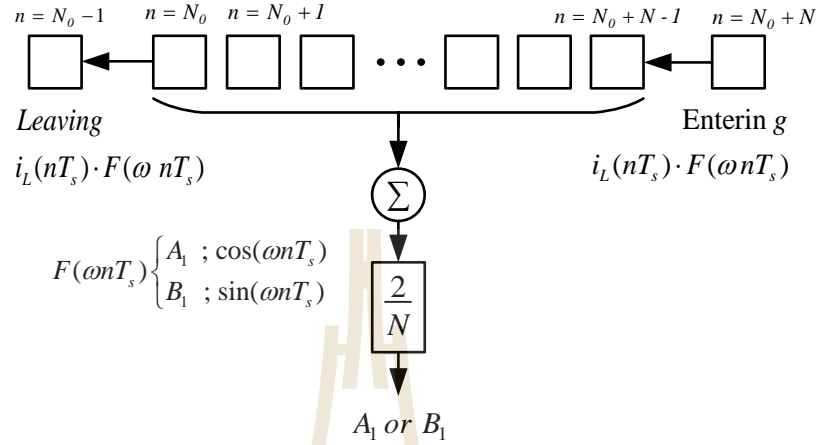
$$i_{L1}(kT_s) = A_1 \cos(\omega kT_s) + B_1 \sin(\omega kT_s) \quad (4.5)$$

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_L(nT_s) \cos(\omega nT_s) \quad (4.6)$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_L(nT_s) \sin(\omega nT_s) \quad (4.7)$$

จากสมการดังกล่าวในข้างต้น ขั้นตอนการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี SWFA สามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 รับข้อมูลกระแสไหลด ( $i_L$ ) หนึ่งคาบ จำนวน  $N$  ข้อมูล และคำนวณหาค่า  $A_1, B_1$  เริ่มต้น ตามสมการที่ (4.6) และ (4.7) ตามลำดับ โดย  $A_1$  และ  $B_1$  จะถูกเรียงลำดับข้อมูลจาก  $n = N_0, N_0 + 1, N_0 + 2, \dots, N_0 + N - 1$  ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์  $A_1$  และ  $B_1$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่า  $A_1, B_1$  ค่าใหม่ ( $A_1^{new}, B_1^{new}$ ) ด้วยเทคนิควินโดว์เลื่อน คือ เลื่อนลบข้อมูล  $i_L(nT_s) \cdot F(\omega nT_s)$  ค่าเก่า (ตำแหน่งข้อมูลที่  $n = N_0 - 1$ ) ออกจาก  $A_1^{new}, B_1^{new}$  (การคำนวณรอบแรก ค่า  $A_1^{old}, B_1^{old}$  จะมีค่าเท่ากับ  $A_1, B_1$  เริ่มต้น) จากนั้นเลื่อนข้อมูล  $i_L(nT_s) \cdot F(\omega nT_s)$  ค่าใหม่ (ตำแหน่งข้อมูลที่  $n = N_0 + N$ ) บวกเข้าไปใน  $A_1^{old}, B_1^{old}$  การคำนวณข้างต้นแสดงเป็นรูปภาพได้ดังรูปที่ 4.1 โดยการคำนวณหาค่า  $A_1^{new}$  กำหนดให้  $F(\omega nT_s)$  คือ ฟังก์ชัน  $\cos(\omega nT_s)$  และการคำนวณหาค่า  $B_1^{new}$  กำหนดให้  $F(\omega nT_s)$  คือ ฟังก์ชัน  $\sin(\omega nT_s)$  ซึ่งสามารถอธิบายการคำนวณดังกล่าวได้ดังสมการ (4.8) และ (4.9) ตามลำดับ

$$A_1^{new} = A_1^{old} + \frac{2}{N} [i_L\{(N_0 + N)T_s\} \cdot \cos\{\omega(N_0 + N)T_s\} - i_L\{(N_0 - 1)T_s\} \cdot \cos\{\omega(N_0 - 1)T_s\}] \quad (4.8)$$

$$B_1^{new} = B_1^{old} + \frac{2}{N} [i_L\{(N_0 + N)T_s\} \cdot \sin\{\omega(N_0 + N)T_s\} - i_L\{(N_0 - 1)T_s\} \cdot \sin\{\omega(N_0 - 1)T_s\}] \quad (4.9)$$

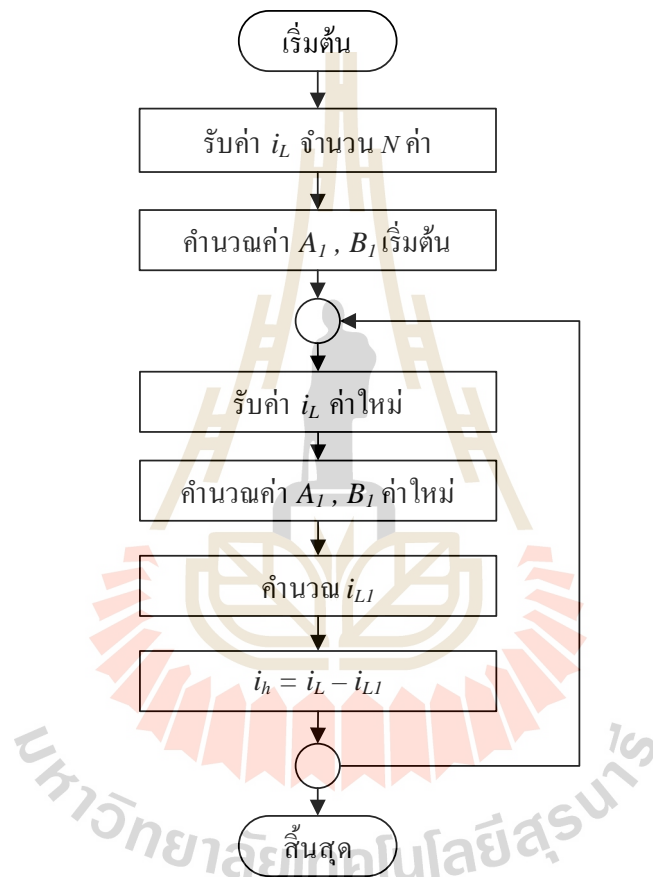
ขั้นที่ 3 นำค่า  $A_1^{new}, B_1^{new}$  ที่ได้จากขั้นที่ 3 ไปใช้คำนวณหาค่า  $i_{L1}$  โดยใช้สมการที่ (4.5)

ขั้นที่ 4 คำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิก ( $i_h$ ) โดยนำค่า  $i_{L1}$  ซึ่งเป็นค่ากระแสไหลดที่ความถี่มูลฐาน ไปหักลบออกจากค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลดทั้งหมด ( $i_L$ ) ดังสมการที่ (4.10)

$$i_h = i_L - i_{L1} \quad (4.10)$$

ขั้นที่ 5 ในขั้นที่ 1 ถึง 4 เป็นการคำนวณหาค่า  $i_h$  จุดข้อมูลแรกเท่านั้น สำหรับค่า  $i_h$  ของจุดข้อมูลถัดไปจะต้องดำเนินการคำนวณซ้ำในขั้นที่ 2 ถึง 4 ใหม่ต่อไปเรื่อย ๆ จึงจะทำให้ได้รูปสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกต่อเนื่องทุกจุดช่วงเวลา เพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิง ( $i_c^*$ ) ให้กับวงจรรอกกำลังแยกทีฟในการฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิกให้กับระบบไฟฟ้าต่อไป ( $i_c^* = i_h$ )

จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกทั้ง 5 ขั้นตอนในข้างต้น สามารถเขียนสรุปเป็นแผนภาพการโปรแกรมคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA แสดงได้ดังรูปที่ 4.2

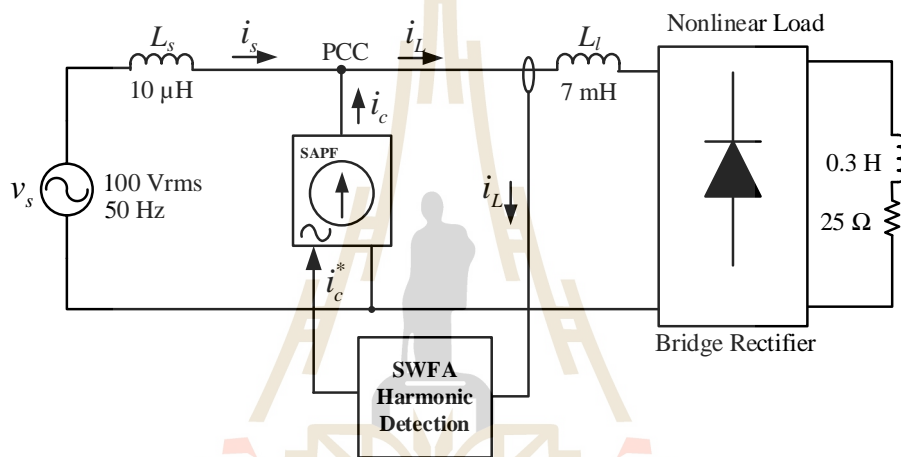


รูปที่ 4.2 แผนภาพการโปรแกรมตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA

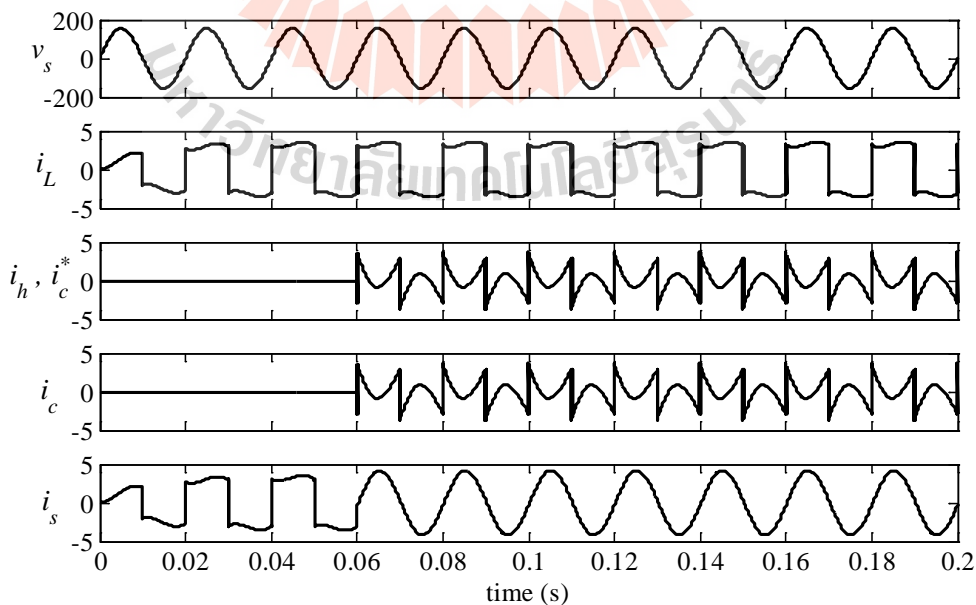
### 4.3 การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA

ระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 100 V<sub>rms</sub> ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz เชื่อมต่อกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบ คือ วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier) ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานขนาด 25 Ω ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 0.3 H การจำลองสถานการณ์ระบบดังกล่าวเพื่อตรวจสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA จะใช้วงจรรอกกำลังแยกทีฟแบบขนานหรือวงจร SAPF ที่มีโครงสร้างเป็นแหล่งจ่ายกระแสแบบอุดมคติ (Ideal current source) ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบสมรรถนะ

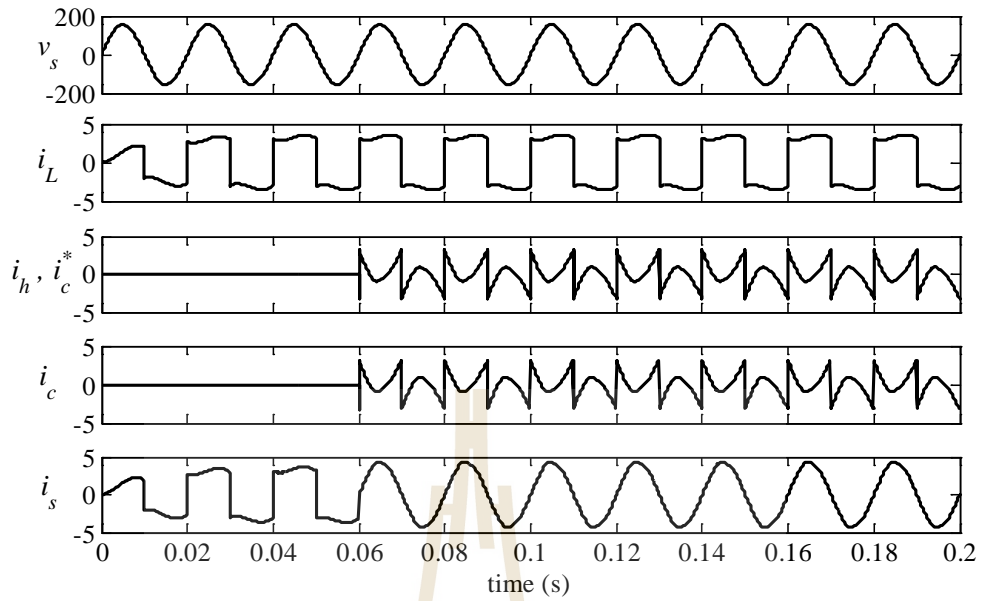
วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียวโดยยังไม่คำนึงผลของโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังนั้น จึงทำให้กระแสชดเชย ( $i_c$ ) ที่ฉีดโดยวงจรรอกำลังแอกทีฟดังกล่าวมีค่าเท่ากับกระแสอ้างอิง ( $i_c^*$ ) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกทุกประการ ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ในระบบพิจารณาดังกล่าว สามารถดูได้จากรูปที่ 4.4 นอกจากนี้ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกของวิธี SWFA กับวิธีอื่น ๆ ในที่นี้จะทำการทดสอบใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบที่พิจารณาด้วยวิธี PQ [20] และวิธี SRF [25] (ที่ออกแบบใช้ความถี่ตัดของวงจรรอกความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 เท่ากับ 30 Hz) ด้วยเช่นกัน ซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ ในขณะที่ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายทั้งก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยที่ได้จากทั้งสามวิธีสามารถดูได้จากรูปที่ 4.7 ถึง 4.10



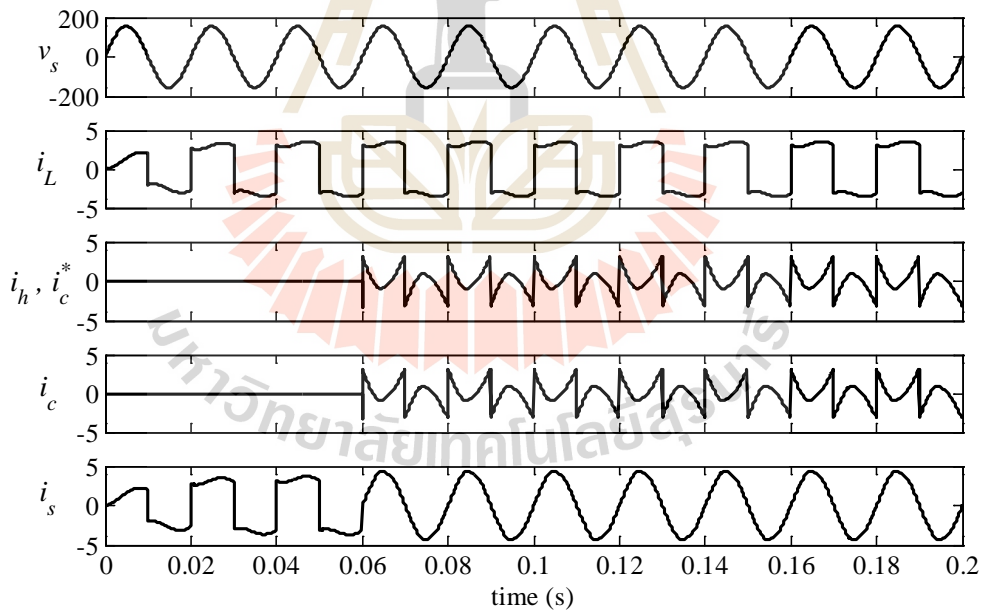
รูปที่ 4.3 ระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก



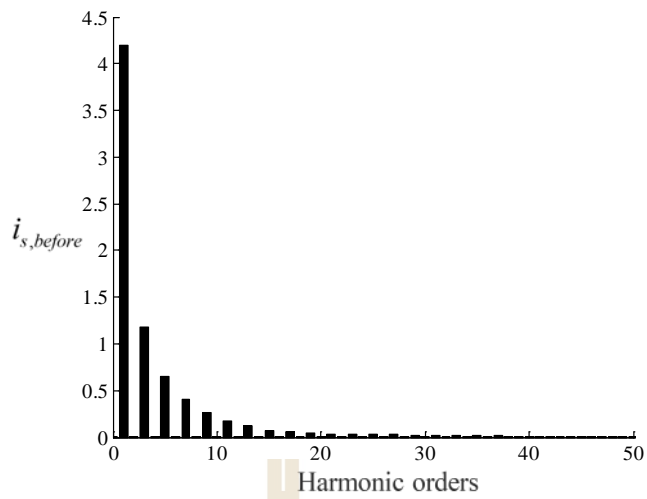
รูปที่ 4.4 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA



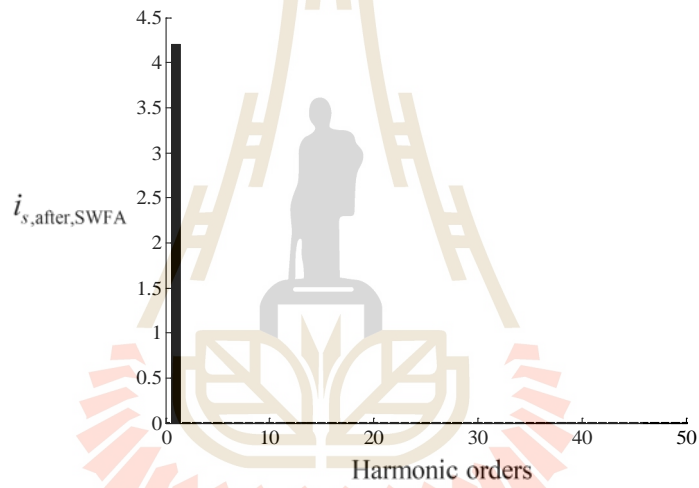
รูปที่ 4.5 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ



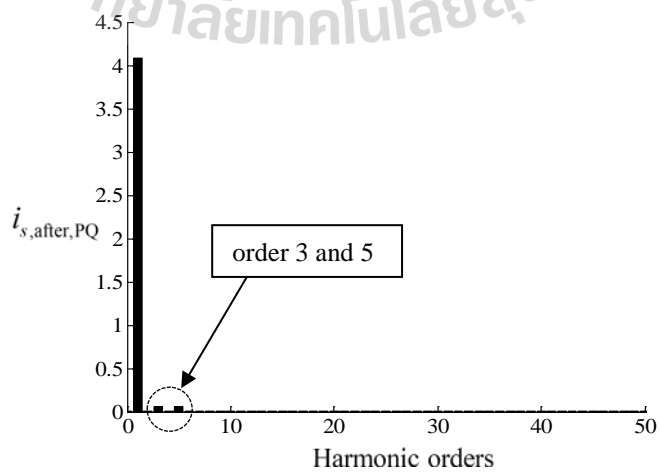
รูปที่ 4.6 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF



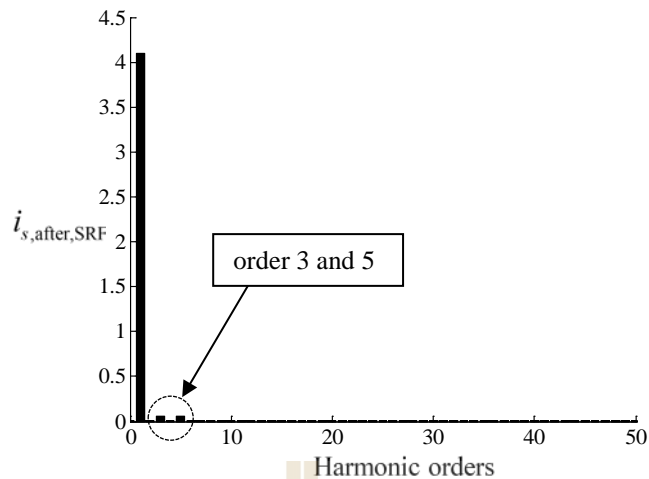
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของ  $i_s$  ก่อนการชดเชย



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของ  $i_s$  หลังการชดเชยด้วยวิธี SWFA



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมของ  $i_s$  หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ

รูปที่ 4.10 สเปกตรัมของ  $i_s$  หลังการชดเชยด้วยวิธี SRFตารางที่ 5.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสที่แหล่งจ่าย (%THD<sub>i</sub>)

วิธีตรวจจับฮาร์มอนิก	%THD <sub>i</sub> ก่อนการชดเชย	%THD <sub>i</sub> หลังการชดเชย
วิธี SWFA	34.65%	0.08%
วิธี PQ		1.99%
วิธี SRF		1.98%

ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของระบบที่พิจารณาตั้งรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 ในช่วงเริ่มต้นก่อนการชดเชยที่เวลา 0 ถึง 0.06 วินาที ลักษณะของกระแสที่แหล่งจ่าย ( $i_s$ ) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์เหมือนกับกระแสไหลตทุกประการ โดยสามารถวัดค่า %THD<sub>i</sub> ก่อนการชดเชยได้ค่าเท่ากับ 34.65% อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่เวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติทำการฉีดกระแสชดเชย ( $i_c$ ) ที่มีลักษณะตามกระแสอ้างอิง ( $i_c^*$ ) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA วิธี PQ และวิธี SRF พบว่า สามารถชดเชยกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี ซึ่งจะเห็นได้ว่า ลักษณะรูปสัญญาณของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีลักษณะกลับมาเป็นรูปไซน์ โดยจากตารางที่ 5.1 ค่า %THD<sub>i</sub> ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยกรณีใช้การตรวจจับด้วยวิธี SWFA มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.08% ในขณะที่ค่า %THD<sub>i</sub> ที่ได้จากรวิธี PQ และวิธี SRF มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 1.99% และ 1.98% ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนมีการชดเชยตั้งรูปที่ 4.7 พบว่า กระแสดังกล่าวประกอบด้วยปริมาณที่ความถี่มูลฐาน ( $h = 1$ ) ขนาด 4.2 A และปริมาณกระแสที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ( $1 < h \leq 50$ ) ขนาดดังที่ปรากฏในรูปกราฟ อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบมีการชดเชยโดยใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA พบว่า สเปกตรัมของกระแสดังกล่าวไม่ปรากฏปริมาณฮาร์มอนิกในทุกอันดับ (มีค่าประมาณศูนย์) ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.8 ในขณะที่

สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยในกรณีที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SRF ยังคงพบว่ามีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในอันดับที่ 3 และ 5 หลงเหลืออยู่เล็กน้อย จากผลดังกล่าว หมายความว่าวิธี SWFA สามารถตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องแม่นยำกว่า PQ และวิธี SRF จึงส่งผลให้การกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบที่พิจารณาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

#### 4.4 สรุป

การตรวจจับฮาร์มอนิกถูกใช้เพื่อการคำนวณกระแสอ้างอิงในการชดเชยให้กับวงจรรอกกำลัง แยกทีฟ ซึ่งถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งในการกำจัดฮาร์มอนิกเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด ในบทนี้จึงได้นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ซึ่งมีคุณสมบัติในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกที่ถูกต้องแม่นยำ โดยผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นแล้วว่า วิธี SWFA มีสมรรถนะในการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี PQ และวิธี SRF กล่าวคือ วิธี SWFA สามารถตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องมากที่สุดและส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากที่ระบบได้รับการชดเชยมีค่า %THD<sub>i</sub> น้อยที่สุด



## บทที่ 5

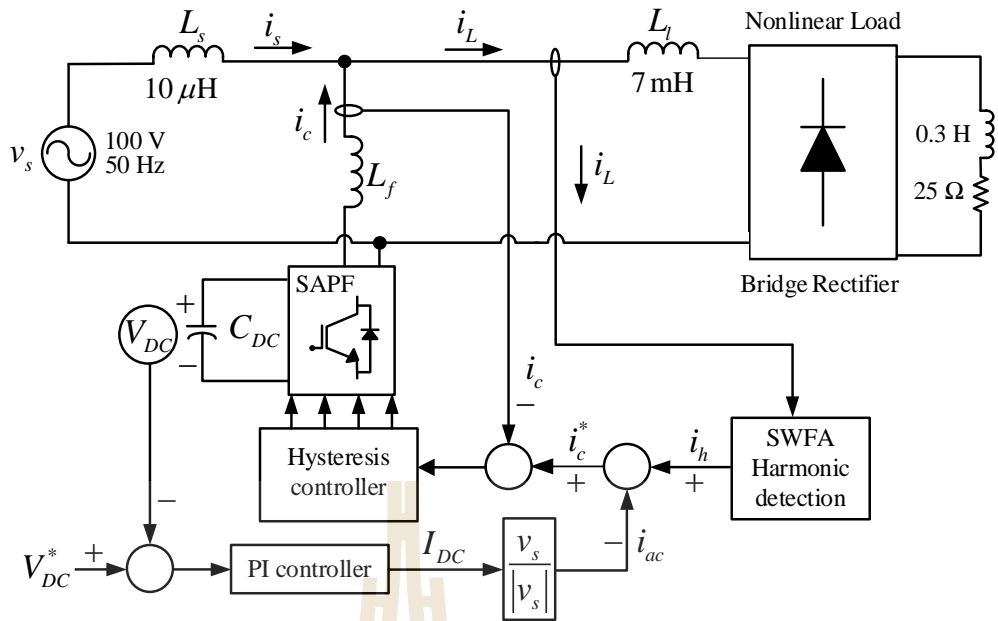
### การออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานและตัวควบคุม

#### 5.1 กล่าวนำ

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน คือ การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร และการออกแบบตัวควบคุมการทำงานของวงจรให้มีความเหมาะสมกับระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก โดยในบทนี้จะนำเสนอวิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ประกอบด้วยค่าตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำวงจร และนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสและตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยและควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงตามลำดับ การออกแบบดังกล่าวจะอาศัยการปรับใช้วิธีการดั้งเดิม ที่มีการคำนวณไม่ซับซ้อน แต่ให้ผลการออกแบบที่ดีสามารถทำให้วงจรรอกกำลังแอกทีฟฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี โดยเนื้อหาของบทนี้จะประกอบด้วย การอธิบายส่วนประกอบของระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน การอธิบายวิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ การอธิบายหลักการควบคุมและการออกแบบตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชย และจะอธิบายหลักการควบคุมและการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง นอกจากนี้ จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับตรวจสอบสมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟรวมถึงสมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบตามวิธีที่นำเสนอ

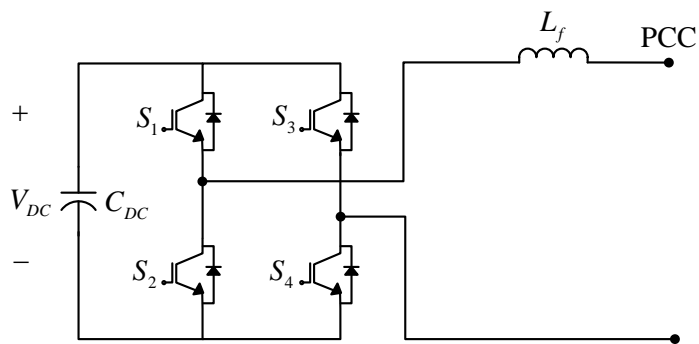
#### 5.2 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วย ส่วนของระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก (ระบบเดียวกับที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 4) และส่วนของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน (SAPF) ที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิกให้กับระบบไฟฟ้า ซึ่งวงจรดังกล่าวจะต้องทำงานร่วมกับส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA (SWFA Harmonic detection) ระบบควบคุมกระแสชดเชย ( $i_c$ ) โดยใช้ตัวควบคุมฮีสเทอรีซิส (Hysteresis controller) และระบบควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{DC}$ ) ด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ดังที่ปรากฏในบล็อกของรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (SAPF) ที่ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบเต็มบริดจ์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) จำนวน 4 ตัว ( $S_1 - S_4$ ) ตัวเก็บประจุทางฝั่ง DC ( $C_{DC}$ ) และตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองทางฝั่ง AC ( $L_f$ ) [8,9] โดยตัวเก็บประจุ  $C_{DC}$  จะทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บสะสมพลังงานในการจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ ในขณะที่สวิตช์  $S_1 - S_4$  จะทำหน้าที่เปิด-ปิดวงจรเพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เอาต์พุตของวงจร ดังโหมดการทำงานแสดงไว้ตารางที่ 5.1 และสำหรับตัวเหนี่ยวนำ  $L_f$  จะทำหน้าที่สร้างกระแสชดเชยจากแรงดันเอาต์พุตที่มีการเปลี่ยนแปลงตามการควบคุมสวิตช์ ทำให้วงจรกรองกำลังแอคทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิกเข้าที่จุด PCC ของระบบไฟฟ้าได้



รูปที่ 5.2 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (SAPF)

ตารางที่ 5.1 โหมดการทำงานของสวิตช์ไอจีบีทีในวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน

โหมดการทำงาน	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$V_{output}$
1	ON	OFF	ON	OFF	0
2	ON	OFF	OFF	ON	$+V_{DC}$
3	OFF	ON	ON	OFF	$-V_{DC}$
4	OFF	ON	OFF	ON	0

### 5.3 การออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน

#### 5.3.1 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ $L_f$

ในปี ค.ศ. 1997 D. M. E. Ingram and S. D. Round [17] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L_f$  ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยมีรายละเอียดขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงในการชดเชยสูงสุดเทียบกับเวลา ( $\max(\frac{di_c^*}{dt})$ ) โดยใช้องค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่มีขนาดกระแสมากที่สุด ( $i_{h,max}(t)$ ) ตามสมการที่ (5.1) และ (5.2) ดังนี้

$$i_{h,max}(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (5.1)$$

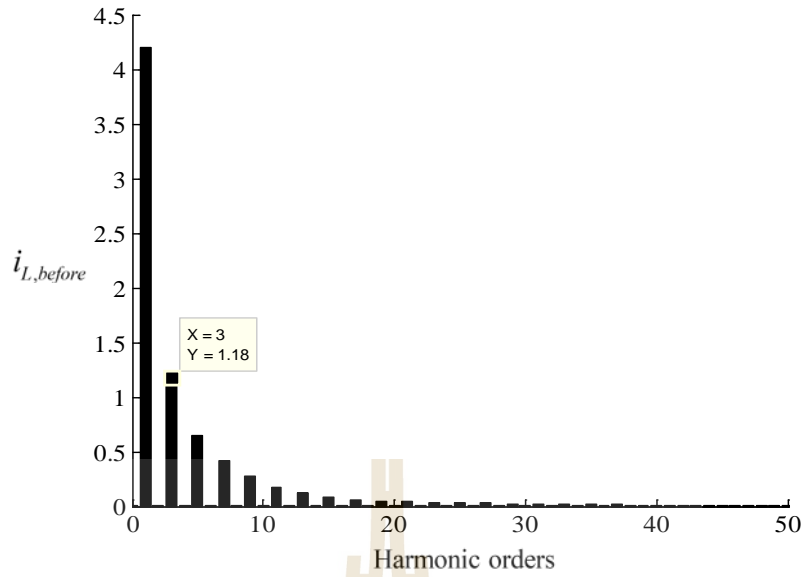
$$\max(\frac{di_c^*}{dt}) = A2\pi f \quad (5.2)$$

โดยที่  $A$  คือ แอมพลิจูดของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่มีขนาดสูงสุด ( $A$ )

$f$  คือ ความถี่ของอันดับฮาร์มอนิกที่มีขนาดกระแสสูงสุด

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกในรูปที่ 5.1 สามารถวิเคราะห์กระแสโหลด ( $i_L$ ) แสดงในรูปแบบของกราฟสเปกตรัมได้ดังรูปที่ 5.3 จากรูปดังกล่าว พบว่า กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ( $f = 150$  Hz) มีขนาดสูงสุด ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1.18 A ดังนั้น จากสมการที่ 5.2 จะสามารถคำนวณหาค่า  $\max(\frac{di_c^*}{dt})$  ได้เท่ากับ 1112.12 A/s สามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\max(\frac{di_c^*}{dt}) = 1.18 \times 2\pi \times 150 = 1112.12 \text{ A/s}$$



รูปที่ 5.3 สเปกตรัมของกระแสโหลด ( $i_L$ ) ในระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก

ขั้นที่ 2 คำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ( $L_{f, \max}$ ) โดยใช้สมการที่ (5.3) ดังนี้

$$L_{f(\max)} = \frac{V_{DC} - V_{PCC}}{\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right)} \quad (5.3)$$

โดยที่  $V_{PCC}$  คือ ค่ายอดแรงดันที่จุด PCC ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ( $\approx 141$  V)

หมายเหตุ: การออกแบบค่า  $V_{DC}$  หรือค่าแรงดันอ้างอิง ( $V_{DC}^*$ ) ควรออกแบบให้มีขนาดมากกว่าค่า  $V_{PCC}$  เพื่อให้วงจรรอกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีในทุกช่วงรูปสัญญาณ [18]

ถ้ากำหนดให้ค่า  $V_{DC}$  เท่ากับ 150 V จะสามารถคำนวณ  $L_{f, \max}$  ได้เท่ากับ 8 mH

ดังนี้

$$L_{f(\max)} = \frac{150 - 141}{1112.12} = 8 \text{ mH}$$

ขั้นที่ 3 ทำการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L_f$  ของวงจรรอกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธีการเลือกค่าที่มีขนาดไม่เกินค่า  $L_{f, \max}$

โดยในที่นี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ค่า  $L_f$  เท่ากับ 1.5 mH

### 5.3.2 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ $C_{DC}$

ในปี ค.ศ.1998 T. Thomas and et. al, [18] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบค่าตัวเก็บประจุ  $C_{DC}$  ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณหาค่าขอบเขตต่ำสุดของตัวเก็บประจุ ( $C_{DC,\min}$ ) โดยใช้สมการที่ (5.4)

$$C_{DC,\min} = \frac{\Delta \int v_{PCC} \cdot i_h dt}{\Delta V_{DC} \times V_{DC}^*} \quad (5.4)$$

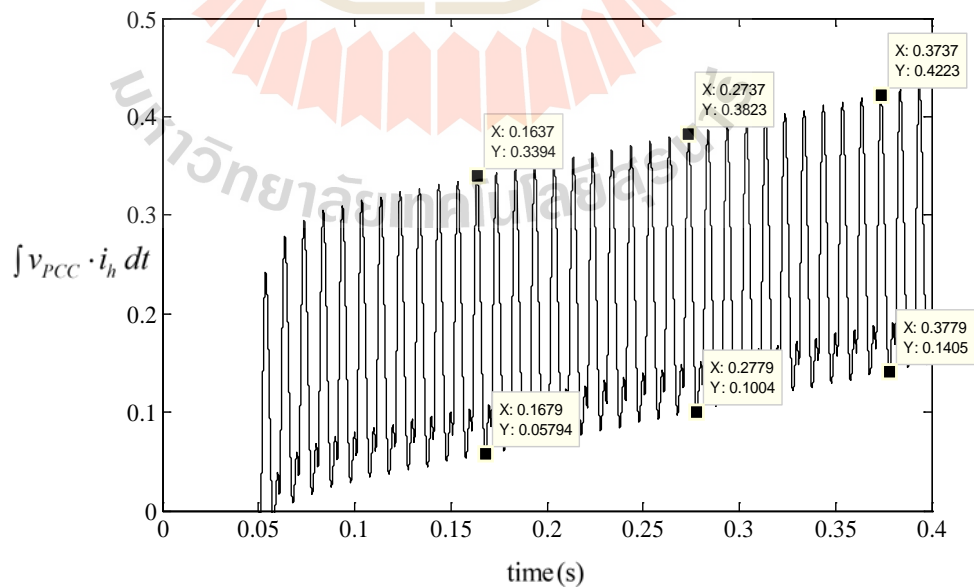
เมื่อ  $v_{PCC}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC

$i_h$  คือ ค่ากระแสฮาร์มอนิก

$\Delta V_{DC}$  คือ ค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง

$V_{DC}^*$  คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงที่ได้จากการออกแบบ

โดยการออกแบบค่าตัวเก็บประจุจะต้องคำนึงถึงค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง ( $\Delta V_{DC}$ ) ซึ่งค่า  $\Delta V_{DC}$  ดังกล่าว ควรกำหนดให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (โดยทั่วไปไม่เกิน 2% [18]) ดังนั้น จากค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ได้ออกแบบไว้ ( $V_{DC}^*$ ) คือ 150 V และกำหนดการออกแบบให้การกระเพื่อมของแรงดันมีค่าไม่เกิน 2% จะได้ว่า  $\Delta V_{DC}$  มีค่าเท่ากับ 3 V



รูปที่ 5.4 ผลการคำนวณค่า  $\int v_{PCC} \cdot i_h dt$  ของระบบที่พิจารณา

นอกจากนี้ ค่าการกระเพื่อมของเทอมอินทิเกรตผลคูณระหว่างค่าแรงดัน  $v_{PCC}$  และ กระแสฮาร์มอนิก  $i_h$  ( $\Delta \int v_{PCC} \cdot i_h dt$ ) ของระบบที่พิจารณา สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.4 ซึ่งจาก จุดข้อมูลแต่ละคู่ในแต่ละช่วงเวลา พบว่า ค่า  $\Delta \int v_{PCC} \cdot i_h dt$  ของระบบที่พิจารณานี้มีค่าประมาณ เท่ากับ 0.28 VA

จากค่า  $V_{DC}^*$  เท่ากับ 150 V ค่า  $\Delta V_{DC}$  เท่ากับ 3 V และค่า  $\Delta \int v_{PCC} \cdot i_h dt$  เท่ากับ 0.28 VA ทำให้สามารถคำนวณค่า  $C_{DC,min}$  ตามสมการที่ (5.4) ได้เท่ากับ 0.62 mF แสดงได้ดังนี้

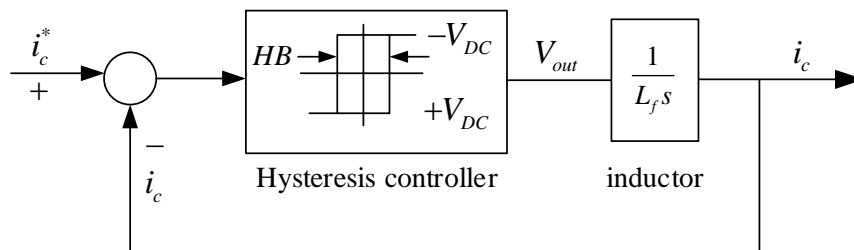
$$C_{DC,min} = \frac{0.28}{3 \times 150} = 0.62 \text{ mF}$$

ขั้นที่ 2 ทำการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ  $C_{DC}$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ วิธีการเลือกค่าที่มีขนาดมากกว่าค่า  $C_{DC,min}$

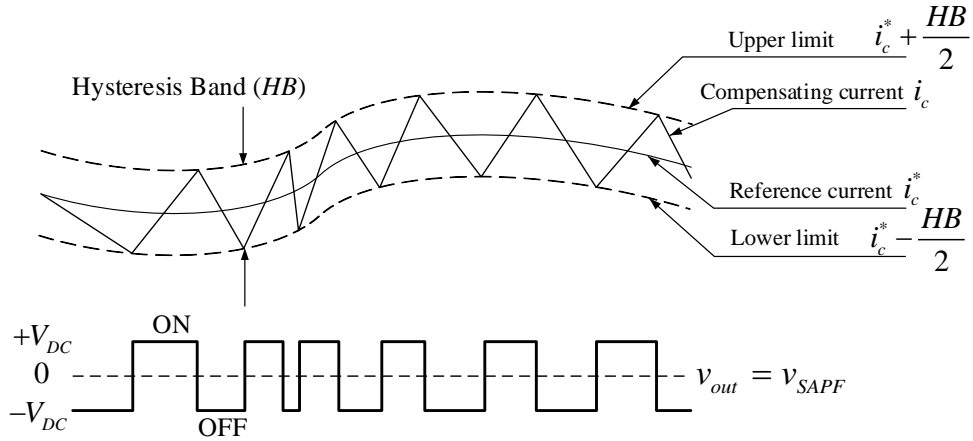
ซึ่งในที่นี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ขนาดตัวเก็บประจุ  $C_{DC}$  เท่ากับ 2.8 mF

#### 5.4 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเทอรีซิส

การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเทอรีซิส (Hysteresis controller) [17] เป็น วิธีการที่สามารถควบคุมการผิดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมี จุดเด่น คือ โครงสร้างและหลักการทำงานของตัวควบคุมไม่ซับซ้อน ออกแบบได้ง่าย มีการตอบสนอง ที่รวดเร็ว และสามารถควบคุมกระแสชดเชยโดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้เทคนิคการสวิตช์ เนื่องจากการ ควบคุมดังกล่าวจะทำให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณพัลส์ควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยตรง จึงทำให้เหมาะกับการสร้างใช้งานจริง สำหรับแผนภาพบล็อกและหลักการทำงานของกระแส ชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเทอรีซิสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ



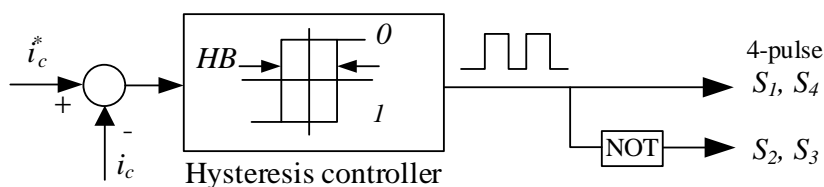
รูปที่ 5.5 แผนภาพบล็อกการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 5.6 หลักการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส

จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 หลักการทำงานของตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสจะอาศัยแถบฮีสเตอร์ซิส (Hysteresis Band:  $HB$ ) เป็นตัวกำหนดในการสั่งสวิตช์ โดยแถบฮีสเตอร์ซิสดังกล่าวจะมีลักษณะครอบครัวและเกาะตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก ( $i_c^*$ ) ตลอดทุกช่วงรูปสัญญาณ ค่าขอบเขตบน (Upper limit) ของแถบฮีสเตอร์ซิสจะมีค่าเท่ากับ  $i_c^* + \frac{HB}{2}$  ในขณะที่ค่าขอบเขตล่าง (Lower limit) จะมีค่าเท่ากับ  $i_c^* - \frac{HB}{2}$  กระแสชดเชย ( $i_c$ ) ที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันอยู่ในแถบฮีสเตอร์ซิส ซึ่งการเพิ่มขึ้นและลดลงดังกล่าวเป็นผลมาจากเงื่อนไขการสวิตช์ 3 ข้อ ดังนี้

1. ถ้า  $i_c \leq (i_c^* - \frac{HB}{2})$  กำหนดให้เอาต์พุตสวิตช์นำกระแส (ON) ส่งผลให้ค่าแรงดันเอาต์พุต ( $v_{out}$ ) ของวงจร SAPF เท่ากับ  $V_{DC}$  และจะทำให้กระแส  $i_c$  มีค่าเพิ่มขึ้น
2. ถ้า  $i_c \geq (i_c^* + \frac{HB}{2})$  กำหนดให้เอาต์พุตสวิตช์หยุดนำกระแส (OFF) ส่งผลให้ค่าแรงดันเอาต์พุต ( $v_{out}$ ) ของวงจร SAPF เท่ากับ  $-V_{DC}$  และจะทำให้กระแส  $i_c$  มีค่าลดลง
3. ถ้า  $(i_c^* + \frac{HB}{2}) > i_c > (i_c^* - \frac{HB}{2})$  กำหนดให้เอาต์พุตสวิตช์คงสถานะตามเดิม และจะทำให้กระแส  $i_c$  มีค่าคงที่



รูปที่ 5.7 การสร้างพัลส์ควบคุมสวิตช์วงจร SAPF ด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส

จากเงื่อนไขการสวิตช์ดังกล่าวในข้างต้น ในกรณีที่สวิตช์นำกระแส (ON) หมายถึง พัลส์ควบคุมสวิตช์ไอจีบีทีของ SAPF ตัว  $S_1, S_4$  มีค่าเท่ากับ 1 ในขณะที่  $S_2, S_3$  มีค่าเท่ากับ 0 ส่วนในกรณีที่สวิตช์หยุดนำกระแส (OFF) หมายถึง พัลส์ควบคุมสวิตช์  $S_1, S_4$  มีค่าเท่ากับ 0 ในขณะที่  $S_2, S_3$  มีค่าเท่ากับ 1 แทน สามารถแสดงโครงสร้างการจ่ายพัลส์ควบคุมสวิตช์ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 5.7

สำหรับการออกแบบค่า  $HB$  [38] จะใช้สมการที่ (5.5) ซึ่งเป็นสมการประมาณค่าแถบฮีสเตอร์ซิสต่ำสุด ( $HB_{\min}$ ) ที่เกิดจากการสวิตช์ที่ความถี่สูงสุด จากนั้น จะทำการเลือกใช้ค่า  $HB$  ภายใต้เงื่อนไข  $HB \geq HB_{\min}$

$$HB_{\min} = \left| \frac{V_{out} - V_{PCC}}{2L_f f_{s,\max}} \right| \quad (5.5)$$

เมื่อ  $V_{out}$  คือ ค่ายอดแรงดันเอาต์พุตของวงจร SAPF ซึ่งเท่ากับ  $V_{out} = mV_{DC}$

$m$  คือ ค่าดัชนีมอดูเลชัน

$f_{s,\max}$  คือ ค่าความถี่สวิตช์สูงสุด (Hz)

จากสมการที่ (5.5) เมื่อพิจารณาออกแบบที่ค่า  $m=0.95$  และ  $f_{s,\max}=30$  kHz (อ้างอิงตามไอจีบีทีโมดูล รุ่น SK45GH063 ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการสร้างฮาร์ดแวร์จริงเพื่อทดสอบในทางปฏิบัติ สามารถดูรายละเอียดได้ในบทที่ 6) จะสามารถคำนวณค่า  $HB_{\min}$  ได้เท่ากับ 0.016 แสดงได้ดังนี้

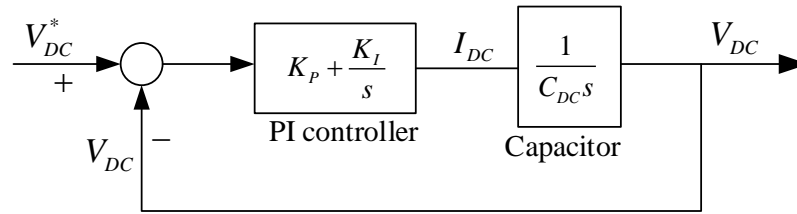
$$HB_{\min} = \frac{(0.95)(150) - 141}{(2)(1.5 \times 10^{-3})(30 \times 10^3)} = 0.016 \text{ A}$$

จากค่า  $HB_{\min}$  ที่ได้ในข้างต้น ผู้วิจัยเลือกใช้ค่า  $HB$  เท่ากับ 0.1 A (ประมาณ 2% ของ  $|i_c^*|$ ;  $|i_c^*| \approx 5 \text{ A}$ ) สำหรับใช้ทดสอบควบคุมกระแสชดเชยให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟในระบบที่พิจารณา ซึ่งสามารถดูผลการควบคุมได้ในหัวข้อที่ 5.6

หมายเหตุ: ค่า  $HB$  ไม่ควรเลือกใช้ค่าที่มากกว่า  $HB_{\min}$  มากจนเกินไป เนื่องจากจะส่งผลให้ค่ากระแสชดเชยมีขนาดของการสวิงที่ปานหนาขึ้นตามไปด้วย (ไม่ควรออกแบบเกิน 10% ของขนาด  $i_c^*$ )



## 5.5 การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 5.8 แผนภาพบล็อกการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

การควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 5.8 ซึ่ง อินพุตของตัวควบคุม คือ ผลต่างของแรงดันบัลไฟตรงค่าจริงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรอง กำลังแอกทีฟ ( $V_{DC}$ ) กับค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงที่ได้ออกแบบไว้ ( $V_{DC}^*$ ) สำหรับพลานท์ (Plant) ของระบบควบคุม คือ ตัวเก็บประจุ ( $C_{DC}$ ) โดยเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอจะถูกนำไปหักลบกับ ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกดังแสดงในรูปที่ 5.1

การออกแบบค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และค่า  $K_I$  ของตัวควบคุมแบบพีไอ [32] จะใช้วิธีการ ประมาณ โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะในฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของระบบควบคุม ( $\frac{V_{DC}}{V_{DC}^*}$ ) และพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง มาตรฐาน ( $\frac{Y(s)}{X(s)}$ ) ซึ่งได้แสดงไว้ดังสมการที่ (5.6) และ (5.7) ตามลำดับ

$$\frac{V_{DC}}{V_{DC}^*} = \frac{K_p s + K_I}{C_{DC} s^2 + K_p s + K_I} \quad (5.6)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.7)$$

ผลการเทียบสัมประสิทธิ์ดังกล่าว ทำให้ได้สมการสำหรับใช้ออกแบบค่า  $K_p$  และค่า  $K_I$  ของ ตัวควบคุมพีไอแสดงได้ดังสมการที่ (5.8) และ (5.9) ตามลำดับ

$$K_p = 2\zeta\omega_n C_{DC} \quad (5.8)$$

$$K_I = C_{DC}\omega_n^2 \quad (5.9)$$

โดยที่  $\zeta$  คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio)

$\omega_n$  คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency)

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอในงานวิจัยนี้ จะกำหนดให้  $\omega_n$  มีค่าเท่ากับ  $10\pi$  เนื่องจากค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ต้องการควบคุมมีค่าคงที่ และไม่มี ดังนั้น ตัวควบคุมจึงไม่จำเป็นต้องมีความไวสูง และการออกแบบกำหนดให้  $\zeta$  มีค่าเท่ากับ 0.707 ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดค่าแรงดันพุ่งเกินที่สูงจนเกินไป จากการกำหนดค่าดังกล่าว เมื่อกำหนดค่า  $K_p, K_I$  ตามสมการที่ (5.8) และ (5.9) จะได้ค่า  $K_p = 0.124$  และ  $K_I = 2.763$  ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$K_p = 2(0.707)(10\pi)(2.8 \times 10^{-3}) = 0.124$$

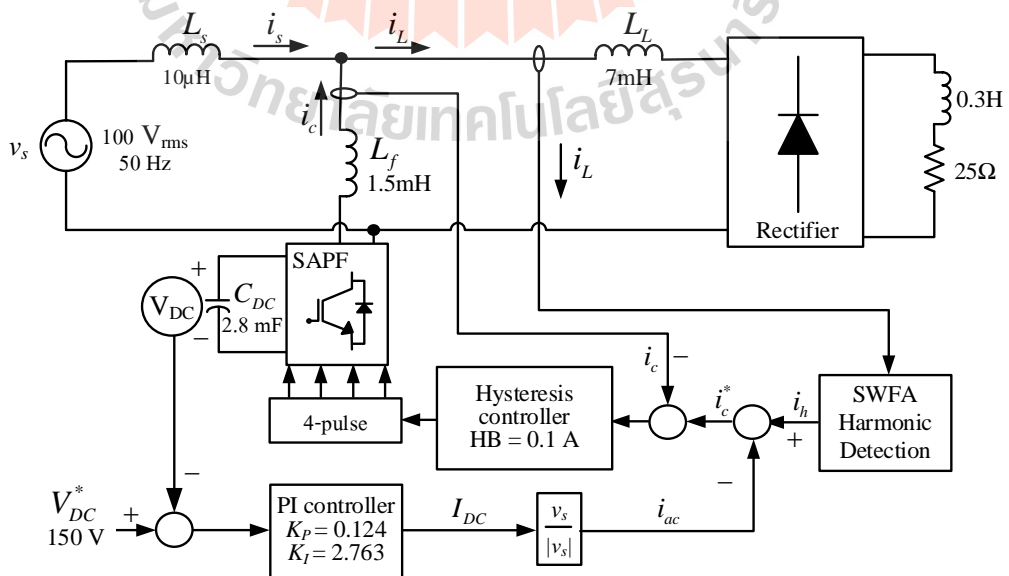
$$K_I = (2.8 \times 10^{-3})(10\pi)^2 = 2.763$$

จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน การออกแบบตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสสำหรับใช้ควบคุมกระแสสวิตชิ่ง และตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 5.3 ถึง 5.5 สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบแสดงไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับระบบกำจัดฮาร์มอนิกที่พิจารณา

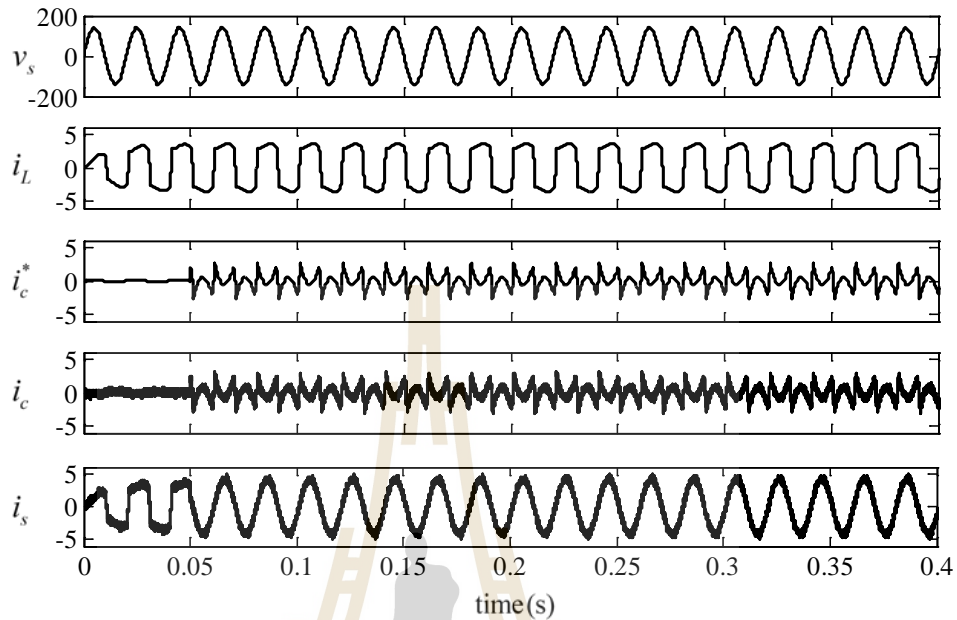
ส่วนที่พิจารณาออกแบบ	ค่าพารามิเตอร์
วงจร SAPF	$V_{DC}^* = 150 \text{ V}, L_f = 1.5 \text{ mH}, C_{DC} = 2.8 \text{ mF}$
ตัวควบคุมฮีสเทอรีซิส	$HB = 0.1 \text{ A}, f_{s,max} = 30 \text{ kHz}$
ตัวควบคุมพีไอ	$K_p = 0.124, K_I = 2.763$

### 5.6 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก

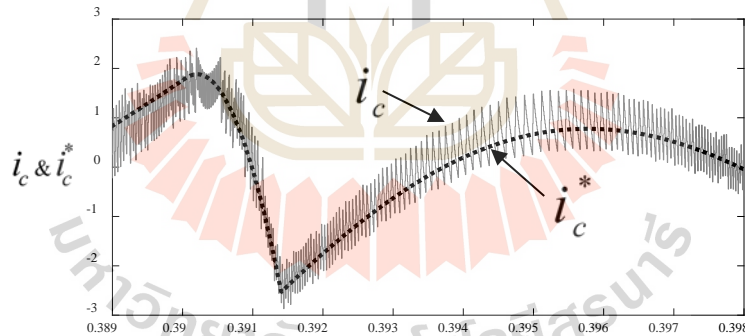


รูปที่ 5.9 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

จากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 5.2 เมื่อนำมาเขียนลงในระบบรูปที่ 5.1 จะสามารถแสดงใหม่ได้ดังรูปที่ 5.9 โดยการจำลองสถานการณ์ระบบดังกล่าวโดยใช้โปรแกรม Simulink /MATLAB สามารถแสดงผลการกำจัดฮาร์มอนิกได้ดังรูปที่ 5.10



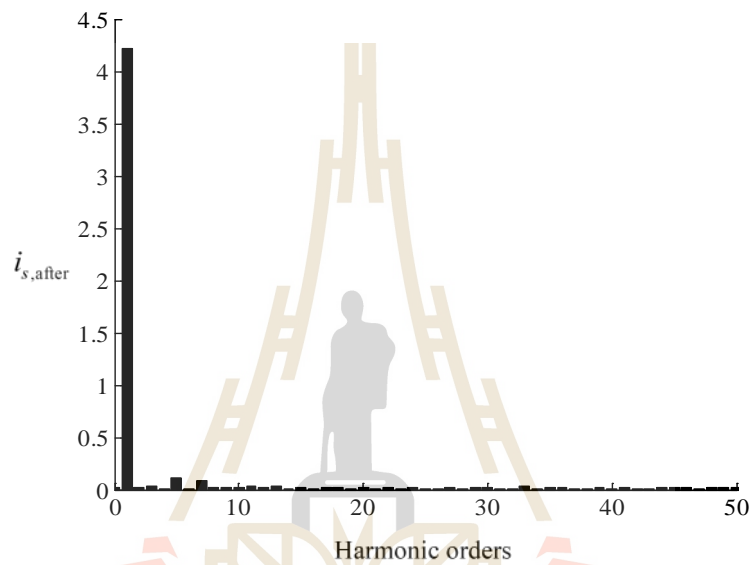
รูปที่ 5.10 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน



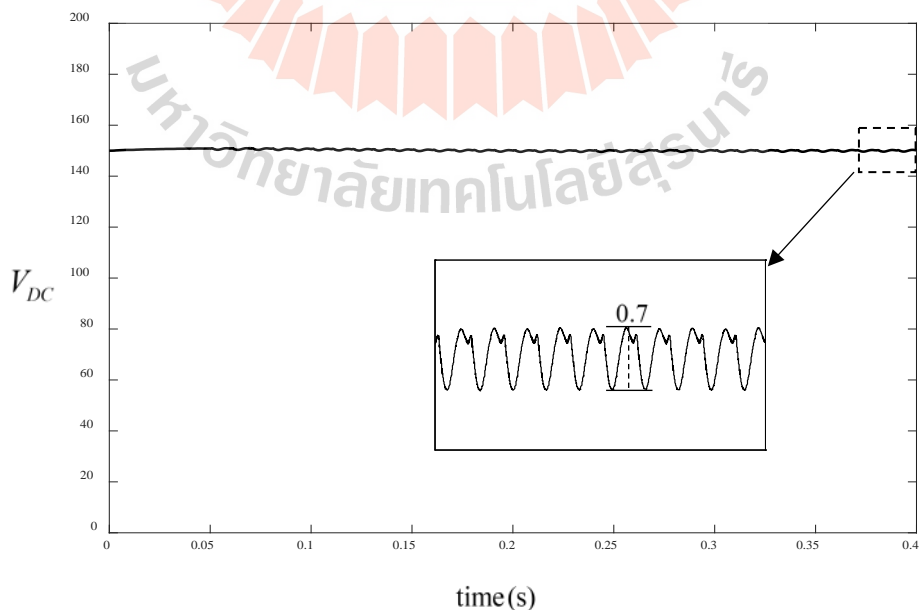
รูปที่ 5.11 ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส

จากรูปที่ 5.10 ในช่วงเวลาก่อนมีการชดเชย (กระแสชดเชย ( $i_c$ ) เท่ากับศูนย์) ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.05 วินาที สังเกตได้ว่า กระแสที่แหล่งจ่าย ( $i_s$ ) ของระบบไฟฟ้ามีลักษณะรูปสัญญาณเหมือนกับกระแสโหลด ( $i_L$ ) คือ บิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์ และเมื่อวัดค่า %THD<sub>i</sub> ได้ค่าเท่ากับ 34.65% หลังจากนั้น ตั้งแต่เวลา 0.05 วินาที เป็นต้นไป เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟทำการฉีดกระแส  $i_c$  ที่มีลักษณะรูปสัญญาณคล้อยตามกระแสอ้างอิง ( $i_c^*$ ) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA จะเห็นได้ว่า กระแส  $i_s$  มีลักษณะรูปสัญญาณกลับมาเป็นรูปไซน์มากยิ่งขึ้น โดยค่า %THD<sub>i</sub> มีค่าลดลงเหลือ 2.90%

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาวิเคราะห์กระแส  $i_s$  หลังการชดเชยดังกล่าว สามารถแสดงสเปกตรัมได้ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งสังเกตได้ว่า ขนาดกระแสที่อันดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ มีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟสเปกตรัมของกระแส  $i_s$  ในกรณีก่อนมีการชดเชยดังรูปที่ 5.3 จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นแล้วว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟและตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีสที่ได้จากการออกแบบในหัวข้อที่ผ่านมา มีสมรรถนะการทำงานร่วมกันที่ดี สามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถดูผลสมรรถนะการควบคุมกระแส  $i_c$  ด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีสได้จากรูปที่ 5.11 (การเกาะตามกระแส  $i_c^*$  ของ  $i_c$ )



รูปที่ 5.12 สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการกำจัดฮาร์มอนิก



รูปที่ 5.13 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

## 5.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็น วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน สำหรับใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส และได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชย และตัวควบคุมพีไอ เพื่อใช้ควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยการออกแบบได้ปรับใช้วิธีการแบบ ดั้งเดิม ที่อาศัยการคำนวณที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน ผลการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของ ระบบที่พิจารณาด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม Simulink/MATLAB พบว่า ระบบการ กำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟร่วมกับการใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส และการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัว ควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบ ให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยค่า %THD<sub>i</sub> ของ กระแสที่แหล่งจ่ายหลังชดเชยมีค่าลดลงเหลือ 2.90% ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std. 519-2014

จากระบบที่พิจารณาจำกัดฮาร์มอนิกและผลการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่นำเสนอใน บทนี้ จะถูกนำไปใช้อ้างอิงในการสร้างเป็นระบบฮาร์ดแวร์เพื่อทำการทดสอบจริงในทางปฏิบัติ ต่อไป ซึ่งสามารถดูผลการทดสอบและการอภิปรายผลได้ในบทที่ 6

## บทที่ 6

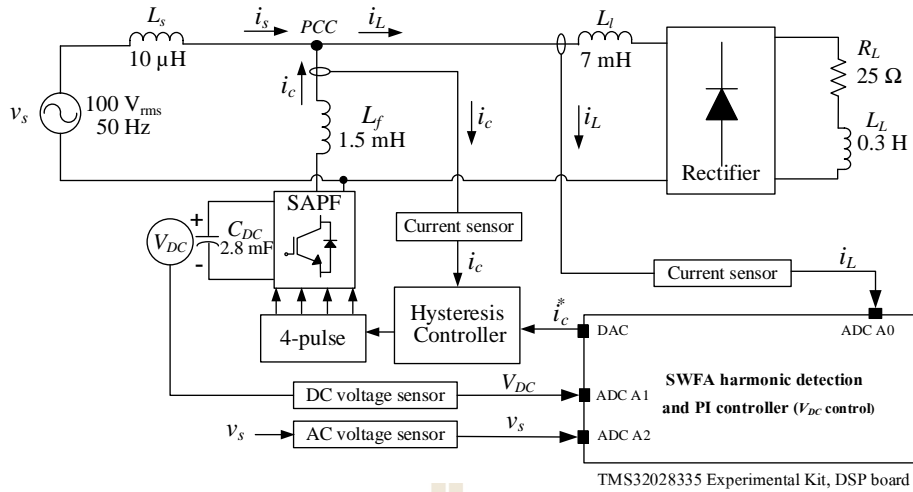
# ระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน ในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

### 6.1 กล่าวนำ

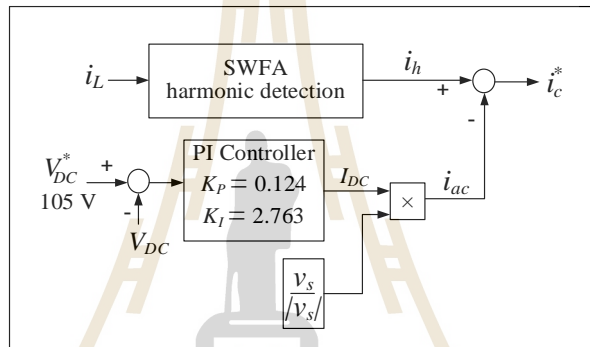
ในบทนี้จะนำเสนอการสร้างระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 5 เพื่อทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในทางปฏิบัติ โดยการสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอจะใช้การคำนวณทางดิจิทัลด้วยบอร์ด DSP รุ่น TMS320F2833 Experimental Kit ส่วนการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีสจะดำเนินการสร้างแบบแอนะล็อก (Analog) ด้วยไอซี นอกจากนี้ สำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟจะใช้ไอซีบีทีโมดูลวงจรถูกอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบบริดจ์สำเร็จรูป โดยการสร้างระบบฮาร์ดแวร์ดังกล่าวจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.2 ส่วนผลการทดสอบชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และผลการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.3

### 6.2 การสร้างระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบ ขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

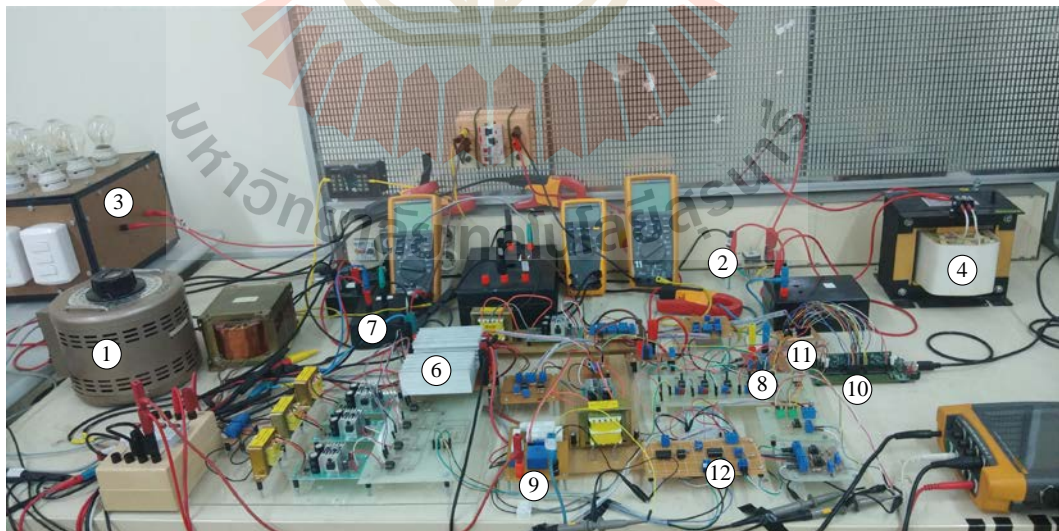
จากระบบกำจัดฮาร์มอนิกที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 9 (ระบบรูปที่ 5.9) สามารถนำมาเขียนใหม่โดยพิจารณาแจกแจงการสร้างเป็นระบบฮาร์ดแวร์สำหรับการทดสอบจริงในทางปฏิบัติแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 โดยในส่วนของค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง หรือค่า  $V_{DC}^*$  จะกำหนดเปลี่ยนแปลงจากค่าเดิม 150 V เป็นเท่ากับ 105 V แทน ทั้งนี้เพื่อลดพิกัดของวงจรรอกกำลังแอกทีฟให้สามารถรองรับกับพิกัดอุปกรณ์แหล่งจ่ายที่มีในห้องปฏิบัติการได้ อย่างไรก็ตาม ค่าแรงดันใหม่นี้ยังคงเพียงพอต่อการชดเชยกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกได้เช่นกัน ซึ่งสามารถดูได้จากผลการทดสอบในหัวข้อที่ 6.3 (สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ยังคงใช้เหมือนเดิมตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 5) การสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการสร้างด้วยบอร์ด DSP รุ่น TMS320F2833 Experimental Kit ดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่พีพิจำรณาสร้างเป็นระบบฮาร์ดแวร์



รูปที่ 6.2 การควบคุมภายในบอร์ด TMS32028335 Experimental Kit

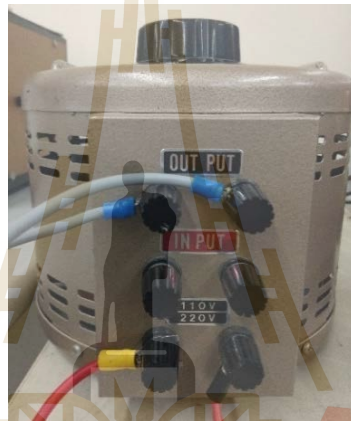


- ① Single-phase Transformer ② Rectifier ③ Resistor  $R_L$  ④ Inductor  $L_L$  ⑤ Capacitor  $C_{DC}$  ⑥ IGBT Module ⑦ Inductor  $L_f$
- ⑧ Current sensor ⑨ Voltage sensor ⑩ TMS320F2833 Experimental Kit Broad ⑪ DAC ⑫ Hysteresis controller

รูปที่ 6.3 ระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน  
ในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

ผลการดำเนินงานสร้างฮาร์ดแวร์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในรูปที่ 6.1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.3 ซึ่งจากระบบดังกล่าว จะสามารถแบ่งส่วนประกอบอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่สำคัญที่นำมาใช้สร้างระบบได้ทั้งหมด 12 ชุดอุปกรณ์หลัก ๆ อธิบายได้ดังนี้

**อุปกรณ์ที่ 1** หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ (Single-phase variable voltage transformer) รุ่น TSB-10M ของบริษัทผู้ผลิต VOLTAC ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตเป็น 110 V และ 220 V ความถี่ 50 ถึง 60 Hz ส่วนด้านเอาต์พุตสามารถปรับใช้งานได้ในช่วงแรงดัน 0 ถึง 260 V กระแสไฟฟ้าสูงสุด 10 A โดยหม้อแปลงนี้จะถูกใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟสสำหรับระบบที่พิจารณา ซึ่งมีพิกัดแรงดัน  $V_s$  เท่ากับ  $100 V_{rms}$  และความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz สำหรับลักษณะรูปร่างของหม้อแปลงดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 หม้อแปลงหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ รุ่น TSB-10M

**อุปกรณ์ที่ 2** วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ (Single-phase bridge rectifier) รุ่น GBPPC3510 ของบริษัทผู้ผลิต SEP ELECTRONIC CORP โดยมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1000 V และพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 35 A ทำหน้าที่เป็นโหนดวงจรเรียงกระแสของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา (โหนดที่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า) โดยลักษณะรูปร่างของอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถดูได้จากรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ รุ่น GBPPC3510

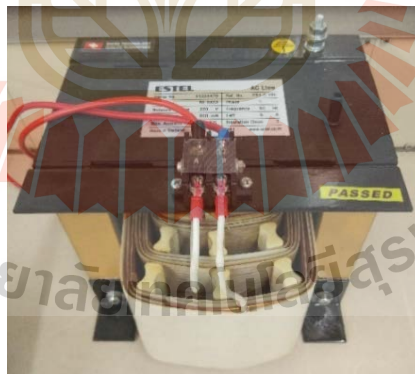


**อุปกรณ์ที่ 3** โหลดตัวต้านทาน  $R_L$  (Resistor  $R_L$ ) ขนาดเท่ากับ  $25 \Omega$  ของวงจรเรียงกระแส จะใช้ชุดโหลดหลอดไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในรูปที่ 6.6 (ทำหน้าที่เสมือนเป็นโหลดตัวต้านทาน)



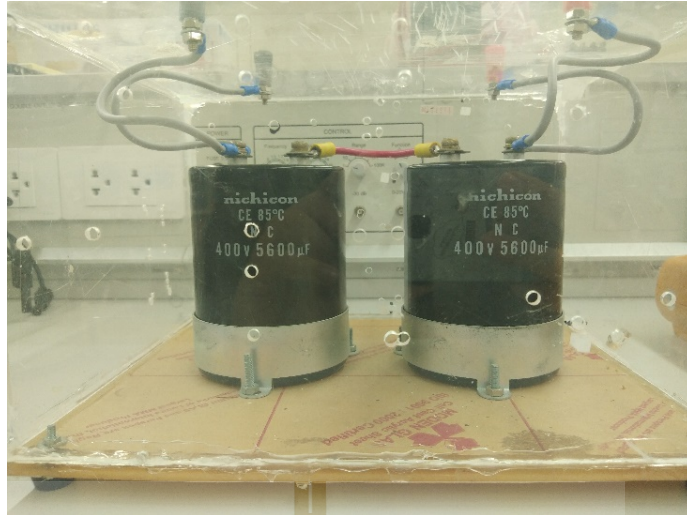
รูปที่ 6.6 ชุดโหลดหลอดไฟฟ้ากระแสตรง (โหลด  $R_L$ )

**อุปกรณ์ที่ 4** ตัวเหนี่ยวนำ  $L_L$  (Inductor  $L_L$ ) ขนาด  $0.3 \text{ H}$  พิกัดแรงดันไฟฟ้า  $220 \text{ V}$  และพิกัดกระแสไฟฟ้า  $5 \text{ A}$  ความถี่  $50 \text{ Hz}$  ของบริษัทผู้ผลิต ESTEL ใช้เป็นโหลดตัวเหนี่ยวนำของวงจรเรียงกระแส โดยมีลักษณะรูปร่างดังรูปที่ 6.7



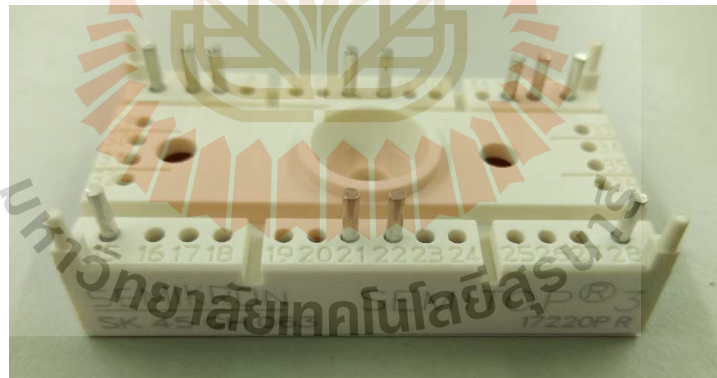
รูปที่ 6.7 โหลดตัวเหนี่ยวนำ  $L_L$  ขนาด  $0.3 \text{ H}$

**อุปกรณ์ที่ 5** ตัวเก็บประจุ  $C_{DC}$  (Capacitor  $C_{DC}$ ) ขนาดความจุไฟฟ้าเท่ากับ  $2800 \mu\text{F}$  โดยใช้ตัวเก็บประจุพิกัดขนาด  $400 \text{ V } 5600 \mu\text{F}$  จำนวนสองตัวต่อแบบอนุกรมกันดังแสดงในรูปที่ 6 ตัวเก็บประจุนี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานฝั่งกระแสตรงให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 6.8 ตัวเก็บประจุ  $C_{DC}$  ความจุไฟฟ้า 2800  $\mu\text{F}$

**อุปกรณ์ที่ 6** ไอจีบีทีโมดูล (IGBT Module) รุ่น SK45GH063 ของบริษัทผู้ผลิต Semikron มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 600 V และพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 45 A ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับฉีดกระแสชดเชยกำลังฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า สำหรับลักษณะรูปร่างของไอจีบีทีโมดูลดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 ไอจีบีทีโมดูล รุ่น SK45GH063

**อุปกรณ์ที่ 7** ตัวเหนี่ยวนำ  $L_f$  (Inductor  $L_f$ ) ขนาดเท่ากับ 1.5 mH พิกัดกระแสไฟฟ้า 10 A (ใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 3 mH จำนวนสองตัวต่อขนานกัน) ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งรูปร่างของอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 ตัวเหนี่ยวนำ  $L_f$  ขนาด 3 mH

**อุปกรณ์ที่ 8** ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า (Current sensor) รุ่น HX10-P ของบริษัท LEM มีช่วงการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ 0 ถึง 10 A<sub>rms</sub> ทำหน้าที่ตรวจวัดค่ากระแสโหลด หรือค่า  $i_L$  ของระบบไฟฟ้า และป้อนค่ามายังบอร์ด TMS320F28333 Experimental Kit เพื่อใช้ในการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกตามวิธี SWFA และใช้ตรวจวัดค่ากระแสชดเชย หรือค่า  $i_c$  เพื่อป้อนกลับในการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีลักษณะรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 6.11



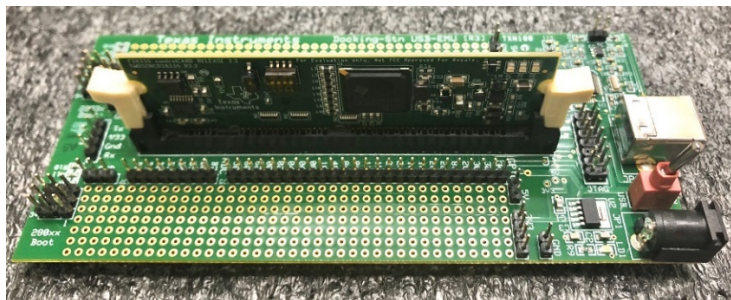
รูปที่ 6.11 ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟารุ่น HX10-P



รูปที่ 6.12 ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟารุ่น LV25-P

**อุปกรณ์ที่ 9** ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟ้า (Voltage sensor) รุ่น LV25-P ของบริษัท LEM มีช่วงการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่ 10 ถึง 500 V มีลักษณะรูปร่างของอุปกรณ์ดังรูปที่ 6.12 โดยจะทำหน้าที่ตรวจวัดค่าแรงดันบัสไฟตรง หรือค่า  $V_{DC}$  ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_{DC}$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ สำหรับใช้เป็นอินพุตให้กับระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอที่คำนวณอยู่บนบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit นอกจากนี้ ยังใช้ตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่แหล่งจ่าย ( $V_s$ ) เพื่อใช้เป็นมุมเฟสอ้างอิงในส่วนของ การควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง

**อุปกรณ์ที่ 10** บอร์ด DSP รุ่น TMS320F2833 Experimental Kit (TMS320F2833 Experimental Kit Broad) ของบริษัทผู้ผลิต Texas Instrument ใช้สำหรับสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงหรือค่า  $V_{DC}$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ บอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit มีโครงสร้างสถาปัตยกรรมแสดงดังรูปที่ 6.13 โดยมีความเร็วในการประมวลผลของซีพียู 150 MHz และมีความละเอียดในการคำนวณ 32 บิต มีพอร์ตเชื่อมต่อสัญญาณแอนะล็อกจำนวน 2 พอร์ต (Port) พอร์ตละ 8 พิน (Pin) คือ ADC A0-A7 และ ADC B0-B7 ซึ่งพินเหล่านี้สามารถแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital converter: ADC) ที่มีความละเอียด 12 บิตได้ภายในตัวบอร์ด นอกจากนี้ ยังมีพินสำหรับใช้เชื่อมต่อภายนอกที่สามารถกำหนดเป็นอินพุตหรือเอาต์พุต (GPIO) ได้ทั้งหมด 47 พิน (จากจำนวนพินทั้งหมด 88 พิน โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มพอร์ต คือ GPA 00-31 GPB 32-63 และ GPC 64-87) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละพินได้แสดงไว้ดังตารางที่ 6.1 อย่างไรก็ตาม สำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้พิน ADC A0-A2 สำหรับรับสัญญาณแอนะล็อกของกระแส  $i_L$  แรงดัน  $V_s$  และแรงดัน  $V_{DC}$  ตามลำดับ เพื่อนำไปคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และการควบคุมแรงดันค่า  $V_{DC}$  ด้วยตัวควบคุมพีไอ จากนั้นจะส่งรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง หรือค่า  $i_c^*$  ออกผ่านพินเอาต์พุตร่วมกับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (อุปกรณ์ที่ 11) เพื่อส่งต่อไปยังระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีสต่อไป (รายละเอียดการสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit สามารถดูได้ในหัวข้อที่ 6.2.1)



รูปที่ 6.13 บอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit

ตารางที่ 6.1 รายละเอียดแต่ละพินของบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit

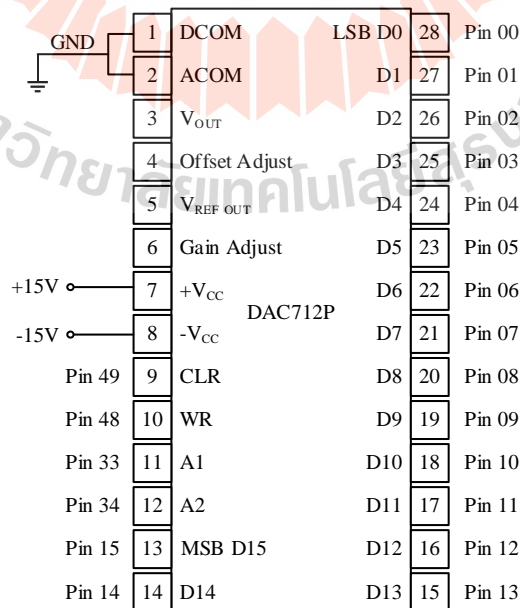
Pin	Signal	Pin	Signal
00	GPIO0 / EPWM1A	24	GPIO24 / ECAP1 / EQEP2A / MDXB
01	GPIO1 / EPWM1B / ECAP6 / MFSRB	25	GPIO25 / ECAP2 / EQEP2B / MDRB
02	GPIO2 / EPWM2A	26	GPIO26 / ECAP3 / EQEP2I / MCLKXB
03	GPIO3 / EPWM2B / ECAP5 / MCLKRB	27	GPIO27 / ECAP4 / EQEP2S / MFSXB
04	GPIO4 / EPWM3A	28	GPIO28 / SCIRXDA / XZCS6
05	GPIO5 / EPWM3B / MFSRA / ECAP1	29	GPIO29 / SCITXDA / XA19
06	GPIO6 / EPWM4A / EPWMSYNCI / EPWMSYNCO	30	GPIO30 / CANRXA / XA18
07	GPIO7 / EPWM4B / MCLKRA / ECAP2	31	GPIO31 / CANTXA / XA17
08	GPIO8 / EPWM5A / CANTXB / ADCSOCAO	32	GPIO32 / SDAA / EPWMSYNCI / ADCSOCAO
09	GPIO9 / EPWM5B / SCITXDB / ECAP3	33	GPIO33 / SCLA / EPWMSYNCO / ADCSOCBO
10	GPIO10 / EPWM6A / CANRXB / ADCSOCBO	34	GPIO34 / ECAP1 / XREADY
11	GPIO11 / EPWM6B / SCIRXDB / ECAP4	48	GPIO48 / ECAP5 / XD31
12	GPIO12 / TZ1 / CANTXB / MDXB	49	GPIO49 / ECAP6 / XD30
13	GPIO13 / TZ2 / CANRXB / MDRB	58	GPIO58 / MCLKRA / XD21
14	GPIO14 / TZ3 / XHOLD / SCITXDB / MCLKXB	59	GPIO59 / MFSRA / XD20
15	GPIO15 / TZ4 / XHOLDA / SCIRXDB / MFSXB	60	GPIO60 / MCLKRB / XD19
16	GPIO16 / SPISIMOA / CANTXB / TZ5	61	GPIO61 / MFSRB / XD18
17	GPIO17 / SPISOMIA / CANRXB / TZ6	62	GPIO62 / SCIRXDC / XD17
18	GPIO18 / SPICLKA / SCITXDB / CANRXA	63	GPIO63 / SCITXDC / XD16
19	GPIO19 / SPISTEA / SCIRXDB / CANTXA	84	GPIO84 / XA12
20	GPIO20 / EQEP1A / MDXA / CANTXB	85	GPIO85 / XA13
21	GPIO21 / EQEP1B / MDRA / CANRXB	86	GPIO86 / XA14
22	GPIO22 / EQEP1S / MCLKXA / SCITXDB	87	GPIO87 / XA15
23	GPIO23 / EQEP1I / MFSXA / SCIRXDB		

**อุปกรณ์ที่ 11** ไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (Digital to Analog Converter: DAC) เบอร์ DAC712P ของบริษัทผู้ผลิต Burr Brown มีความละเอียด 16 บิต โดยจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลดิจิทัลของกระแส  $i_c^*$  ที่ได้จากการคำนวณด้วยบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit เป็นสัญญาณแบบแอนะล็อกเพื่อส่งต่อไปยังระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส สำหรับลักษณะรูปร่างของไอซี DAC712P แสดงได้ดังรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 ไอซี DAC เบอร์ DAC712P

การเชื่อมต่อไอซี DAC712P กับพินของบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.15 โดยขั้นตอนการสั่งการทำงานของไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกสามารถทำได้โดยการใช้คำสั่งดิจิทัลเวิร์ด 4 บิต มีลำดับขั้นตอนดังแสดงในตารางที่ 6.2 โดยขั้นตอนที่ 1 คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับไอซี DAC712P ขั้นตอนที่ 2 เป็นการโหลดข้อมูลกระแส  $i_c^*$  ขนาด 16 บิต ขั้นตอนที่ 3 คือ การบ่งบอกถึงการสิ้นสุดการโหลดข้อมูล ขั้นตอนที่ 4 ถึง 6 คือ ขั้นตอนสำหรับการโหลดอินพุตแลตช์ (load input lach) และขั้นตอนที่ 7 ถึง 9 คือ การโหลดดีทิวเอแลตช์ (load D/A lach) ของไอซี DAC712P

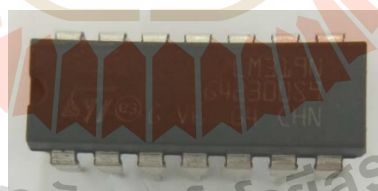


รูปที่ 6.15 การเชื่อมต่อไอซี DAC712P กับพินของบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit

ตารางที่ 6.2 ขั้นตอนการสั่งการควบคุมสำหรับไอซี DAC712P

ขั้นตอนการสั่งการควบคุม ของไอซี DAC712P	Pin 49	Pin 48	Pin 34	Pin 33
ขั้นที่ 1	1	1	1	1
ขั้นที่ 2	โหลดข้อมูลกระแส $i_c^*$ ผ่านพิน 00 ถึงพิน 15			
ขั้นที่ 3	1	1	1	1
ขั้นที่ 4	1	1	1	0
ขั้นที่ 5	1	0	1	0
ขั้นที่ 6	1	1	1	0
ขั้นที่ 7	1	1	0	1
ขั้นที่ 8	1	0	0	1
ขั้นที่ 9	1	1	0	1

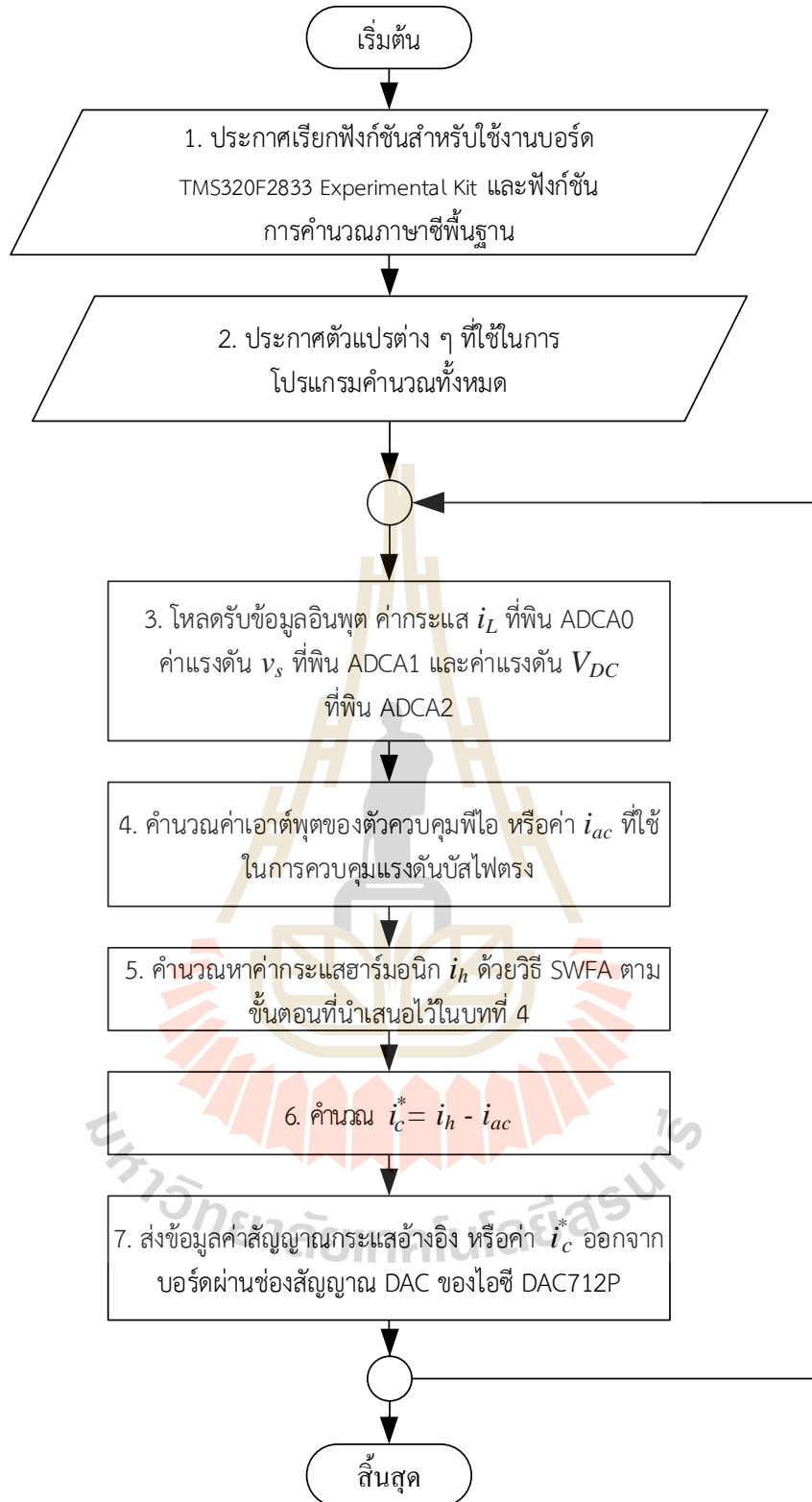
อุปกรณ์ที่ 12 ตัวควบคุมฮิสเตอรีซิส (Hysteresis controller) สร้างด้วยไอซี เปรียบเทียบชนิดมีแถบฮิสเตอรีซิส (Hysteresis comparator) เบอร์ LM319N ของบริษัทผู้ผลิต STMicroelectronics โดยสามารถดูลักษณะรูปร่างของไอซีดังกล่าวได้จากรูปที่ 6.16 และสามารถดูการอธิบายการสร้างระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอรีซิสได้จากหัวข้อที่ 6.2.2



รูปที่ 6.16 ไอซี Hysteresis comparator เบอร์ LM319N

### 6.2.1 การสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และการควบคุมค่าแรงดัน บัลไฟตรงบนบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้บอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit สำหรับสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และระบบควบคุมค่า  $V_{DC}$  ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอดังแสดงในรูปที่ 6.2 โดยการโปรแกรมเพื่อสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และระบบควบคุมค่า  $V_{DC}$  ดังกล่าว สามารถสรุปเป็นแผนภาพการคำนวณได้ดังรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 แผนภาพการโปรแกรมชุดตรวจจับสนิทด้วยวิธี SWFA และระบบควบคุมค่า  $V_{DC}$  ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ



จากรูปที่ 6.17 สามารถอธิบายการโปรแกรมในแต่ละส่วนได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 คือ การประกาศเรียกฟังก์ชันการใช้งานบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit และฟังก์ชันการคำนวณทางคณิตศาสตร์พื้นฐานของภาษาซี รวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของฟังก์ชัน เช่น ฟังก์ชัน ADC เป็นต้น

ส่วนที่ 2 คือ การกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณตามวิธี SWFA และระบบควบคุมค่า  $V_{DC}$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ส่วนที่ 3 คือ การโหลดรับข้อมูลอินพุตที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งได้แก่ ค่ากระแส  $i_L$  ที่พิน ADCA0 ค่าแรงดัน  $v_s$  ที่พิน ADCA1 และค่าแรงดัน  $V_{DC}$  ที่พิน ADCA2

ส่วนที่ 4 คือ การคำนวณค่าเอาต์พุต  $i_{ac}$  ของตัวควบคุมพีไอซึ่งมีค่า  $K_p = 0.124$   $K_I = 2.763$  ที่ใช้สำหรับการควบคุมค่า  $V_{DC}$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (การควบคุมค่า  $V_{DC}$  ด้วยตัวควบคุมพีไอ)

ส่วนที่ 5 คือ การคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิก  $i_h$  ตามขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ซึ่งนำเสนอไว้แล้วในหัวข้อ 4.2 บทที่ 4

ส่วนที่ 6 คือ การคำนวณค่ากระแส  $i_c^*$  จากค่ากระแสฮาร์มอนิกและค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอที่ใช้ควบคุมค่าแรงดัน  $V_{DC}$  ด้วยสมการ  $i_c^* = i_h - i_{ac}$

ส่วนที่ 7 คือ การส่งค่ากระแส  $i_c^*$  ออกจากบอร์ด ผ่านช่องสัญญาณ DAC ของไอซี DAC712P (ตามขั้นตอนในตารางที่ 6.2) เพื่อนำไปใช้เป็นกระแสอ้างอิงสำหรับการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสต่อไป

สำหรับรายละเอียดโค้ดโปรแกรมภาษาซีพร้อมคำอธิบายของโปรแกรมในรูปที่ 6.19 สามารถดูได้จากภาคผนวก ก.

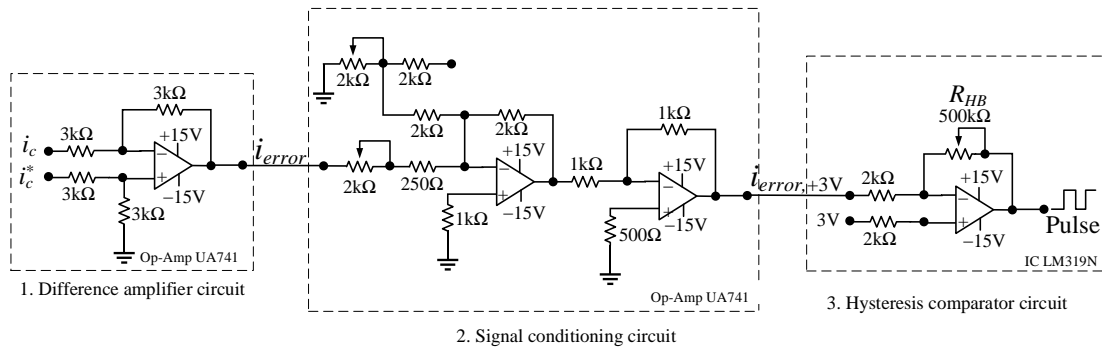
### 6.2.2 การสร้างวงจรควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสแบบแอนะล็อก

การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสในงานวิจัยนี้จะสร้างเป็นวงจรแอนะล็อกซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.18 โครงสร้างของวงจรประกอบด้วย

ส่วนที่ 1 วงจรขยายผลต่าง (Difference amplifier circuit) ที่สร้างด้วยไอซี ออปแอมป์เบอร์ UA741 ทำหน้าที่หากลบสัญญาณระหว่าง  $i_c^*$  และ  $i_c$  ( $i_c^* - i_c$ )

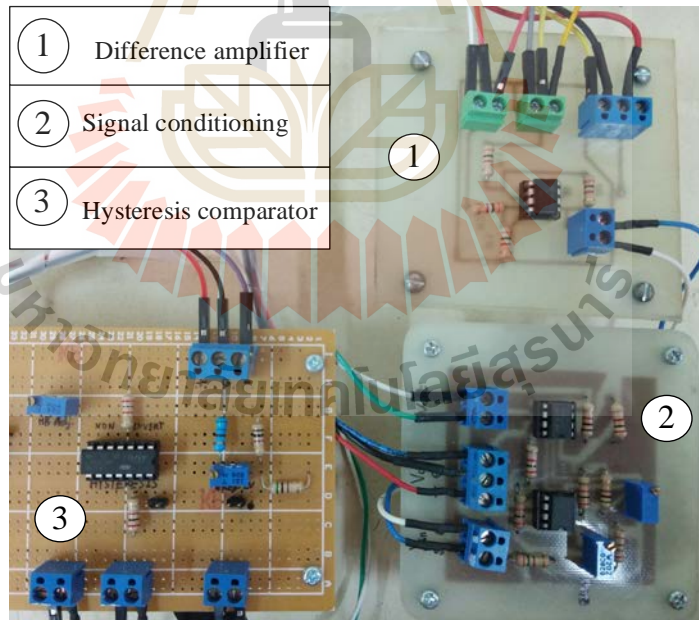
ส่วนที่ 2 วงจรปรับแต่งสัญญาณ (Signal conditioning circuit) ที่สร้างด้วยไอซี ออปแอมป์ (Op-Amp) เบอร์ UA741 ทำหน้าที่ปรับแต่งยกสัญญาณค่าความผิดพลาด  $i_{error}$  (offset) ให้มีค่าเหมาะสมก่อนเข้าวงจรเปรียบเทียบสัญญาณแบบฮีสเทอรีซิส

ส่วนที่ 3 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณแบบฮีสเทอรีซิส (Hysteresis comparator circuit) ที่สร้างด้วยไอซีเบอร์ LM319N โดยวงจรดังกล่าวจะสามารถกำหนดค่าแถบฮีสเทอรีซิสหรือค่า  $HB$  ได้จากการปรับที่ตัวต้านทาน  $R_{HB}$  ดังที่ปรากฏในรูปวงจร

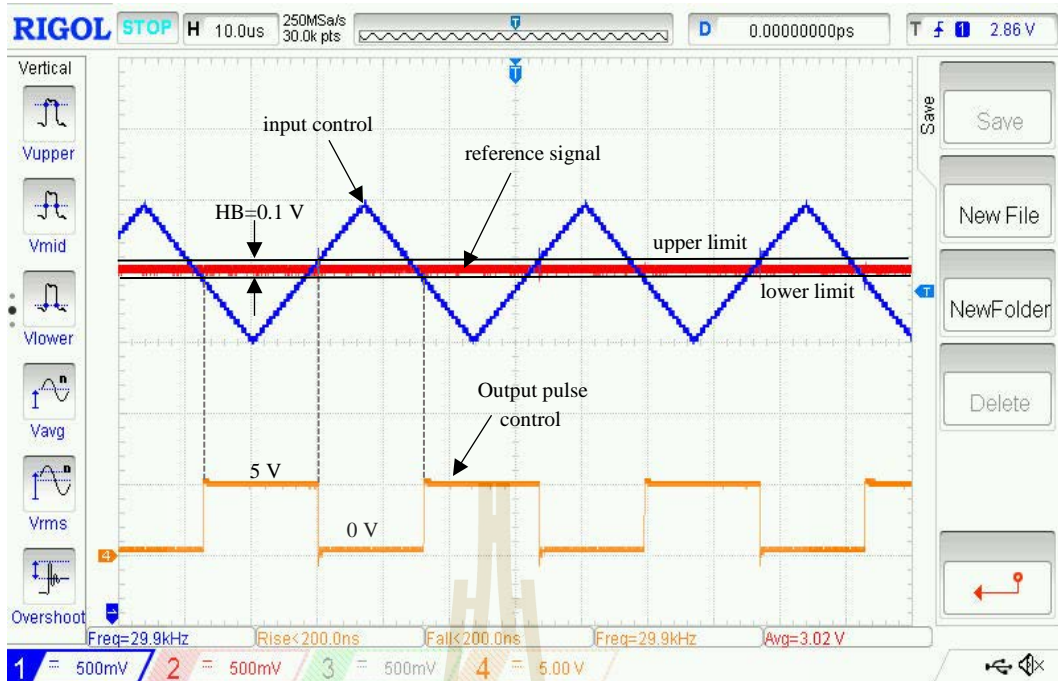


รูปที่ 6.18 วงจรควบคุมกระแสชดเชยด้วยฮีสเทอรีซิส

จากวงจรในรูปที่ 6.18 เมื่อดำเนินการสร้างวงจรจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.19 โดยผลการทดสอบการควบคุมที่ค่า  $HB$  เท่ากับ 0.1 V ที่ความถี่สวิตช์เท่ากับ 30 kHz โดยมีสัญญาณอ้างอิง (reference signal) เป็นค่าคงที่ที่สามารถดูได้จากรูปที่ 6.20 (เนื่องจากการควบคุมจะอยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันทั้งหมด ดังนั้น ความหมายของ  $HB$  เท่ากับ 0.1 V ในที่นี้จะหมายถึง 0.1 A ตามทฤษฎีการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5)



รูปที่ 6.19 วงจรควบคุมกระแสชดเชยด้วยฮีสเทอรีซิสแบบแอนาล็อก



รูปที่ 6.20 ผลการทดสอบวงจรควบคุมกระแสชดเชยด้วยฮีสเทอรีซิส

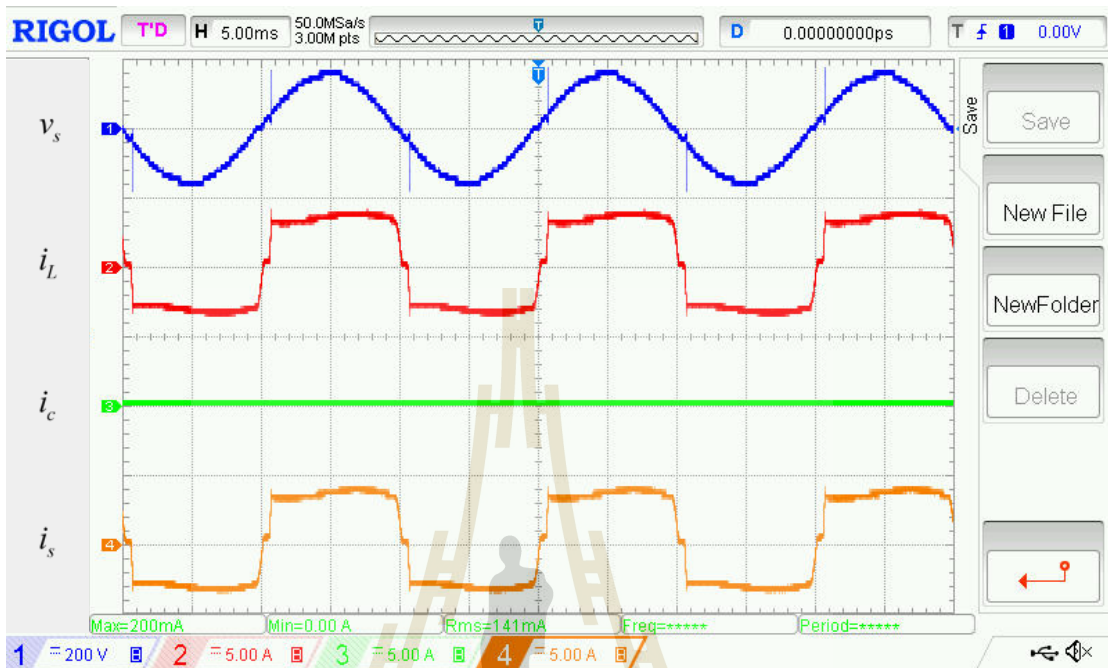
จากการอธิบายการสร้างระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสดังกล่าวมาทั้งหมดในหัวข้อนี้ ผลการทดสอบชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้น สามารถดูได้ในหัวข้อที่ 6.3

### 6.3 การทดสอบระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

#### 6.3.1 การทดสอบระบบกำจัดฮาร์มอนิกกรณีไม่มีการชดเชย

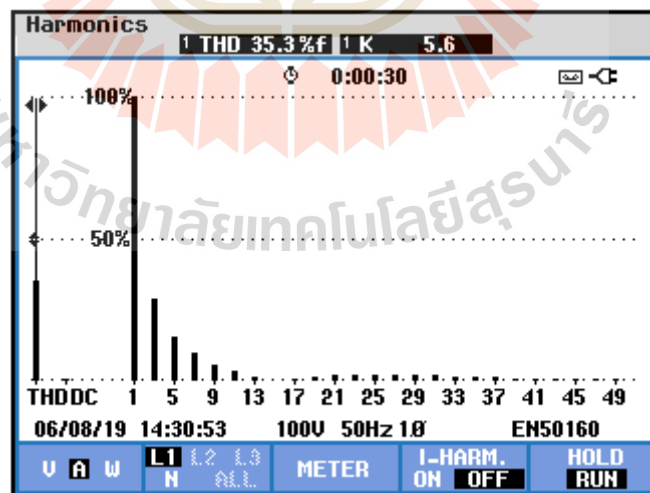
จากระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่สร้างขึ้นในรูปที่ 6.3 เมื่อทำการทดสอบระบบในกรณีที่ยังไม่มีการชดเชย (ยังไม่มีการชดเชยกระแสชดเชย ( $i_c = 0$  A) สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 6.21 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่าแรงดันที่แหล่งจ่าย ( $v_s$ ) ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นรูปไซน์ที่ขนาด  $100 V_{rms}$  ความถี่ 50 Hz ในขณะที่ลักษณะรูปสัญญาณของกระแสโหลด ( $i_L$ ) และกระแสที่แหล่งจ่าย ( $i_s$ ) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์เหมือนกันทุกประการ ซึ่งเมื่อนำกระแส  $i_s$  ดังกล่าวไปวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อแสดงปริมาณฮาร์มอนิกในอันดับต่าง ๆ จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.22 จากรูปดังกล่าว พบว่า ปริมาณฮาร์มอนิกที่ปรากฏอย่างเด่นชัดประกอบด้วยฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 5 7 9 และ 11 โดยค่า %THD<sub>i</sub> ของกระแส  $i_s$  ก่อนมีการชดเชยนี้ มีค่าสูงเท่ากับ 35.3%

หมายเหตุ: การตรวจวัดค่า %THD, สำหรับการทดสอบทางปฏิบัติ ในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องมือวัด Fluke รุ่น 434 ซึ่งจะแสดงผลทั้งรูปกราฟสเปกตรัม พร้อมผลค่า %THD, ของรูปสัญญาณที่ทำการตรวจวัด



$v_s$  [V/div=200 V, T/div=5 ms] and  $i_L, i_c, i_s$  [A/div=5 A, T/div=5 ms]

รูปที่ 6.21 ผลการทดสอบระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีไม่มีการชดเชย



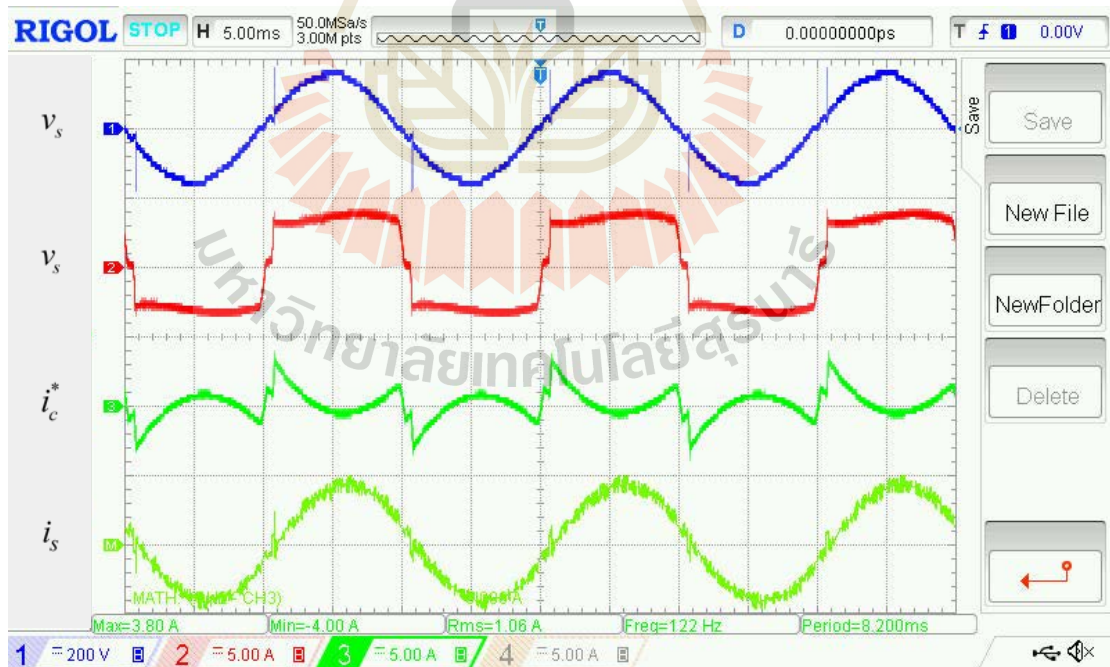
รูปที่ 6.22 สเปกตรัมของกระแส  $i_s$  กรณีไม่มีการชดเชย

### 6.3.2 การทดสอบระบบกำจัดฮาร์มอนิกกรณีมีการชดเชย

สำหรับการทดสอบระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสในกรณีที่มีการชดเชย (มีการฉีดกระแสชดเชย) ในที่นี้ จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ที่คำนวณด้วยบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit และการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

การทดสอบความถูกต้องของการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA บนบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit

การทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ในทางปฏิบัติ สามารถทำได้โดยการนำรูปสัญญาณเอาต์พุตกระแสอ้างอิง ( $i_c^*$ ) ที่ได้จากการคำนวณบนบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit มาหักลบกับรูปสัญญาณกระแส  $i_L$  โดยการใช้ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ของออสซิลโลสโคป ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงถึงลักษณะรูปสัญญาณของกระแส  $i_s$  ภายหลังจากการชดเชย ( $i_s = i_L - i_c^*$ ) โดยถ้าการคำนวณกระแส  $i_c^*$  มีความถูกต้อง ผลลัพธ์ของกระแส  $i_s$  ที่ได้จะต้องมีลักษณะเป็นรูปไซน์ ผลการทดสอบการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA บนบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit ด้วยวิธีการดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.23



$v_s$  [V/div=200 V, T/div=5 ms] and  $i_L, i_c, i_s$  [A/div=5 A, T/div=5 ms]

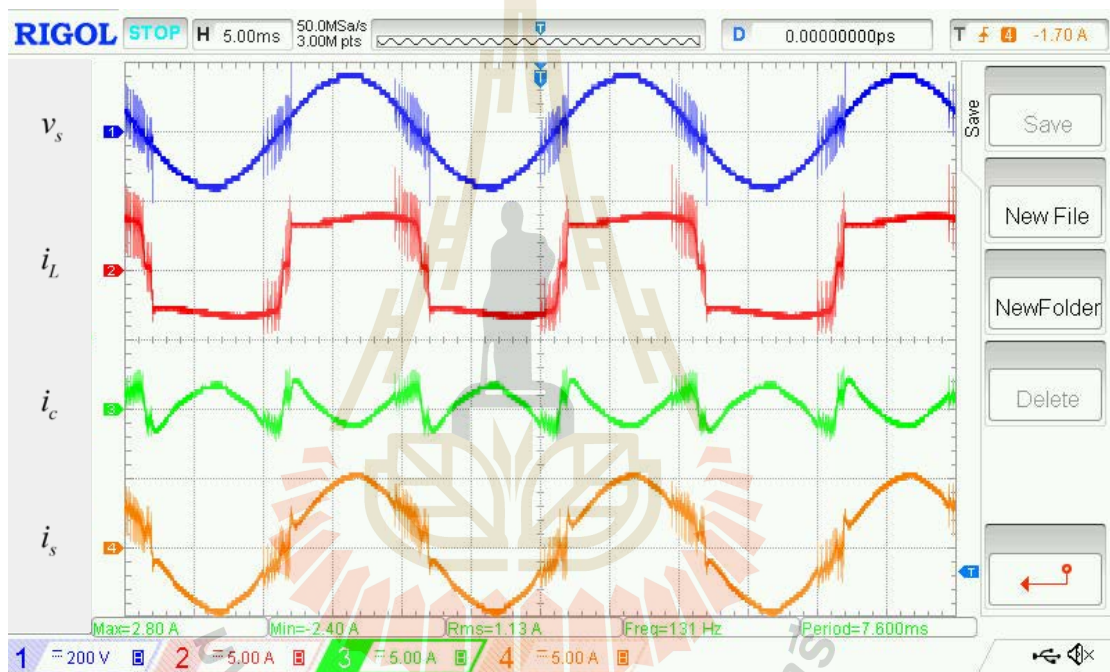
รูปที่ 6.23 ผลการทดสอบความถูกต้องของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA บนบอร์ด

TMS320F2833 Experimental Kit

จากรูปที่ 6.23 สังเกตได้ว่า กระแส  $i_s$  ที่ได้จากการดำเนินการหักกลับด้วยฟังก์ชันบนออสซิลโลสโคปมีลักษณะเป็นรูปไซน์ ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่า การคำนวณกระแส  $i_c^*$  ด้วยวิธี SWFA บนบอร์ด TMS320F28333 Experimental Kit มีความถูกต้อง ดังนั้น กระแส  $i_c^*$  นี้จึงสามารถนำไปใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟเพื่อฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบต่อไปได้

#### การทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากระบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ 6.3 ผลการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสกรณีมีการชดเชย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.24 และผลสเปกตรัมของกระแส  $i_s$  ภายหลังจากการชดเชยสามารถแสดงดังรูปที่ 6.25

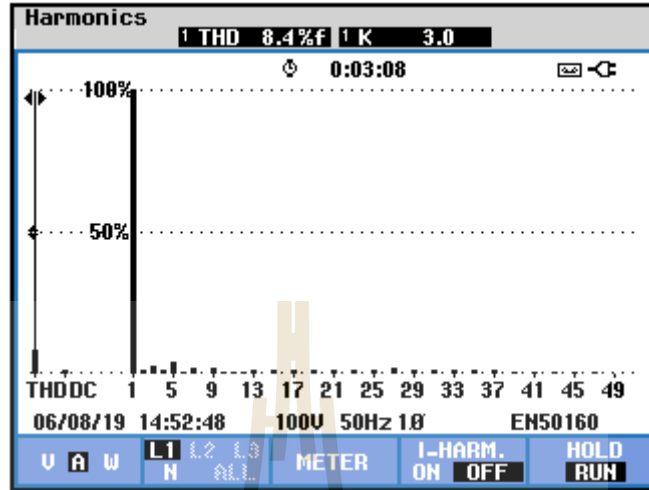


$v_s$  [V/div=200 V, T/div=5 ms] and  $i_L, i_c, i_s$  [A/div=5 A, T/div=5 ms]

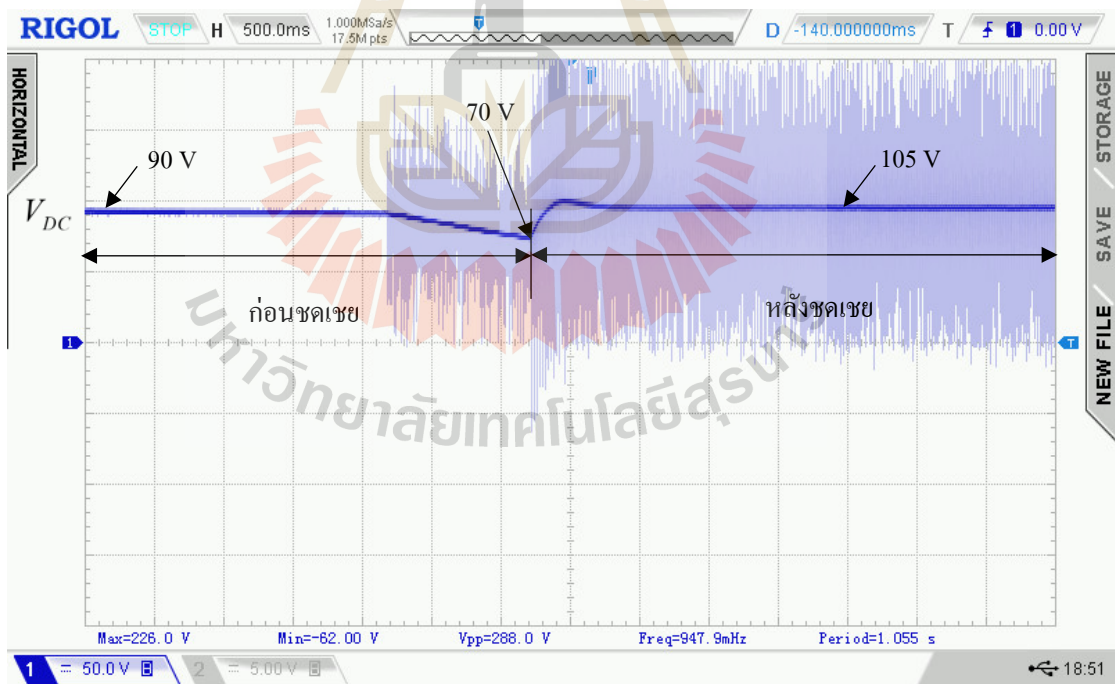
รูปที่ 6.24 ผลการทดสอบระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีมีการชดเชย

จากรูปที่ 6.24 สังเกตได้ว่า วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้ชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ร่วมกับวงจรควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส ( $HB=0.1$  A) ที่สร้างขึ้นมีสมรรถนะการทำงานที่ดีสามารถกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการฉีดกระแสชดเชย  $i_c$  ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟสามารถส่งผลให้กระแส  $i_s$  ภายหลังจากการชดเชยกลับมา มีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น และวัดค่า %THD<sub>i</sub> ของกระแส  $i_s$  ดังกล่าวได้เท่ากับ 8.4% (สามารถดูได้จากรูปที่ 6.25) ซึ่งมีค่าลดลงจากกรณีก่อนมีการชดเชยถึง 26.9% (%THD<sub>i</sub> ของกระแส  $i_s$  ก่อนมีการชดเชยมีค่าเท่ากับ 35.3%) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาปริมาณฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับดัง

ปรากฏในสเปกตรัมรูปที่ 6.25 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 5 7 9 และ 11 มีปริมาณลดน้อยลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการชดเชยในรูปที่ 6.22



รูปที่ 6.25 สเปกตรัมของกระแส  $i_s$  กรณีมีการชดเชย



$V_{DC}$  [V/div=50 V, T/div=500 ms]

รูปที่ 6.26 ผลการทดสอบค่า  $V_{DC}$  ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

สำหรับผลการทดสอบการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง ( $V_{DC}$ ) ของวงจรรอกกำลัง แยกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้จากการออกแบบ ( $K_p=0.124$ ,  $K_I=2.763$ ) สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 6.26 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ในช่วงก่อนการชดเชยแรงดัน  $V_{DC}$  มีค่า 90 V จากการ ชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_{DC}$  ไว้ในตอนเริ่มต้น และจะค่อย ๆ มีค่าตกลงจนถึง 70 V เมื่อเวลาผ่านไป หลังจากนั้นเมื่อทำการเปิดสวิตช์เบรกเกอร์ของวงจรรอกกำลังแยกทีฟเพื่อฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ ระบบไฟฟ้า จะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมพีไอที่สร้างอยู่บนบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit สามารถควบคุมแรงดัน  $V_{DC}$  ให้มีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าเท่ากับ 105 V ตามค่าแรงดันอ้างอิง ( $V_{DC}^*$ ) ที่ ต้องการได้ โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 500 ms

#### 6.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการสร้างระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแยกทีฟ แบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสเพื่อการทดสอบจริงในทางปฏิบัติ โดยผลการทดสอบระบบ ฮาร์ดแวร์ดังกล่าว พบว่า วงจรรอกกำลังแยกทีฟที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA การ ควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส และการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ ที่สร้างขึ้นตามการออกแบบไว้ในบทที่ 5 สามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้ อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีปริมาณฮาร์มอนิกลดลงที่ค่า %THD<sub>i</sub> เท่ากับ 8.4% ในขณะที่ก่อนมีการชดเชยค่า %THD<sub>i</sub> ของกระแสดังกล่าวมีค่าสูงถึง 35.3%



## บทที่ 7

### บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยเริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้าน การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งพบว่า การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การตรวจจับฮาร์มอนิก การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งรายละเอียดการค้นคว้าและศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

ในการกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความรู้ความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และเลือกใช้วิธีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับฮาร์มอนิก ได้อย่างถูกต้องเหมาะสม ในบทที่ 3 จึงนำเสนอความรู้เบื้องต้น ที่ประกอบด้วย นิยามของฮาร์มอนิก ประเภทของฮาร์มอนิก แหล่งกำเนิดของฮาร์มอนิก ผลกระทบของฮาร์มอนิก วิธีการกำจัดฮาร์มอนิก และมาตรฐานเกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก

เนื่องจากการตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานถือเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้การกำจัดฮาร์มอนิกทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากการตรวจจับฮาร์มอนิกมีข้อผิดพลาด ไม่ถูกต้อง จะส่งผลให้การควบคุมกระแสชดเชยเกิดข้อผิดพลาดด้วยเช่นกัน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (SWFA) ซึ่งในบทที่ 4 ได้มีการอธิบายขั้นตอนของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และมีการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีดังกล่าวเปรียบเทียบกับวิธี PQ และวิธี SRF ด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม Simulink/MATLAB ซึ่งพบว่า วิธี SWFA สามารถทำการตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องแม่นยำกว่าวิธี PQ และวิธี SRF

สำหรับในบทที่ 5 ได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างและวิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิส และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ อีกทั้งยังทดสอบสมรรถนะการทำงานของตัวควบคุมกระแสชดเชยและตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ได้ออกแบบด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า ตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ได้เป็นอย่างดี และตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าคงที่ตามค่าแรงดันอ้างอิงได้ จึงส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถชดเชยกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปสัญญาณของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลัง

การชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยค่า %THD<sub>i</sub> ของกระแสดังกล่าวมีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 2.90% จากก่อนมีการชดเชยที่มีค่าสูงถึง 34.65%

ในบทที่ 6 เป็นการนำเสนอการสร้างระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลัง แยกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 5 เพื่อการทดสอบจริงในทางปฏิบัติ โดยการสร้างฮาร์ดแวร์ดังกล่าว ในส่วนของชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ใช้การคำนวณทางดิจิทัลด้วยบอร์ด DSP รุ่น TMS320F2833 Experimental Kit ส่วนการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีสได้ดำเนินการสร้างเป็นวงจรแบบ แอนะล็อก โดยผลการทดสอบระบบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้น พบว่า วงจรกรองกำลังแยกทีฟร่วมกับการ ควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีสสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบ ไฟฟ้าจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรูปสัญญาณของกระแสที่แหล่งจ่ายของระบบมีลักษณะเป็นรูปไซน์ เพิ่มมากขึ้น และค่า %THD<sub>i</sub> ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 8.4% จาก ก่อนการชดเชยที่มีค่าเท่ากับ 35.3% นอกจากนี้ ในส่วนของการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง พบว่า ตัว ควบคุมพีไอที่สร้างขึ้นบนบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit สามารถควบคุมให้แรงดันบัส ไฟตรงมีค่าตามแรงดันอ้างอิงได้ด้วยเช่นกัน



## รายการอ้างอิง

- [1] A. Hiranandani, (1998), "Calculation of cable ampacities including the effects of harmonics", IEEE Industry Applications Magazine, vol. 4, no. 2, pp. 42–51.
- [2] V. E. Wagner et al., (1993), "Effects of harmonics on equipment", IEEE Transactions on Power Delivery", vol. 8, no. 2, pp. 672–680.
- [3] R. D. Henderson and P. J. Rose, (1994), "Harmonics :the effects on power quality and transformers" , IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 3, pp. 528–532.
- [4] D. E. Rice, (1986), "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics-Their Effect on Power Systems Components", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-22, no. 1, pp. 161–177.
- [5] G. W. Chang, H.-L. Wang, and S.-Y. Chu, (2004), "Strategic placement and sizing of passive filters in a power system for controlling voltage distortion" , IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 3, pp.1204–1211.
- [6] H.-L. Jou J.-C. Wu and H.-Y. Chu, (1994), "New single-phase active power filter" , in IEE Proc -Electr. Power Appl, Vol. 141, No. 3, pp. 129-134.
- [7] P. K. Ray, G. Panda, and P. S. Pohan, (2013), "Fuzzy logic based intelligent Shunt Hybrid filter applied to single phase system," 2013 Annual IEEE India Conference (INDICON), pp. 1–6.
- [8] D. A. Torrey and A. M. A. M. Al-Zamelin, (1995), "Single-phase Active Power Filters for Multiple Nonlinear Loads" IEEE Trans. on Power Electronics", Vol. 10, No. 3, pp. 263-272.
- [9] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, (1999), "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement" IEEE Trans. on Ind. Electron, Vol. 46, No. 5, pp. 960-970.
- [10] L. Benchaita, S. Saadate, and A. S. Nia, (1999), "A Comparison of Voltage Source and Current Source Shunt Active Filter by Simulation and Experimentation" IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 14, No. 2, pp. 642-647.

- [11] W.-L. Lu, S.-N. Yeh, J.-C. Hwang and H.-P. Hsieh, (2000), "Development of a single-phase half-bridge active power filter with the function of uninterruptible power supplies" IEE Proc-Electr. Power Appl., Vol. 147, No. 4, pp. 319-319.
- [12] M. El-Habrouk, M. K. Darwish and P. Mehta, (2000), "Active power filters: A review" IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 147, No. 5, pp. 403-413.
- [13] B.-R. Lin and T.-Y. Yang, (2004), "Three-level voltage-source inverter for shunt active filter" IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 151, No. 6, pp. 744-751.
- [14] W. R. N. Santos, E. R. C. Silva and et al., (2014), "The Transformerless Single-Phase Universal Active Power Filter for Harmonic and Reactive Power Compensation" IEEE Trans. on Power Electronics., Vol. 29, No. 7, pp. 3563-3572.
- [15] Y. Hu, Y. Xie, D. Fu, and L. Cheng, (2016), "New Single-Phase  $\pi$ -Type 5-Level Inverter Using 3-Terminal Switch-Network", IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol. 63, No. 11, pp. 7165-7174.
- [16] C. Y. Hsu and H. Y. Wu, (1996), "A new single-phase active power filter with reduced energy-storage capacity" IEE Proc-Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 1, pp. 25-30.
- [17] D. M. E. Ingram and S. D. Round, (1997), "A Novel Digital Hysteresis Current Controller for an Active Power Filter", IEEE Proc Proc. in Int. Power Electronics and Drive system Conf., Vol. 2, No. 1, pp. 744-749.
- [18] T. Thomas, K. Haddad, G. Joos, and A. Jaafari, (1998), "Design and Performance of Active Power Filters" IEEE Ind. Appl. Magazine, pp. 38-46.
- [19] T. Narongrit, K.-L. Areerak and K.-N. Areerak, (2001), "Optimal Design of Shunt Active Power Filters Using a Particle Swarm Optimization", International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), vol. 4, n. 6 (Part A), pp.2871-2878.
- [20] J. Liu, J. Yang, and Z. Wang, (1999), "A New Approach for Single-Phase Harmonic Current Detecting and Its Application in A Hybrid Active Power Filter" Ind. Electron. Society, IECON '99 Proc., pp. 849-854.
- [21] M. El-Habrouk, and M. K. Darwish, (2001), "Design and implementation of a modified Fourier analysis harmonic current computation technique for power active filters using DSPs", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 148, No. 1, pp.21-28.

- [22] M. Rukonuzzaman, and M. Nakaoka, (2002), "Single-phase shunt active power filter with harmonic detection" IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 149, No. 5, pp. 343-350.
- [23] S. Mariethoz, and A. C. Rufer, (2002), "Open Loop and Closed Loop Spectral Frequency Active Filtering" IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 17, No. 4, pp. 564-573.
- [24] M. Saitou, N. Matsui and T. Shimizu, (2003), "A Control Strategy of Single-phase Active Filter Using a Novel d-q Transformation" 38<sup>th</sup> IAS Ann. Meeting on Conf. Record of the Ind. Appl. Conf., pp. 1222-1227.
- [25] M. Gonzalez, V. Cardenas, and F. Pazos, (2004), "DQ Transformation Development for Single-Phase Systems to Compensate Harmonic Distortion and Reactive Power", 9<sup>th</sup> IEEE Int. Power Electron. Congress, pp. 177-182.
- [26] B-M Han, B-Y Bae, and S. J. Ovaska, (2005), "Reference Signal Generator for Active Power Filters Using Improved Adaptive Predictive Filter" IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol. 52, No. 2, pp.576-584.
- [27] L. P. Kunjumammed, and M. K. Mishra, (2006), "A Control Algorithm for Single-Phase Active Power Filter Under Non-Stiff Voltage Source" IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 21, No. 3, pp. 822-825.
- [28] M. Cirrincione, M. Pucci, and G. Vitale, (2008), "A Single-Phase DG Generation Unit With Shunt Active Power Filter Capability by Adaptive Neural Filtering" IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol. 55, No. 5, pp. 2093-2110.
- [29] M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale and A. Miraoui, (2009), "Current Harmonic Compensation by a Single-Phase Shunt Active Power Filter Controlled by Adaptive Neural Filtering" IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol. 56, No. 8, pp. 3128-3143.
- [30] V. Khadkikar, A. Chandra and B. N. Singh, (2009), "Generalized single-phase p-q theory for active power filtering: simulation and DSP-based experimental investigation", IEE Power Electronics, Vol. 2, No. 1, pp. 67-78.
- [31] S. Tiyyarachakun, K-L. Areerak and K-N. Areerak, (2014), "Instantaneous Power Theory with Fourier and Optimal Predictive Controller Design for Shunt Active Power Filter", Hindawi Publishing Corporation Modelling and Simulation in Engineering, Article ID 38176, pp" 1-20.

- [32] B. A. Angélico, L. B. G. Campanhol, and S. A. Oliveira da Silva, (2014), “Proportional–integral/proportional–integral derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram”, IET Power Electronics, Vol. 7, pp. 2647–2659.
- [33] N. R. Zargari and G. Joos, (1995), “Performance Investigation of a Current-Controlled Voltage-Regulated PWM Rectifier in Rotating and Stationary Frames”, in IEEE Trans. on Ind. Electron, Vol. 42, No. 4, pp. 396-401.
- [34] M. Sedighy, S. B. Dewan, and F. P. Dawson, (1995), “A Robust Digital Current Control Method for Active Power Filters”, IEEE Trans. on Ind. Electron Appl, Vol. 42, No. 4, pp. 1158-1164.
- [35] K. Nishida, M. Rukonuzzman and M. Nakaoka, (2004), “Advanced current control implementation with robust deadbeat algorithm for shunt single-phase voltage-source type active power filter”, IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 151, No. 3, pp. 283-288.
- [36] R. Costa-Castelló, R. Griñó, and E. Fossas, (2004), “Odd-Harmonic Digital Repetitive Control of a Single-Phase Current Active Filter”, IEEE Trans. on Power Electron, Vol. 19, No. 4, pp. 1060-1068.
- [37] J. Matas, L. G. de Vicuña, J. Miret, and et al., (2008), “Feedback Linearization of a Single-Phase Active Power Filter via Sliding Mode Control”, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 23, No. 1, pp’ 116-125.
- [38] P.A. Dahono, (2009), “New hysteresis current controller for single-phase full-bridge inverters”, IET Power Electronics, Vol. 2, Iss. 5, pp. 585–594.
- [39] S. K. Khadem, M. Basu, and M. F. Conlon, (2014), “Harmonic power compensation capacity of shunt active power filter and its relationship with design parameters”, IET Power Electronics., Vol. 7, Iss. 2, pp. 418–430.
- [40] A. Martins, S. Vale, V. Sobrado, and A. Carvalho, (2014), “Comparison of Current Control Methods for Grid-Connected Low-Power Single-Phase Converters”, IECON 2014 - 40<sup>th</sup> Ann. Conf. of the IEEE Ind. Electron. Society, pp. 4211-4217.
- [41] S. Kwak, S-E Kim, and J-C Park, (2015), “Predictive Current Control Methods with Reduced Current Errors and Ripples for Single-Phase Voltage Source Inverters”, IEEE Trans. on Ind. Informatics, Vol. 11, No. 5, pp.1006-1016.

- [42] M. H. Alaei, S. A. Taher and Z. D. Arani, (2015), "Improved performance of single-phase shunt active power filter by using conservative power theory and model predictive control", 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC), pp. 163-168.
- [43] J.-C. Wu and H.-L. Jou, (1996), "Simplified control method for the single-phase active power filter", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 143, No. 3, pp.219-224.
- [44] L. Colak, and R. Bayindir, (2010), "DC Bus Voltage Regulation of an Active Power Filter Using a Fuzzy Logic Controller", 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Machine Learning and Applications, pp. 692-696.
- [45] A. M. Zainuri, M. Radzil, and et al., (2016), "DC-link capacitor voltage control for single-phase shunt active power filter with step size error cancellation in self-charging algorithm", IET Power Electronics, Vol. 9, Iss. 2, pp. 323–335.
- [46] H. Afghoul, F. Krim, A. Beddar, and B. Babes, (2018), "Real-time Implementation of Robust Controller for PV Emulator Supplied Shunt Active Power Filter", 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), pp.-.
- [47] IEEE std 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.
- [48] J. M. Ho, and C. C. Liu, (2001), "The Effects of Harmonics on Differential Relay for a Transformer", 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. (IEE Conf. Publ No. 482), pp.-.
- [49] George, J. W. "Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design", New York: Springer.
- [50] S-L Ho, C-S Lam, and M-C Wong, (2015), "Comparison Among PPF, APF, HAPF and A Combined System of A Shunt HAPF and A Shunt Thyristor Controlled LC", TENCON 2015, IEEE Region 10 Conference, pp.-.

## ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก.

โค้ดโปรแกรมการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และการควบคุมแรงดัน  
บัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรรอกกำลังแยกทีฟ

```
1. #include "DSP28x_Project.h"//Device Headerfile and Examples Include File
2. #include <math.h>
// ADC start parameters
3. #if (CPU_FRQ_150MHZ) //Default - 150 MHz SYSCLKOUT
4. #define ADC_MODCLK 0x3 //HSPCLK=SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2=
150/(2*3)=25.0MHz
5. #endif
6. #if (CPU_FRQ_100MHZ)
7. #define ADC_MODCLK 0x2 //HSPCLK=SCLKOUT/2*ADC_MODCLK2=100/(2*2)= 25.0 MHz
8. #endif
9. #define ADC_CKPS 0x1 //ADC module clock=HSPCLK/2*ADC_CKPS=
25.0MHz/(1*2) = 12.5MHz

10. #define ADC_SHCLK 0xf //S/H width in ADC module periods= 16 ADC clocks
// #define AVG 1000 // Average sample limit
// #define ZOFFSET 0x00 // Average Zero offset
11. void delay_loop(void);
12. void Gpio_select(void);
13. void DACport(int dac);

// Global variable
14. int dac;
15. int dac_1;
16. float iLdg;
17. float iL;
18. float vsdg;
19. float vs;
20. int Vdcdg;
21. int Vdc;
22. float output;

/*****SWFA Variables*****/
23. int k=0;
24. int j=0;
25. float N=1666;
26. float Ts=1.2e-5;
27. int w=314;
28. float A1=0;
29. float A1n[1666];
```



```
30. float B1=0;
31. float B1n[1666];
32. float iL1;
33. float iswfa;
34. float iref;
35. float zeta;
36. float C1=0;
37. int lim;

/*****Vdc PI Control Variables*****/
38. int Vdcref= 1050;
39. float idc;
40. float iac;
41. float Kp=0.124; //w=10pi=Kp=0.124 w=pi=Kp=0.01244
42. float Ki=2.763; //w=10pi=Ki=2.763 w=pi=Ki=0.0276
43. int Verr=0;
44. float Gp=0;
45. float Gi=0;

46. main()
47. {
  // Step 1. Initialize System Control:
  // PLL, WatchDog, enable Peripheral Clocks
48. InitSysCtrl();

  // Specific clock setting
49. EALLOW;
50. SysCtrlRegs.HISPCP.all = ADC_MODCLK;// HSPCLK = SYSCLKOUT/ADC_MODCLK
51. EDIS;

  // Step 2. Initialize GPIO:
52. Gpio_select();

  // Step 3. Clear all interrupts and initialize PIE vector table:
  // Disable CPU interrupts
53. DINT;

  // Initialize the PIE control registers to their default state.
  // The default state is all PIE interrupts disabled and flags
  // are cleared.
54. InitPieCtrl();

  // Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
55. IER = 0x0000;
56. IFR = 0x0000;
  // Initialize the PIE vector table with pointers to the shell Interrupt
  // Service Routines (ISR).
  // This will populate the entire table, even if the interrupt
  // is not used. This is useful for debug purposes.
  // The shell ISR routines are found in DSP2833x_DefaultIsr.c.
  // This function is found in DSP2833x_PieVect.c.
```

```
57. InitPieVectTable();

// Step 4. Initialize all the Device Peripherals:
58. InitAdc(); // init the ADC

        // Specific ADC setup for this example:
59. AdcRegs.ADCTRL1.bit.ACQ_PS = ADC_SHCLK;
60. AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = ADC_CKPS;
61. AdcRegs.ADCTRL1.bit.CPS = 1;

62. AdcRegs.ADCTRL3.bit.SMODE_SEL = 0;
63. AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 0; // Setup continuous run
64. AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 1; // 1 Cascaded mode
65. AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_MOD_SEQ1 = 0;
66. AdcRegs.ADCMAXCONV.bit.MAX_CONV1 = 0x3;

67. AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; //A0 iL
68. AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; //A1 vs provide zeta
69. AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x2; //A2 vdc PI control
70. AdcRegs.ADCTRL2.all = 0x2000;

// Step 5. User specific code, enable interrupts:
71. Gpio_select();

// Step 6. IDLE loop. Just sit and loop forever (optional):
72. for(;;)
73. {
        //===== for ADC =====//
74. AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1;
75. AdcRegs.ADCTRL2.bit.SOC_SEQ1=1;

76. iLdg=(AdcRegs.ADCRESULT0>>4); // recieve data iL from ADCA0
77. iL=(iLdg-2048)*4.98/1365;
78. vsdg=(AdcRegs.ADCRESULT1>>4); // recieve data zeta from ADCA1
79. zeta=(vsdg-2048)/1365;
80. Vdcdg=(AdcRegs.ADCRESULT2>>4); // recieve data Vdc from ADCA2
81. Vdc=(Vdcdg*10)/13; //thousands

        /***PI Controller***/
82. Verr = (Vdcref-Vdc)/10;
83. Gp = Verr*Kp; //Kp
84. Gi = (Gi+(Ki*Verr*Ts)); //Ki Gi = Gi+(Ki*Verr*Ts)
85. idc=(Gp+Gi);
86. iac=idc*zeta;

        //SWFA harmonic detection//
87. if (k>=0&&k<N){
88. A1n[k]=(2/N)*iL*cos(Ts*w*k);
89. A1=A1+A1n[k];
```

```
90. B1n[k]=(2/N)*iL*sin(Ts*w*k);
91. B1=B1+B1n[k];

92. iswfa=0;

93. k=k+1;
94. }

95. if(k>=N){
96. A1=A1-A1n[j];
97. A1n[j]=(2/N)*iL*cos(Ts*w*j);
98. A1=A1+A1n[j];

99. B1=B1-B1n[j];
100. B1n[j]=(2/N)*iL*sin(Ts*w*j);
101. B1=B1+B1n[j];

102. iL1=A1*cos(Ts*w*j)+B1*sin(Ts*w*j);
103. iswfa=iL-iL1;

104. j=j+1;

105. if(j==N){
106. j=0;
107. }
108. }
109. iref=iswfa-iac;
110. output=iswfa*1365;

//=====Sending output to DAC712=====//
111. dac_1=output;
112. DACport(dac_1);

// Acknowledge this interrupt to receive more interrupts from group 1
//PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
113. }
114. }
//=====
==//
// Configure port A&B as a GPIO output pin
115. void Gpio_select(void)
116. {
117. EALLOW;
//sets GPIO Muxs as I/O
118. GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all = 0x0000;
119. GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all = 0x0000;
120. GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all = 0x0000;
121. GpioCtrlRegs.GPBMUX2.all = 0x0000;

//sets GPIO DIR as Outputs
```

```
122. GpioCtrlRegs.GPADIR.all = 0xFFFFFFFF;
123. GpioCtrlRegs.GPBDIR.all = 0xFFFFFFFF;

124. EDIS;
125. }

126. void DACport(int dac)
127. {
128.     //step 1 : initial
129.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 1;
130.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 1;
131.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 1;
132.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;

133.     //step 2 : load data
134.     GpioDataRegs.GPADAT.all = dac;

135.     //step 3 : finish loading data
136.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 1;
137.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 1;
138.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 1;
139.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;

140.     //step 4 : load input latch WR=1
141.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 0;
142.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 1;
143.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 1;
144.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
145.     delay_loop();

146.     //stp 5 : WR=0
147.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 0;
148.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 1;
149.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 0;
150.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
151.     delay_loop();

152.     //step 6 : WR=1
153.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 0;
154.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 1;
155.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 1;
156.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
157.     delay_loop();

158.     //step 7 : load D/A latch WR=1
159.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 1;
160.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 0;
161.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 1;
162.     GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
```

```
156. delay_loop();

    //step 8 : WR=0
157. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 1;
158. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 0;
159. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 0;
160. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
161. delay_loop();

    //step 9 : WR=1
162. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 1;
163. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 0;
164. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 1;
165. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
166. delay_loop();

167. }

168. void delay_loop(void)
169. { short i;
170. for(i=0;i<1;i++){
171. }
```

การอธิบายโค้ดโปรแกรมการคำนวณตรวจจับสนามอนิกและการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับวงจร  
กรองกำลังแอกทีฟ

บรรทัดที่ 1 ถึง 2 คือ การประกาศเรียกใช้ฟังก์ชันเริ่มต้น และฟังก์ชันการคำนวณทางคณิตศาสตร์  
ของบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit

บรรทัดที่ 3 ถึง 10 คือ การตั้งค่า CPU การกำหนดความถี่ CPU และการตั้งค่าใช้งานพอร์ต ADC  
ของบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit

บรรทัดที่ 11 ถึง 13 คือ การประกาศฟังก์ชันหน่วงเวลา ฟังก์ชันตั้งค่าหน้าที่พินของบอร์ด  
TMS320F2833 Experimental Kit และฟังก์ชันการแปลงข้อมูลจากดิจิตอลเป็นแอนะล็อก (DAC)

บรรทัดที่ 14 ถึง 45 คือ การประกาศตัวแปรสำหรับคำนวณตรวจจับสนามอนิกและควบคุม  
แรงดันบัลไฟตรง และการแปลงข้อมูล DAC

บรรทัดที่ 46 ถึง 71 คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับใช้งานของบอร์ด การกำหนดค่าเริ่มต้นใช้  
งานช่องทาง ADC และพินอินพุตเอาต์พุต

บรรทัดที่ 72 ถึง 81 คือ การรับค่าอินพุตสำหรับคำนวณตรวจจับสนามอนิกและควบคุมแรงดันบัล  
ไฟตรง

บรรทัดที่ 82 ถึง 86 คือ การคำนวณควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีโอ

บรรทัดที่ 87 ถึง 110 คือ การคำนวณตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี SWFA

บรรทัดที่ 111 ถึง 114 คือ การส่งข้อมูลไปยังฟังก์ชันแปลงข้อมูล DAC

บรรทัดที่ 115 ถึง 125 คือ ฟังก์ชันสำหรับดำเนินการการเซ็ตค่าพินของบอร์ด TMS320F2833 Experimental Kit ให้เป็นพินเอาต์พุต

บรรทัดที่ 126 ถึง 167 คือ ฟังก์ชันสำหรับดำเนินการการแปลงข้อมูลจากดิจิตอลเป็นแอนะล็อก (DAC)

บรรทัดที่ 168 ถึง 171 คือ ฟังก์ชันสำหรับดำเนินการหน่วงเวลา



ภาคผนวก ข.

รายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Maneerat Padungsin, Tosaporn Narongrit and Kongpol Areerak, “*The Comparison Study of Harmonic Detection Algorithms for Single-Phase Power Systems*”, 5<sup>th</sup> International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Kitakyushu, Japan : April 23-25, 2018, pp.1-6



## ประวัติผู้เขียน

ดร.ทศพร ณรงค์ฤทธิ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (เกียรตินิยมอันดับสอง) ระดับปริญญาโท และระดับปริญญาเอก ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2551 2553 และ 2558 ตามลำดับ ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชำนาญทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้า การกำจัดฮาร์มอนิก วงจรกรองกำลังแอกทีฟ การควบคุมฟิชซีลลจิก และการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์

