

การออกแบบตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัวสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ  
แบบขนานในระบบสามเฟสสมดุล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2557

**ADAPTIVE FUZZY CONTROLLER DESIGN FOR  
SHUNT ACTIVE POWER FILTERS IN BALANCED  
THREE-PHASE SYSTEMS**

**Tosaporn Narongrit**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the**

**Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2014**

การออกแบบตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟ  
แบบขนานในระบบสามเฟสสมดุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพิจารณาเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อัครกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.กองพล อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล)

กรรมการ

(ผศ. ดร.กองพันธ์ อารีรักษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ : การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวสำหรับวงจรกรองกำลัง  
แอกทีฟแบบขนานในระบบสามเฟสสมดุล (ADAPTIVE FUZZY CONTROLLER  
DESIGN FOR SHUNT ACTIVE POWER FILTERS IN BALANCED THREE-PHASE  
SYSTEMS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์, 338 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวสำหรับควบคุมกระแส  
ชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบสามเฟสสมดุล การตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อ  
คำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาจาก  
วิธีการตรวจจับซิงโครไนส์ และเรียกวิธีดังกล่าวว่า วิธีฟูรีเยร์เอสดี การควบคุมกระแสชดเชยของ  
วงจรกรองกำลังแอกทีฟดำเนินการควบคุมอยู่บนแกนคิวิร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี  
สเปซเวกเตอร์ที่ดับเบิลยู การควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้ตัวควบคุม  
แบบพีไอที่ใช้การออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิม การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับใช้ควบคุม  
กระแสชดเชยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด  
แบบดาวยิงปรับตัว นอกจากนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีด้วยวิธีการใหม่ที่ได้คิดค้น  
ขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้ประสบการณ์และวิศวกร ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ระบบกำจัด  
ฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™F28335  
พบว่า ระบบควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีจากการออกแบบทั้งสองวิธีให้ผลการ  
ควบคุมที่ดีใกล้เคียงกัน โดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะของ  
กระแสอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก และส่งผลให้ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่  
แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการชดเชย สำหรับการกำจัด  
ฮาร์มอนิกในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการ  
ออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยที่สามารถปรับตัวได้โดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัว ซึ่ง  
ประกอบด้วย ตัวควบคุมฟัซซี และฟัซซีช่วย โดยฟัซซีช่วยจะทำหน้าที่ปรับค่าเอาต์พุตของตัว  
ควบคุมฟัซซีที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมหลัก การปรับค่าเอาต์พุตดังกล่าวเพื่อเพิ่มสมรรถนะของตัว  
ควบคุมฟัซซีให้สามารถควบคุมกระแสชดเชยที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น การ  
ออกแบบฟัซซีช่วยตามแนวทางของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นวิธีการใหม่ได้นำเสนอไว้เช่นกัน  
นอกจากนี้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการสร้างระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วย  
วงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ โดยในส่วนของระบบควบคุม  
ทั้งหมดได้ดำเนินการคำนวณอยู่บนบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™F28335 ผลการทดสอบระบบฮาร์ดแวร์  
ดังกล่าว พบว่า ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีสามารถให้ผลการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีกว่า  
การใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในกรณีการทดสอบกับระบบที่มีโหลดขนาดกระแสไฟฟ้าต่างกัน



นอกจากนี้ยังพบว่า ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัวสามารถให้ผลการควบคุม กระแสชดเชยที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีซีในกรณีการทดสอบที่กำหนดให้โหลดของระบบมีการ เปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ทั้งตัวควบคุมพีซีและตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัว สามารถส่งผลให้ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อน การชดเชย



TOSAPORN NARONGRIT : ADAPTIVE FUZZY CONTROLLER  
DESIGN FOR SHUNT ACTIVE POWER FILTERS IN BALANCED  
THREE-PHASE SYSTEMS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KONGPOL  
AREERAK, Ph.D., 338 PP.

ADAPTIVE FUZZY CONTROLLER DESIGN FOR SHUNT ACTIVE POWER  
FILTERS IN BALANCED THREE-PHASE SYSTEMS

The thesis presents an adaptive fuzzy controller design for compensating current control of shunt active power filters in balanced three-phase systems. The harmonic detection method for calculating the reference current of shunt active power filter is improved and it is called the synchronous detection with Fourier (SDF). The control system of shunt active power filters is operated on dq-axis with the space vector pulse width modulation (SVPWM) technique. The PI controller designed by the conventional method is applied to regulate the dc bus voltage. The design of a fuzzy controller for compensating current control using the adaptive tabu search (ATS) method and the new design approach without the engineering experiences are proposed in this thesis. The hardware in the loop simulation with eZdsp<sup>TM</sup>F28335 board is used to simulate the harmonic elimination in this thesis. The simulation results show that the fuzzy controller designed by both methods can provide a good performance to control the compensating current. Therefore, the shunt active power filter can inject the compensating current to track the reference current and the source current is nearly sinusoidal waveform after compensation. Moreover, the shunt active power filter can reduce the %THD of the source current after compensation. In addition, the harmonic

elimination in case of the load changing is presented in the thesis. In this condition, the adaptive fuzzy controller consists of the main fuzzy controller and the auxiliary fuzzy controller are used to control the compensating current of shunt active power filters. The auxiliary fuzzy controller is designed by the new approach and it is shown in the thesis. Finally, the hardware implementation of the considered system is also presented in the thesis. The eZdsp™F28335 is used to implement the harmonic detection and the control system of the shunt active power filter. For the experimental results, the system using the fuzzy controller can provide a good performance to control the compensating current compared with using the PI controller in case of the difference load amplitude system. Moreover, the system with the compensating current control using the adaptive fuzzy controller can provide the best performance control compared with using only fuzzy controller without the auxiliary fuzzy controller in case of load changing system. However, the harmonic elimination results using the both controllers are reduced the %THD value of the source currents after compensation.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2014

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

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

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองพล อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ทั้งในด้านการศึกษา และการดำเนินชีวิต รวมถึงให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ผู้สอนรายวิชาปัญญาประดิษฐ์สำหรับวิศวกร ที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองพัน อารีรักษ์ ที่ให้คำแนะนำในด้านวิชาการ และภาษาอังกฤษ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกคน ที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณอาจารย์สรารุช จันทร์ผิง นายพลสิทธิ์ ศานติประพันธ์ และนางสาวศศิญา อุดมสุข ที่ให้ความช่วยเหลือ แลกเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการ และให้กำลังใจมาตลอด

ขอขอบคุณวิศวกรและเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ครู อาจารย์ ทุกคนที่ให้ความรู้ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน และบุคคลที่สำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และการดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเสมอมา

ทศพร ฌรณกุลฤทธิ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ค
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ฐ
สารบัญรูป .....	ด
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	4
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น .....	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ .....	6
<b>2 การสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุม</b>	
<b>วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน .....</b>	<b>8</b>
2.1 กล่าวนำ .....	8
2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรรองกำลังแอกทีฟ	
แบบขนาน .....	8
2.3 สรุป .....	23
<b>3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดีสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟ .....</b>	<b>24</b>
3.1 กล่าวนำ .....	24
3.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดี .....	24
3.2.1 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดีแบบกระแสเท่ากัน .....	25

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดีแบบกำลังเท่ากัน .....	27
3.2.3	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดีแบบอิมพีแดนซ์เท่ากัน .....	27
3.3	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดี .....	28
3.4	การเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดีกับวิธีฟูรีเยร์เอสดี ....	30
3.5	สรุป .....	38
<b>4</b>	<b>แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบระบบควบคุม</b>	
	<b>ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน .....</b>	<b>39</b>
4.1	กล่าวนำ .....	39
4.2	การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....	39
4.2.1	การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ บนแกนสามเฟส .....	39
4.2.2	การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ บนแกนดีคิว .....	44
4.2.3	การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน .....	54
4.3	การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....	59
4.4	การออกแบบระบบควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....	63
4.5	เทคนิคการสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม .....	66
4.6	การจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....	72
4.7	สรุป .....	80
<b>5</b>	<b>การควบคุมแบบฟuzzyสำหรับควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....</b>	<b>82</b>
5.1	กล่าวนำ .....	82
5.2	ฟuzzyเซต .....	82
5.3	การดำเนินการทางฟuzzyเซต .....	84
5.4	ฟังก์ชันสมาชิก .....	87
5.4.1	การทดสอบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับ ระบบควบคุมกระแสชดเชย .....	89

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5	ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา .....	92
5.5.1	การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzy สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย.....	93
5.5.2	การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของ ตัวควบคุมฟuzzyกรณี 3 ค่าเชิงภาษากับกรณี 5 ค่าเชิงภาษา.....	97
5.6	กฎฟuzzy .....	98
5.6.1	การออกแบบกฎของฟuzzyสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย.....	99
5.7	การอนุมานฟuzzy .....	103
5.7.1	การอนุมานฟuzzyแบบ Mamdani .....	103
5.7.2	การอนุมานฟuzzyแบบ Takagi-Sugeno .....	113
5.7.3	การทดสอบวิธีการอนุมานของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับ ควบคุมกระแสชดเชย .....	116
5.8	สรุป.....	117
6	เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป.....	118
6.1	กล่าวนำ .....	118
6.2	การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป .....	118
6.2.1	การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp <sup>TM</sup> F28335.....	119
6.2.2	การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp <sup>TM</sup> F28335 .....	121
6.3	การทดสอบจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป .....	127
6.4	สรุป.....	132
7	การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyโดยใช้วิธีการค้นหาที่เหมาะสมที่สุดแบบตามเชิงปรับตัว.....	133
7.1	กล่าวนำ.....	133
7.2	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy ด้วยวิธีการลองผิดลองถูก .....	133
7.3	การค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามเชิงปรับตัว .....	136
7.4	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyและค่าพารามิเตอร์ ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS (เวอร์ชันที่ 1).....	140

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.4.1	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก ของตัวควบคุมพีชชีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	141
7.4.2	ขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของ ตัวควบคุมพีชชีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	145
7.4.3	การทดสอบพารามิเตอร์ของ ATS สำหรับใช้ออกแบบตำแหน่ง ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีและค่าพารามิเตอร์ ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ .....	147
7.4.4	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีและ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS .....	153
7.4.5	การปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตำแหน่ง ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีและค่าพารามิเตอร์ของ วงจรรองกำลังแอกทีฟ .....	155
7.5	การพัฒนาการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชี และค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS .....	158
7.5.1	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชี และค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ โดยใช้วิธี ATS (เวอร์ชันที่ 2).....	158
7.5.2	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีแบบสมมาตร และค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ โดยใช้วิธี ATS (เวอร์ชันที่ 3) .....	162
7.5.3	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีเฉพาะ เอาต์พุตและค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ (เวอร์ชันที่ 4).....	167
7.5.4	การออกแบบค่าตัวประกอบปรับเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชี และค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ วิธี ATS (เวอร์ชันที่ 5).....	171



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.6	การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย .....	176
7.7	สรุป .....	181
<b>8</b>	<b>การออกแบบตัวควบคุมพีชชีด้วยวิธีการใหม่ .....</b>	<b>182</b>
8.1	กล่าวนำ.....	182
8.2	การออกแบบตัวควบคุมพีชชีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีการใหม่.....	182
8.2.1	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชี .....	182
8.2.2	การออกแบบตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบที่พิจารณา.....	185
8.2.3	การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีชชี ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่ .....	188
8.3	การออกแบบตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1 .....	192
8.3.1	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชี สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1.....	193
8.3.2	การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีชชี ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1.....	197
8.4	การออกแบบตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2 .....	201
8.4.1	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชี สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2.....	201
8.4.2	การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีชชี ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2.....	205
8.5	การออกแบบตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3 .....	209
8.5.1	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชี สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3.....	210
8.5.2	การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีชชี ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3.....	214
8.6	สรุป .....	218

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>9</b>	<b>การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัว .....</b>	<b>219</b>
9.1	กล่าวนำ.....	219
9.2	การควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัว.....	219
9.3	การออกแบบพีซีช่วย.....	221
9.3.1	การออกแบบโครงสร้างของพีซีช่วย.....	221
9.3.2	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของพีซีช่วย .....	223
9.4	การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีโพลคมมีการเปลี่ยนแปลง .....	225
9.4.1	การจำลองสถานการณ์กรณีโพลคมมีการเปลี่ยนแปลง ขนาดกระแสไฟฟ้า.....	225
9.4.2	การจำลองสถานการณ์กรณีโพลคมมีการเปลี่ยนแปลง รูปร่างกระแสไฟฟ้า.....	234
9.5	สรุป .....	240
<b>10</b>	<b>ระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ .....</b>	<b>241</b>
10.1	กล่าวนำ.....	241
10.2	การสร้างฮาร์ดแวร์ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	241
10.2.1	อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้สร้างระบบกำจัดฮาร์มอนิก ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ .....	243
10.2.2	การโปรแกรมคำนวณระบบควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟ .....	256
10.3	การทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	262
10.3.1	กรณีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชย ระหว่างการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกับการใช้ตัวควบคุมพีซี .....	262
10.3.2	กรณีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชย ระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีซีกับการใช้ตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัว ....	277
10.4	สรุป .....	293
<b>11</b>	<b>บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>295</b>
11.1	สรุป .....	295
11.2	ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	298

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง .....	299
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โค้ด โปรแกรมการจำลองสถานการณ์แบบจำลอง ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....	306
ภาคผนวก ข. โค้ด โปรแกรมภาษาซีการทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่าง โปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 .....	309
ภาคผนวก ค. โค้ด โปรแกรมการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับใช้ออกแบบ ตัวควบคุมพีชชีและวงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....	312
ภาคผนวก ง. โค้ด โปรแกรมภาษาซีการควบคุมวงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....	322
ภาคผนวก จ. รายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระดับชาติและนานาชาติ .....	336
ประวัติผู้เขียน .....	338

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....	9
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง แบบวิธีสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม.....	13
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และระบบควบคุม ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว.....	16
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยใช้ตัวควบคุมพีซี.....	18
2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟและตัวควบคุมพีซี.....	20
2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีบอร์ด DSP สำหรับใช้สร้างฮาร์ดแวร์ระบบ ควบคุมวงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....	22
3.1 การเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD กับวิธี SDF .....	37
4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ ไฟฟ้าที่พิจารณา .....	56
4.2 ค่าแรงดันบนแกนอ้างอิงแอลฟาเบต้าตามรูปแบบสถานะสวิตช์ไอจีบีทีสามตัวบน .....	68
4.3 การระบุเซกเตอร์ของมุม $\theta_c^*$ ใด ๆ .....	69
4.4 สัญญาณอ้างอิง $T_a, T_b, T_c$ ของทั้ง 6 เซกเตอร์ .....	71
4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบกำจัดฮาร์มอนิกที่พิจารณา .....	73
4.6 ค่า %THD กรณีระบบควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีไอ .....	79
5.1 ผลการทดสอบลักษณะรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีซีสำหรับ ใช้ควบคุมกระแสชดเชย .....	92
5.2 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมพีซีสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย กรณี 3 ค่าเชิงภาษา.....	94
5.3 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมพีซีสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย กรณีอินพุต error และเอาต์พุต voltage 5 ค่าเชิงภาษา.....	96
5.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมพีซี	

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
กรณี 3 ค่าเชิงภาษากับกรณี 5 ค่าเชิงภาษา.....	97
5.5 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมพีชซี กรณี 15 กฎพีชซีกับกรณี 7 กฎพีชซี.....	102
5.6 ข้อมูลค่าระดับความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์พีชซีเซตเอาต์พุตสำหรับระบบ ควบคุมกระแสชดเชย .....	109
5.7 การตรวจสอบค่าความเป็นสมาชิกภาพ .....	109
5.8 ผลการทดสอบวิธีการอนุมานพีชซีแบบ Mamdeni และ Takagi-Sugeno .....	116
7.1 ชุดข้อมูลตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error จากวิธีการลองผิดลองถูก.....	135
7.2 ชุดข้อมูลตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate จากวิธีการลองผิดลองถูก.....	135
7.3 ชุดข้อมูลตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage จากวิธีการลองผิดลองถูก .....	135
7.4 ผลการทดสอบการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซีด้วย การลองผิดลองถูก .....	136
7.5 ผลการทดสอบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ .....	145
7.6 ขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ $P_1$ ถึง $P_{25}$ และพารามิเตอร์ $V_{dc}^*$ และ $L_f$ .....	146
7.7 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น .....	149
7.8 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง .....	150
7.9 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น.....	151
7.10 ผลการทดสอบค่าตัวประกอบปรับลดรัศมี .....	152
7.11 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซีและค่าพารามิเตอร์ ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS กรณีปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ .....	154
7.12 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซีและค่าพารามิเตอร์ ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS กรณีปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ .....	157
7.13 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซีและค่าแรงดันบัสไฟตรง อ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS .....	161
7.14 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซีแบบสมมาตรและ ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS.....	164

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7.15 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีเฉพาะเอาต์พุตและ ค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS .....	170
7.16 ผลการออกแบบค่าตัวประกอบปรับเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีและค่าแรงดัน บัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS .....	172
7.17 ค่า %THD กรณีการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมฟัซซี ที่ออกแบบโดยใช้วิธี ATS .....	180
8.1 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีด้วยวิธีการใหม่ .....	184
8.2 ค่า %THD กรณีการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมฟัซซี ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการใหม่ .....	192
8.3 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1 .....	200
8.4 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2 .....	208
8.5 ขนาดกระแสไฟฟ้าของโหลดแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติ .....	210
8.6 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3 .....	217
9.1 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีช่วยแบบสมมาตร .....	224
9.2 การเปรียบเทียบค่า %THD กรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า (โหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลด $R_L$ อนุกรมกับ $L_L$ ) .....	234
9.3 การเปรียบเทียบค่า %THD กรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกระแสไฟฟ้า (โหลดกระแสทางอุดมคติที่กำหนดตามสมการที่ (8.5)) .....	239
10.1 รายละเอียดของสัญญาณอินพุตแอนะล็อกในพอร์ต P5 และ P9 .....	250
10.2 รายละเอียดแต่ละพินของพอร์ต P2 ในบอร์ด eZdsp <sup>TM</sup> F28335 .....	251
10.3 การเชื่อมต่อขาที่ 11 และ 12 ของไอซี DAC712P ทั้งสามตัวกับบอร์ด eZdsp <sup>TM</sup> F28335 .....	253
10.4 ขั้นตอนการตั้งการควบคุมสำหรับไอซี DAC712P ตัวที่ 1 .....	254
10.5 ขั้นตอนการตั้งการควบคุมสำหรับไอซี DAC712P ตัวที่ 2 .....	254
10.6 ขั้นตอนการตั้งการควบคุมสำหรับไอซี DAC712P ตัวที่ 3 .....	255

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
10.7 ผลค่า %THD จากการทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกกรณีทีโหลด มีขนาดกระแสไฟฟ้าต่างกัน .....	276
10.8 ผลค่า %THD จากการทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกกรณีทีโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ขนาดกระแสไฟฟ้า .....	293



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน .....2
3.1	การแยกปริมาณแอกทีฟมูลฐานออกจากปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟสามเฟส.....25
3.2	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี CSD .....27
3.3	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PSD.....27
3.4	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี ZSD.....28
3.5	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF.....29
3.6	แผนภาพอธิบายการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_0$ ของ SWFA.....30
3.7	ระบบสำหรับการตรวจสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก .....31
3.8	สเปกตรัมของกำลังแอกทีฟสามเฟส .....31
3.9	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส $a$ กรณีใช้วิธี SD.....32
3.10	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส $b$ กรณีใช้วิธี SD.....33
3.11	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส $c$ กรณีใช้วิธี SD.....33
3.12	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส $a$ กรณีใช้วิธี SDF .....34
3.13	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส $b$ กรณีใช้วิธี SDF .....34
3.14	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส $c$ กรณีใช้วิธี SDF.....35
3.15	สเปกตรัมของกำลังแอกทีฟมูลฐานที่ได้จากการแยกออกจากปริมาณฮาร์มอนิกของ กำลังแอกทีฟโดยใช้วงจรกรองของวิธี SD และที่ใช้ SWFA ของวิธี SDF.....37
4.1	ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....40
4.2	ระบบที่พิจารณาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....40
4.3	เฟสเซอร์ไดอะแกรมการแปลงแกนดีคิว .....44
4.4	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแบบจำลองสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ .....47
4.5	ระบบไฟฟ้าพิจารณาที่สร้างขึ้นจากชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับโปรแกรม Simulink.....56
4.6	รายละเอียดภายในบล็อก switching function ( $d_{sk}$ ) .....56
4.7	ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า $i_{cd}$ .....57
4.8	ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า $i_{cq}$ .....58



## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า $V_{dc}$ .....	58
4.10 ระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว .....	60
4.11 แผนภาพบล็อกการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอบนแกนดีและคิว .....	62
4.12 ระบบควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงบนแกนดี .....	64
4.13 แผนภาพบล็อกการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ .....	65
4.14 โครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน .....	67
4.15 ไดอะแกรมสเปซเวกเตอร์ .....	67
4.16 รูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์ที่ 1 ถึง 6 .....	70
4.17 บล็อกไดอะแกรมการสร้างพัลส์ควบคุมสวิตช์อุปกรณ์ไอจีบีทีทั้ง 6 ตัว .....	71
4.18 รูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์ที่ 1 .....	72
4.19 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา .....	73
4.20 ผลรวมแบบอินทิเกรตปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ .....	74
4.21 สเปกตรัมฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา .....	76
4.22 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกระแสชดเชยกับกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิว .....	77
4.23 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีเฟส $a$ .....	78
4.24 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีเฟส $b$ .....	78
4.25 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีเฟส $c$ .....	79
4.26 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง .....	80
5.1 ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของเซตชัดเจน .....	83
5.2 ฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซต .....	84
5.3 ส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต $A$ .....	84
5.4 การยูเนียนของฟัซซีเซต $A$ และ $B$ .....	85
5.5 การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต $A$ และ $B$ .....	86
5.6 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม .....	87
5.7 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู .....	88
5.8 ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน .....	88

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ฟังก์ชันสมาชิกูประฆังคว่ำ .....	89
5.10 ระบบกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี สำหรับควบคุมกระแสชดเชย .....	90
5.11 ฟังก์ชันสมาชิกูรูปสามเหลี่ยม.....	90
5.12 ฟังก์ชันสมาชิกูรูปสี่เหลี่ยมคางหมู .....	91
5.13 ฟังก์ชันสมาชิกูรูปเกาส์เซียน .....	91
5.14 ฟังก์ชันสมาชิกูประฆังคว่ำ.....	91
5.15 ระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี .....	93
5.16 ฟังก์ชันสมาชิกูของอินพุต error กรณี 3 ค่าเชิงภาษา .....	95
5.17 ฟังก์ชันสมาชิกูของอินพุต error rate กรณี 3 ค่าเชิงภาษา .....	95
5.18 ฟังก์ชันสมาชิกูของเอาต์พุต voltage กรณี 3 ค่าเชิงภาษา .....	95
5.19 ฟังก์ชันสมาชิกูของอินพุต error กรณี 5 ค่าเชิงภาษา .....	96
5.20 ฟังก์ชันสมาชิกูของเอาต์พุต voltage กรณี 5 ค่าเชิงภาษา .....	97
5.21 การวิเคราะห์การควบคุมกระแสชดเชยสำหรับการออกแบบกฎฟัซซี .....	99
5.22 กฎฟัซซีสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยแสดงในรูปแบบ FAM .....	101
5.23 กระบวนการอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani .....	103
5.24 ตัวอย่างการทำฟัซซีของระบบควบคุมกระแสชดเชย .....	104
5.25 การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด.....	105
5.26 การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ผลคูณ.....	106
5.27 การทำดีฟัซซีแบบ COG .....	107
5.28 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ COG.....	108
5.29 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ BOA.....	110
5.30 การทำดีฟัซซีแบบ SOM.....	110
5.31 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ SOM .....	111
5.32 การทำดีฟัซซีแบบ LOM.....	111
5.33 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ LOM .....	112

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.34 การทำดีพีซีแบบ MOM .....	112
5.35 ค่าเอาต์พุตซัดเจนที่ได้จากการทำดีพีซีแบบ MOM .....	113
5.36 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage ที่เป็นเส้นตรงโทน .....	114
5.37 การอนุมานแบบ Takagi-Sugeno .....	115
5.38 ค่าเอาต์พุตซัดเจนที่ได้จากการทำดีพีซีแบบ WA .....	115
6.1 แผนภาพการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 .....	119
6.2 ไอคอนการเข้าใช้งานซอฟต์แวร์ MATLAB และ โปรแกรม CCStudio v3.3 .....	119
6.3 การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp™ F28335 .....	120
6.4 หน้าต่างโปรแกรม CCStudio v3.3 .....	121
6.5 บล็อก RTDX Read และ RTDX Write ภายในไลบรารี RTDX simulation block .....	122
6.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกอินพุต RTDX Write .....	123
6.7 การกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกเอาต์พุต RTDX Read .....	123
6.8 บล็อก Target Preferences ในไลบรารี Simulink .....	125
6.9 ระบบ RTDXTest .....	126
6.10 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของโปรแกรม Simulink .....	127
6.11 ระบบ RTDXTest .....	128
6.12 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกแหล่งจ่ายรูปสัญญาณไซน์ .....	129
6.13 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกแหล่งจ่ายรูปสัญญาณสามเหลี่ยม .....	129
6.14 โปรเจกต์ RTDXTest ที่สร้างจากโปรแกรม CCStudio v3.3 .....	130
6.15 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ระหว่างคอมพิวเตอร์โปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 .....	130
6.16 ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบ RTDXTest .....	131
7.1 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error .....	134
7.2 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate .....	134
7.3 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage .....	134

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.4 การเลือกคำตอบ $S_0$ และการกำหนดค่า $S_{best}$ .....	137
7.5 คำตอบรอบข้างภายในรัศมีการค้นหา.....	137
7.6 การเลือกคำตอบ $S_i$ .....	138
7.7 การกำหนดค่า $S_{best}^{new}$ .....	138
7.8 การกำหนดคำตอบ $S_0^{new}$ .....	139
7.9 การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว .....	140
7.10 ใต้อะแกรมการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyและ และพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS .....	140
7.11 แผนภาพการโปรแกรมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (เวอร์ชันที่ 1) .....	144
7.12 ผลการทดสอบปรับขยายขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่ง ฟังก์ชันสมาชิก $P_1$ ถึง $P_{25}$ ของตัวควบคุมฟuzzy .....	147
7.13 การลู่เข้าของค่า $W$ สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของ ตัวควบคุมฟuzzyและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	153
7.14 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนคิกิว .....	154
7.15 การลู่เข้าของค่า $W$ สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัว ควบคุมฟuzzyและพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟกรณีปรับปรุงฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ใหม่ .....	156
7.16 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนคิกิว กรณีปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ (เวอร์ชันที่ 1).....	157
7.17 ใต้อะแกรมการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyและ ค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS .....	159
7.18 แผนภาพการโปรแกรมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เวอร์ชันที่ 2.....	160
7.19 การลู่เข้าของค่า $W$ สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัว ควบคุมฟuzzyและค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	161
7.20 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนคิกิว สำหรับการออกแบบในเวอร์ชันที่ 2 .....	162

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.21 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error แบบสมมาตร .....	163
7.22 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate แบบสมมาตร .....	163
7.23 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage แบบสมมาตร .....	163
7.24 ไดอะแกรมการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyแบบสมมาตร และค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS .....	164
7.25 แผนภาพการโปรแกรมของฟังก์ชันวัตถุประสงคเวอรชันที่ 3 .....	165
7.26 การลู่เข้าของค่า $W$ สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัว ควบคุมฟuzzyแบบสมมาตรและค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ....	166
7.27 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสดชชยบนแกนคิกิว สำหรับการออกแบบในเวอรชันที่ 3 .....	166
7.28 ไดอะแกรมการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyเฉพาะเอาต์พุต และค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS .....	167
7.29 ระบบควบคุมกระแสดชชยบนแกนคิกิวที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyและตัวประกอบ $K$ .....	168
7.30 ผลการลู่เข้าของ $W$ สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัว ควบคุมฟuzzyเฉพาะเอาต์พุตและค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ...	169
7.31 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสดชชยบนแกนคิกิว สำหรับการออกแบบในเวอรชันที่ 4 .....	170
7.32 ระบบควบคุมกระแสดชชยบนแกนคิกิวที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyและตัวประกอบ $K$ .....	171
7.33 ไดอะแกรมการออกแบบค่าตัวประกอบปรับเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzyและ ค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS .....	171
7.34 แผนภาพการโปรแกรมของฟังก์ชันวัตถุประสงคเวอรชันที่ 5 .....	173
7.35 ผลการลู่เข้าของ $W$ สำหรับการออกแบบค่าตัวประกอบปรับเอาต์พุตของตัวควบคุม ฟuzzyและค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS .....	174
7.36 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสดชชยบนแกนคิกิว สำหรับการออกแบบในเวอรชันที่ 5 .....	175

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.37 ระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบฮาร์ดแวร์ในรูป.....	176
7.38 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวโดยใช้ตัวควบคุมพีชซีจากการออกแบบด้วยวิธี ATS .....	177
7.39 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $a$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบโดยใช้วิธี ATS.....	178
7.40 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $b$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบโดยใช้วิธี ATS.....	179
7.41 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $c$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบโดยใช้วิธี ATS.....	179
7.42 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ได้จากการออกแบบโดยใช้วิธี ATS .....	180
8.1 กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิว .....	185
8.2 สเปกตรัมขนาดกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิว.....	185
8.3 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error ด้วยวิธีการใหม่.....	187
8.4 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate ด้วยวิธีการใหม่.....	187
8.5 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage ด้วยวิธีการใหม่.....	188
8.6 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวโดยใช้ตัวควบคุมพีชซีจากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่.....	189
8.7 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $a$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบโดยใช้วิธีการใหม่.....	190
8.8 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $b$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบโดยใช้วิธีการใหม่.....	190
8.9 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $c$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบโดยใช้วิธีการใหม่.....	191
8.10 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง.....	191
8.11 ระบบใหม่กรณีที่ 1 .....	193

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.12	กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิวของระบบใหม่กรณีที่ 1..... 194
8.13	สเปกตรัมขนาดกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิวของระบบใหม่กรณีที่ 1..... 194
8.14	ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1 ..... 195
8.15	ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1 ..... 196
8.16	ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1 ..... 196
8.17	ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว โดยใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1 ..... 198
8.18	ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $a$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชย ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1..... 198
8.19	ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $b$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชย ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1..... 199
8.20	ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $c$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชย ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1..... 199
8.21	ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัลไฟตรงสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1 ..... 200
8.22	ระบบใหม่กรณีที่ 2 ..... 201
8.23	กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิวของระบบใหม่กรณีที่ 2..... 202
8.24	สเปกตรัมขนาดกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิวของระบบใหม่กรณีที่ 2..... 202
8.25	ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2 ..... 203
8.26	ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2 ..... 204
8.27	ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2 ..... 204
8.28	ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว โดยใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2 ..... 205

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.29 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $a$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชย ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2.....	206
8.30 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $b$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชย ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2.....	207
8.31 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $c$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชย ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2.....	207
8.32 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2 .....	208
8.33 ระบบใหม่กรณีที่ 3 .....	209
8.34 กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิวของระบบใหม่กรณีที่ 3.....	211
8.35 สเปกตรัมขนาดกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิวของระบบใหม่กรณีที่ 3.....	211
8.36 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3 .....	212
8.37 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3 .....	213
8.38 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3 .....	213
8.39 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว โดยใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3.....	214
8.40 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $a$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชย ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3.....	215
8.41 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $b$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชย ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3.....	215
8.42 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส $c$ กรณีการควบคุมกระแสชดเชย ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3.....	216
8.43 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3 .....	217
9.1 ระบบควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว.....	220
9.2 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต error $E$ ของพีชชีช่วย.....	222



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.3	ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต factor $K$ ของฟuzzyช่วย.....222
9.4	ระบบที่พิจารณากรณีโหนดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า .....225
9.5	ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy โดยไม่มีฟuzzyช่วยกรณีโหนดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า .....226
9.6	ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy โดยไม่มีฟuzzyช่วยกรณีโหนดที่พิจารณา.....227
9.7	ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy โดยไม่มีฟuzzyช่วยกรณีโหนดมีขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลง.....228
9.8	ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy โดยไม่มีฟuzzyช่วยกรณีโหนดมีขนาดกระแสไฟฟ้ามากขึ้น.....228
9.9	ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy แบบปรับตัวกรณีโหนดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า.....230
9.10	ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy แบบปรับตัวกรณีโหนดที่พิจารณา.....231
9.11	ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy แบบปรับตัวกรณีโหนดมีขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลง.....231
9.12	ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy แบบปรับตัวกรณีโหนดมีขนาดกระแสไฟฟ้ามากขึ้น .....232
9.13	ระบบที่พิจารณากรณีโหนดมีการเปลี่ยนแปลงจากวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหนด $R_L$ อนุกรมกับ $L_L$ เป็นโหนดกระแสทางอุดมคติ .....235
9.14	ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy โดยไม่มีฟuzzyช่วยกรณีโหนดเปลี่ยนเป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติ .....236
9.15	ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy โดยไม่มีฟuzzyช่วยกรณีโหนดกระแสทางอุดมคติ .....236
9.16	ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy แบบปรับตัวกรณีโหนดเปลี่ยนเป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติ .....237

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.17 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชี แบบปรับตัวกรณีโหลดกระแสทางอุดมคติ.....	238
10.1 ระบบที่พิจารณาสร้างเป็นระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิก ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	242
10.2 การคำนวณระบบควบคุมภายในบอร์ด eZdsp™ F28335.....	242
10.3 ระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	243
10.4 หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้ รุ่น IBC-VR3000-3 .....	243
10.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ไดโอด รุ่น VS-26MT160 .....	244
10.6 ชุดโหลดโหลดไฟฟ้ากระแสตรง .....	244
10.7 ตัวเหนี่ยวนำ $L_L$ ขนาดเท่ากับ 0.5 H .....	245
10.8 วงจรไอจีบีทีอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า รุ่น 6MBP50RA120-55 .....	245
10.9 ตัวเก็บประจุ $C_{dc}$ ขนาดเท่ากับ 2300 $\mu$ F .....	246
10.10 ตัวเหนี่ยวนำ $L_f$ ขนาดเท่ากับ 18 mH .....	246
10.11 ค่าความต้านทานเท่ากับ 200 $\Omega$ และค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 0.5 $\mu$ F .....	247
10.12 ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า รุ่น HC-PSG30V4B15 .....	248
10.13 ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟ้า .....	248
10.14 ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง .....	249
10.15 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของบอร์ด eZdsp™ F28335.....	249
10.16 ช่องสัญญาณอินพุตแอนะล็อกของบอร์ด eZdsp™ F28335.....	250
10.17 พอร์ต P2 ของบอร์ด eZdsp™ F28335.....	252
10.18 ไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก เบอร์ DAC712P .....	252
10.19 การเชื่อมต่อไอซี DAC712P กับพอร์ต P2 บอร์ด eZdsp™ F28335 .....	253
10.20 ไดอะแกรมวงจรสร้างสัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยม .....	256
10.21 ไดอะแกรมวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ.....	256
10.22 ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741CN และไอซีวงจรเปรียบเทียบเบอร์ LM311N.....	256
10.23 แผนภูมิการโปรแกรมระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	257

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
10.24 ผลการเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายและแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC .....	259
10.25 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณ PLL .....	260
10.26 ไดอะแกรมเวลาที่ใช้ในการคำนวณโปรแกรมระบบควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟ .....	261
10.27 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $a$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีไหล $R_L$ เท่ากับ $120 \Omega$ .....	263
10.28 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $b$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีไหล $R_L$ เท่ากับ $120 \Omega$ .....	263
10.29 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $c$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีไหล $R_L$ เท่ากับ $120 \Omega$ .....	264
10.30 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $a$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมพีซีกรณีไหล $R_L$ เท่ากับ $120 \Omega$ .....	265
10.31 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $b$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมพีซีกรณีไหล $R_L$ เท่ากับ $120 \Omega$ .....	265
10.32 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $c$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมพีซีกรณีไหล $R_L$ เท่ากับ $120 \Omega$ .....	266
10.33 ผลค่าแรงดันบัลไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีไหล $R_L$ เท่ากับ $120 \Omega$ .....	266
10.34 ผลค่าแรงดันบัลไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมพีซีกรณีไหล $R_L$ เท่ากับ $120 \Omega$ .....	267
10.35 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $a$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีไหล $R_L$ เท่ากับ $80 \Omega$ .....	268
10.36 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $b$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีไหล $R_L$ เท่ากับ $80 \Omega$ .....	268
10.37 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $c$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีไหล $R_L$ เท่ากับ $80 \Omega$ .....	269

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
10.38 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $a$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $80 \Omega$ .....	269
10.39 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $b$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $80 \Omega$ .....	270
10.40 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $c$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $80 \Omega$ .....	270
10.41 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $80 \Omega$ .....	271
10.42 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $80 \Omega$ .....	271
10.43 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $a$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $60 \Omega$ .....	272
10.44 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $b$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $60 \Omega$ .....	273
10.45 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $c$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $60 \Omega$ .....	273
10.46 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $a$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $60 \Omega$ .....	274
10.47 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $b$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $60 \Omega$ .....	274
10.48 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $c$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $60 \Omega$ .....	275
10.49 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $60 \Omega$ .....	275
10.50 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $60 \Omega$ .....	276

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
10.51 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $a$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ ตัวควบคุมพีชซีกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า.....	278
10.52 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $b$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ ตัวควบคุมพีชซีกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า.....	279
10.53 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $c$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ ตัวควบคุมพีชซีกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า.....	280
10.54 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี กรณีโหลดที่พิจารณา .....	281
10.55 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี กรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลง .....	282
10.56 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี กรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้ามากขึ้น .....	283
10.57 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $a$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า.....	285
10.58 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $b$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า .....	286
10.59 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส $c$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า .....	287
10.60 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี แบบปรับตัวกรณีโหลดที่พิจารณา .....	288
10.61 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี แบบปรับตัวกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลง.....	289
10.62 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี แบบปรับตัวกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้ามากขึ้น .....	290
10.63 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี กรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า .....	292

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

10.64 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซี	
แบบปรับตัวกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า .....	292

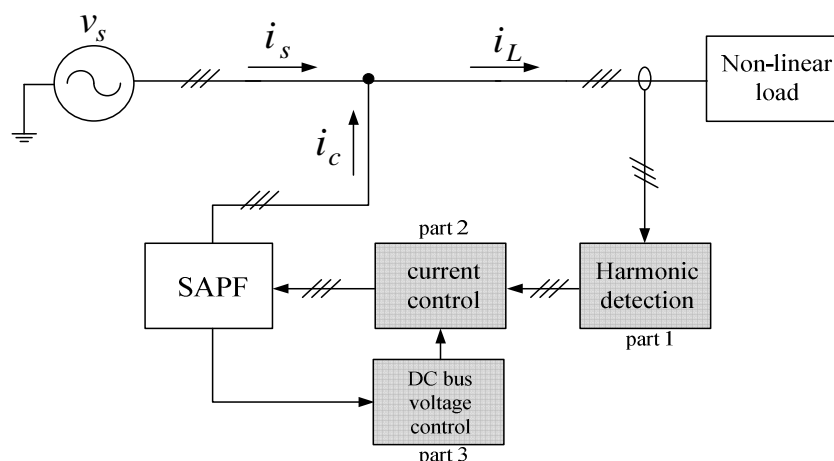


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในโรงงานอุตสาหกรรม สำนักงาน และบ้านพักอาศัยต่าง ๆ ได้ต่อใช้งานโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นจำนวนมาก ดังเช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ หลอดฟลูออเรสเซนต์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ วงจรคอนเวอร์เตอร์ วงจรชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ค หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น การใช้งานโหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งด้านไฟฟ้า เนื่องจากปัญหาดังกล่าวก่อให้เกิดผลเสียหลายประการ เช่น เกิดกำลังงานสูญเสียที่สายส่งและภายในตัวอุปกรณ์ไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์ป้องกันและมิเตอร์วัดไฟฟ้าทำงานผิดพลาด และทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มีอายุการใช้งานสั้นลง เป็นต้น (IEEE std. 519-1992.,1993, Rice D.C.,1986, Brozek J.P.,1990, Wagner V.E. and et al., 1993) จากผลเสียดังกล่าวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกให้หมดไปหรือลดน้อยลงเพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณภาพทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น การกำจัดฮาร์มอนิกที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ และ การใช้วงจรกรองกำลังไฮบริด แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นและพัฒนากำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกสูง และมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังได้ดีกว่าการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ อีกทั้งยังไม่ประสบปัญหาจากสภาวะเรโซแนนซ์ (Jou H-L. and et al., 2001) สำหรับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่นิยมใช้มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ โครงสร้างแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage source inverter) (Akagi H.,1996) และ โครงสร้างแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (current source inverter) (Hayachi Y. and et al., 1991) โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้เลือกโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ทั้งนี้เนื่องจากวงจรดังกล่าว สามารถควบคุมการทำงานที่กระแสชดเชยได้ง่าย ให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี และมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าดีกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Benchaita L. and et al., 1999, Routimo M. and et al., 2007)



รูปที่ 1.1 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

การควบคุมการบิดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยส่วนแรก คือ การตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งในปัจจุบันมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (Akagi H. and et al., 1984) วิธีแกนหมุนดีคิว (Takeda M. and et al., 1988) วิธีเอสดี (Lin C.E. and et al., 1992) วิธีกรอบอ้างอิง  $a-b-c$  (Chang and Chen, 2000) วิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (EI-Habrouk M. and Darwish M.K., 2001) และวิธีฟูรีเยร์ดีคิว (Sujitjorn S. and et al., 2007) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดี โดยวิธีดังกล่าวได้นำข้อดีของวิธีเอสดีและวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อนรวมเข้าด้วยกัน ทั้งนี้เพื่อเพิ่มสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกให้ดียิ่งขึ้น ส่วนที่สอง คือ การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งถือเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่ง ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิผลการกำจัดฮาร์มอนิกจะขึ้นอยู่กับสมรรถนะของตัวควบคุมที่เลือกใช้ ได้แก่ ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) (Santiprapan P. and et al., 2011) ตัวควบคุมฮิสเทอรีซิส (Hysteresis controller) (Narongrit T. and et al., 2011) ตัวควบคุมแบบพยากรณ์ (Predictive controller) (Tiyarachakun S. and et al., 2014) และตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy controller) (Prasomsak P. and et al., 2011) เป็นต้น โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมฟัซซีสำหรับควบคุมกระแสชดเชย เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวสามารถให้ประสิทธิผลการควบคุมที่ดีและเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมที่มีความซับซ้อน คลุมเครือไม่เป็นเชิงเส้น และไม่จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำในการออกแบบตัวควบคุม สำหรับส่วนสุดท้ายของการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟ คือ การควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้มีค่าตรงตามค่าแรงดันอ้างอิง ทั้งนี้เพื่อให้การบิดกระแส



ชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟมีประสิทธิผลที่ดีตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงนิยมใช้ตัวควบคุมหลายชนิดด้วยกัน เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอ (Rahmani S. and et al., 2010) และตัวควบคุมพีซี (Bhende C. N. and et al., 2006) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับใช้ควบคุมค่าแรงดันดังกล่าว เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีและเพียงพอต่อการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

การออกแบบตัวควบคุมพีซีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟในปัจจุบันนิยมใช้วิธีการค้นหาค่าเหมาะที่สุดทางปัญญาระดับสูง เช่น วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (GA) (Wu C-J. and Liu G-Y., 1999) วิธีการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) (Fang G. and et al., 2008) และวิธีการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS) (Prasomsak P. and et al., 2011) เป็นต้น โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพัฒนาการออกแบบตัวควบคุมพีซีด้วยวิธี ATS เช่นกัน อย่างไรก็ตาม การออกแบบตัวควบคุมพีซีด้วยวิธี ATS ดังกล่าว จำเป็นต้องอาศัยการกำหนดขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และใช้เวลานานในการออกแบบ รวมถึงมีความจำเป็นต้องใช้หน่วยความจำของ ATS จำนวนมากเพื่อใช้จัดเก็บข้อมูลและประเมินผลคำตอบ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้คิดค้นและนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีซีด้วยวิธีการใหม่ โดยอาศัยการคำนวณที่ง่าย และไม่จำเป็นต้องใช้ความชำนาญหรือประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งยังไม่เคยปรากฏมาก่อน

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟรวมกับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีที่ได้ออกแบบไว้ที่จุดการทำงานนั้น ๆ สำหรับระบบที่พิจารณาอาจจะมีสมรรถนะการควบคุมที่ไม่ดีพอในกรณีที่โหลดเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัว ซึ่งประกอบด้วย ตัวควบคุมพีซี และพีซีช่วย โดยการใช้ตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัวดังกล่าวจะช่วยให้สามารถควบคุมกระแสชดเชยที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องทำการออกแบบตัวควบคุมพีซีใหม่ ซึ่งจะทำให้การกำจัดฮาร์มอนิกเป็นไปอย่างต่อเนื่อง การออกแบบพีซีช่วยของตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัวโดยใช้วิธีการที่คิดค้นขึ้นใหม่จะได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เช่นกัน

การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมและประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบก่อนดำเนินการสร้างจริงเพื่อทดสอบในทางปฏิบัติถือเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อช่วยป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในระบบที่อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากผลของตัวควบคุมที่มีสมรรถนะการควบคุมไม่ดี ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเล็งเห็นความสำคัญและได้เลือกใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ซึ่งจะช่วยให้ได้ผลการจำลองสถานการณ์มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบฮาร์ดแวร์จริงมากกว่าการจำลองสถานการณ์ด้วย

คอมพิวเตอร์ทั้งหมด การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่เลือกใช้สำหรับการสร้างตัวควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟจริงในทางปฏิบัติ

นอกจากนี้เพื่อเป็นการพิสูจน์ผลการก้าจัดฮาร์ดมอริกในทางปฏิบัติ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการสร้างระบบฮาร์ดแวร์การก้าจัดฮาร์ดมอริกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ และได้ทำการทดสอบระบบดังกล่าว โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกับการใช้ตัวควบคุมพีชชีในกรณีที่โหลดของระบบมีขนาดกระแสไฟฟ้าต่างกัน และกรณีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีกับการใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ด้านการก้าจัดฮาร์ดมอริกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.2.2 เพื่อทำการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์ดมอริกด้วยวิธีการตรวจจับเชิงโครนอสหรือวิธีเอสดีให้ดีขึ้นกว่าเดิม

1.2.3 เพื่อศึกษาการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธีสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็มบนแกนดีคิว

1.2.4 เพื่อศึกษาค้นคว้าความรู้ใหม่ในการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่าวิธีการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS)

1.2.5 เพื่อศึกษาค้นคว้าความรู้ใหม่ในการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีด้วยวิธีการใหม่สำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

1.2.6 เพื่อศึกษาค้นคว้าความรู้ใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมพีชชีให้สามารถปรับตัวได้เมื่อโหลดฮาร์ดมอริกมีการเปลี่ยนแปลง

1.2.7 เพื่อสร้างระบบจำลองสถานการณ์การก้าจัดฮาร์ดมอริกแบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware In the Loop: HIL)

1.2.8 เพื่อสร้างต้นแบบระบบฮาร์ดแวร์การก้าจัดฮาร์ดมอริกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

### 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

1.3.2 การวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกมุ่งเน้นที่การปรับแก้กระแสฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียว

1.3.3 การวัดประสิทธิภาพผลการกำจัดฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ค่า  $%THD$  เท่านั้น และค่าดังกล่าวจะต้องมีค่าลดลงภายหลังการชดเชย

1.3.4 การควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีชชีร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธีสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม

1.3.5 การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

1.3.6 ระบบที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์พิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล

1.3.7 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB

1.3.8 การสร้างระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้บอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุลเท่านั้น

1.4.2 แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายพิจารณาในกรณีรูปสัญญาณแรงดันไม่มีฮาร์มอนิก และอยู่ในสภาวะสมดุลทั้งขนาดและเฟส

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.5.2 ได้โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนโปรแกรม Simulink

1.5.3 ได้วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกวิธีฟูริเยร์เอสดีที่มีสมรรถนะดีขึ้นกว่าเดิม

1.5.4 ได้องค์ความรู้ในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิวที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธีสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม

1.5.5 ต้องค้ความรู้ใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมพีชชีและวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธีการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว

1.5.6 ต้องค้ความรู้ใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมพีชชีโดยใช้วิธีการที่คิดค้นขึ้นใหม่

1.5.7 ต้องค้ความรู้ใหม่ในการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยแบบปรับตัวได้เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

1.5.8 ได้โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ระบบก้าจัดฮาร์โมนิกแบบฮาร์ดแวร์ในลูป

1.5.9 ได้ต้นแบบระบบฮาร์ดแวร์การก้าจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.5.10 ได้บทความวิจัยเผยแพร่ระดับชาติหรือนานาชาติ

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

รายงานนี้ประกอบด้วย 11 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย รวมถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

บทที่ 3 นำเสนอการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดีสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟ

บทที่ 4 นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบระบบควบคุมของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

บทที่ 5 นำเสนอการควบคุมแบบพีชชีสำหรับควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

บทที่ 6 นำเสนอเทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

บทที่ 7 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีชชีโดยใช้วิธีการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว

บทที่ 8 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีชชีด้วยวิธีการใหม่

บทที่ 9 นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว

บทที่ 10 นำเสนอระบบฮาร์ดแวร์การก้าจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟ

บทที่ 11 บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 5 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดโค้ดโปรแกรมการจำลองสถานการณ์แบบจำลองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยโปรแกรม M-file ของ MATLAB ภาคผนวก ข. แสดงรายละเอียดโค้ดโปรแกรมภาษาซีการทดสอบการรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™F28335 ภาคผนวก ค. แสดงโค้ดโปรแกรมการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมพีชซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนโปรแกรม M-file ภาคผนวก ง. แสดงรายละเอียดโค้ดโปรแกรมภาษาซีการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยบอร์ด eZdsp™F28335 และภาคผนวก จ. แสดงรายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา



## บทที่ 2

### การสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุม วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน

#### 2.1 กล่าวนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการวิจัยด้านการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ซึ่งในอดีตที่ผ่านมา งานวิจัยด้านดังกล่าว ได้มีผู้วิจัยคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน ดังนั้น ในบทนี้จะนำเสนอการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน รวมถึงแนวทางการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการ การสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมดังกล่าว สามารถอธิบายได้ต่อไปนี้

#### 2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรรอกกำลังแอกทีฟ แบบขนาน

การสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรม หรือบทความงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน ได้แบ่งหัวข้อการสำรวจออกเป็น 6 หัวข้อ คือ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการสวิตซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบวิธีสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม (SVPWM) ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีชซี ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟและตัวควบคุมพีชซี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีบอร์ด DSP สำหรับใช้สร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยแต่ละหัวข้อผู้วิจัยจะนำเสนอในรูปแบบตาราง และเรียงลำดับปีที่ทำการตีพิมพ์ รวมถึงการอธิบายสรุปสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป ดังตารางที่ 2.1 ถึงตารางที่ 2.6 ตามลำดับหัวข้อการสำรวจ ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ  
วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	1984	Akagi H., Kanazawa Y., and Nabae A.	นำเสนอานิยามต่าง ๆ ของทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟ ขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power theory หรือ PQ) และขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับการคำนวณหาค่ากำลังรีแอกทีฟและค่ากระแส อ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอก ทีฟ โดยพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุล
2	1988	Takeda M., Ikeda K., Teramoto A., and Aritsuka T.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีแกนหมุนดิกิว (DQ-axis) หรือวิธี DQ สำหรับการคำนวณหาค่า กระแสอ้างอิงที่สามารถชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟได้ ให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยพิจารณาระบบ ไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุล
3	1992	Lin C. E., Chen C. L., and Huang C. L.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับ ซิงโครนัส (Synchronous Detection) หรือวิธี SD ที่ แบ่งออกได้ 3 รูปแบบ คือ การตรวจจับซิงโครนัส แบบกระแสเท่ากัน (CSD) แบบกำลังเท่ากัน (PSD) และแบบอิมพีแดนซ์เท่ากัน (ZSD) เพื่อคำนวณหา ค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรกรอง กำลังแอกทีฟ โดยพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส แบบไม่สมดุล
4	1994	Chen C. L., Lin C. E., and Huang C. L.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี CSD สำหรับ คำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย โดย พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบไม่สมดุล

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ  
วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
5	1995	Jou H-L.	นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก 3 วิธี คือ วิธี PQ วิธี CSD และวิธี PSD + voltage filter ซึ่งผลการเปรียบเทียบ พบว่า ทั้ง 3 วิธี ให้ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกดีใกล้เคียงกัน ในกรณีระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุล และวิธี CSD และวิธี PSD + voltage filter ให้ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกดีกว่าวิธี PQ ในกรณีระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไม่สมดุล นอกจากนี้ วิธี PSD + voltage filter ให้ผลที่ดีกว่าอีกสองวิธีที่เหลือ ในกรณีระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่มีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายผิดเพี้ยนไปจากไซน์
6	1996	Peng F. Z, and Lai J-S	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ รูปแบบทั่วไป สำหรับการคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบไม่สมดุล
7	2000	Chang G.W and Chen S.K.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงเฟส $a-b-c$ ( $a-b-c$ reference frame) หรือวิธี $a-b-c$ สำหรับการคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุล
8	2000	Zhang B., Yi S.,and He X.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี $DQ_k$ ที่พัฒนาจากวิธี DQ ซึ่งวิธีดังกล่าว สามารถเลือกการตรวจจับฮาร์มอนิกเฉพาะบางอันดับได้ (อันดับที่ $k$ ) โดยพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุล



ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ  
วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
9	2001	EI-Habrouk M.and Darwish M.K.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี Sliding Window Fourier Analysis) หรือวิธี SWFA สำหรับคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ วิธีนี้ได้ปรับการคำนวณให้เร็วกว่าวิธี FFT โดยทำการคำนวณเพียงองค์ประกอบมูลฐานของกระแส และนำไปหักลบกับค่ากระแสโหลดทั้งหมด ซึ่งผลที่ได้คือ ค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย โดยพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส
10	2002	Chang G. W.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี $a-b-c$ สำหรับคำนวณค่ากระแสอ้างอิงที่สามารถชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟได้ โดยพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบไม่สมดุล
11	2002	Chang G. W. and Shee T-C.	นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก 4 วิธี คือ วิธี PQ วิธี DQ วิธี SD และวิธี $a-b-c$ โดยทำการเปรียบเทียบทดสอบกับ 2 ระบบ คือ ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแบบสมดุล และระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแบบไม่สมดุล ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า ในกรณีระบบที่ 1 ทุกวิธีให้ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกดีใกล้เคียงกัน ส่วนกรณีระบบที่ 2 พบว่า วิธี DQ และวิธี SD ให้ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี PQ และ วิธี $a-b-c$

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ  
วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
12	2004	Chen D. and Xie S.	นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก 2 วิธี คือ วิธี PQ กับวิธี DQ โดยทำการเปรียบเทียบ 4 ประเด็น ได้แก่ ผลของความเพี้ยนแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ผลของโหลดชนิดไม่สมดุล ความซับซ้อนในการคำนวณ และการชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟ ซึ่งผลการเปรียบเทียบในประเด็นที่ 1 และ 2 พบว่า วิธี DQ ดีกว่าวิธี PQ ในขณะที่ประเด็นที่ 4 วิธี DQ ดีกว่าวิธี PQ และทั้งสองวิธีมีการคำนวณซับซ้อนใกล้เคียงกัน
13	2007	Mahesh K.M., Arindam G., Avinash J., and Hiralal M. S.	นำเสนอทดสอบการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD ทั้งสามรูปแบบ คือ วิธี CSD วิธี PSD และวิธี ZSD กับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแบบไม่สมดุล และแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายผิดเพี้ยนไปจากไซน์ ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า วิธี CSD คือ วิธีเดียวที่สามารถปรับให้กระแสที่แหล่งจ่ายกลับมาเป็นไซน์สมดุลได้หลังการชดเชย
14	2007	Sujitjorn S., Areerak K-L., and Kulworawanichpong T.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์ดีคิว (DQ axis with Fourier) หรือวิธี DQF โดยมีการเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกกับอีก 2 วิธี คือ วิธี DQ และวิธี SWFA ซึ่งผลการเปรียบเทียบ พบว่า วิธี DQF ให้ผลการตรวจจับดีกว่าอีกสองวิธีที่เหลือ และสามารถปรับให้ระบบไฟฟ้ากำลังกลับมาอยู่ในสถานะสมดุลได้หลังการชดเชย โดยพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบไม่สมดุล
15	2011	Yilin Y., Yonghai X. and Xioabo L	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA สำหรับการคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย ในกรณีตรวจจับฮาร์มอนิกทุกอันดับ และบางอันดับ

จากตารางที่ 2.1 ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ พบว่า วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ให้ประสิทธิภาพการตรวจจับดีและนิยมอย่างแพร่หลายมาถึงปัจจุบัน คือ วิธี PQ วิธี DQ วิธี SD แต่ถ้าพิจารณาถึงความซับซ้อนของการคำนวณ พบว่า วิธี SD มีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธี PQ และวิธี DQ อีกทั้งวิธี SD ยังมีรูปแบบที่หลากหลาย ได้แก่ วิธี CSD PSD และ ZSD ซึ่งผู้วิจัยสามารถเลือกใช้ได้ตามวัตถุประสงค์ของการชดเชย อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของวิธี SD (รวมถึงวิธี PQ และวิธี DQ) คือ วิธีดังกล่าวใช้วงจรกรอง (filter) สำหรับการแยกปริมาณฮาร์มอนิก ซึ่งถ้าเลือกวงจรกรองที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกได้ ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีแผนพัฒนาวิธี SD ให้ดียิ่งขึ้น โดยจากการสำรวจพบว่า วิธี SWFA ให้สมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่ดีกว่าการใช้วงจรกรอง ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยจะนำวิธี SWFA มาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธี SD เพื่อเพิ่มสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกของวิธี SD ให้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบวิธีสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	1994	Espinoza J.R., Joos G. and Jin H.	นำเสนอขั้นตอนการคำนวณและการสร้างเทคนิคการสวิตช์แบบวิธีสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม (Space Vector PWM) หรือวิธี SVPWM สำหรับควบคุมสวิตช์ไอจีบีทีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยวิธี SVPWM ทำให้เกิดปริมาณฮาร์มอนิกเนื่องจากผลการสวิตช์น้อย และให้ขนาดแรงดันเอาต์พุตของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสูงกว่าวิธี PWM นอกจากนี้วิธี SVPWM ยังง่ายต่อการโปรแกรมทางดิจิทัลอีกด้วย
2	2004	Jianze W., Fenghua P., Qitao W, Yanchao Y. and Du Y.	นำเสนอการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM โดยได้รายงานถึงข้อดีของวิธี SVPWM ว่า สามารถคำนวณบนบอร์ด DSP ได้ง่าย และใช้งานได้ดีกับระบบการควบคุมแบบเวลาจริง (real time)

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบวิธีสเปซเวกเตอร์พีดีบีเบิลยูเอ็ม (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
3	2005	Rathnakumar D. LakshmanaPerumal J. and Srinivasan T.	นำเสนอขั้นตอนการคำนวณเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM สำหรับใช้ควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟ (โครงสร้างเดียวกับวงจรรองกำลังแอกทีฟ) โดยได้รายงานถึงข้อดีของวิธี SVPWM เช่น สามารถให้ประสิทธิภาพการควบคุมที่ดี สามารถดึงใช้ค่าแรงดันบัสไฟตรงให้เกิดประโยชน์สูง (dc-link utilization) แรงดันเอาต์พุตของวงจรรองกำลังแอกทีฟมีปริมาณฮาร์มอนิกน้อย และกำลังงานสูญเสียเนื่องจากผลการสวิตช์มีค่าน้อยกว่าวิธี PWM
4	2008	Yong W., Fuhua Y. and Miao G.	นำเสนอการสร้างระบบควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้เทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM เนื่องจากวิธี SVPWM เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงง่ายต่อการดำเนินการสร้าง และมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบได้ดี
5	2010	Wang L-P, Shi Z-Y, and Yang D-Z	นำเสนอการใช้เทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM สำหรับควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟ เนื่องจากวิธี SVPWM ให้ประสิทธิภาพในการสวิตช์สูง ปริมาณฮาร์มอนิกเนื่องจากผลการสวิตช์มีค่าน้อยกว่าวิธี PWM และผลการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟกรณีใช้วิธี SVPWM ให้ผลค่า %THD น้อยกว่ากรณีใช้วิธี PWM

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบวิธีสเปซ  
เวกเตอร์พีคดับเบิลยูเอ็ม (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
6	2010	Kumar K. V., Michael P. A., John J.P. and Kumar S. S.	นำเสนอการเปรียบเทียบเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM กับวิธี PWM สำหรับใช้ควบคุมวงจรรองอินเวอร์เตอร์ (โครงสร้างเดียวกับวงจรรองกำลังแอกทีฟ) ซึ่งผลการเปรียบเทียบ พบว่า วิธี SVPWM ให้ผลขนาดแรงดันเอาต์พุตของวงจรรองอินเวอร์เตอร์สูงกว่าวิธี PWM และวิธี SVPWM ทำให้เกิดปริมาณฮาร์มอนิกเนื่องจากผลการสวิตช์น้อยกว่าวิธี PWM
7	2010	Viswanath N. and Kapoor A.K.	นำเสนอการเปรียบเทียบเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM กับวิธี Hysteresis Current Control (HCC) โดยผลการเปรียบเทียบ พบว่า วิธี SVPWM ให้ประสิทธิภาพการสวิตช์วงจรรองกำลังแอกทีฟดีกว่าวิธี HCC ในกรณีโหลดฮาร์มอนิกเป็นวงจรเรียงกระแสที่มีโหลด RL และทั้งสองวิธีให้ประสิทธิภาพการสวิตช์ที่ดีใกล้เคียงกันในกรณีโหลด RC
8	2010	Kumar T.V. and Rao S.S.	นำเสนอขั้นตอนการคำนวณเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM สำหรับวงจรรองอินเวอร์เตอร์ (โครงสร้างเดียวกับวงจรรองกำลังแอกทีฟ) และเปรียบเทียบวิธี SVPWM กับวิธี PWM ซึ่งผลการเปรียบเทียบ พบว่า วิธี SVPWM ให้ประสิทธิภาพการสวิตช์ที่ดีกว่าวิธี PWM เนื่องจากวิธี SVPWM สามารถให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรรองอินเวอร์เตอร์มากกว่าวิธี PWM และปริมาณฮาร์มอนิกเนื่องจากผลการสวิตช์ของวิธี SVPWM มีค่าน้อยกว่าวิธี PWM

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้บอร์ด DSP รุ่น eZdsp™F28335 สำหรับการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งภายในบอร์ด eZdsp™F28335 ดังกล่าว มีชุดคำสั่ง

สำเร็จรูปของเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM ซึ่งจะช่วยให้ง่ายต่อการโปรแกรมทางดิจิทัลมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้พิจารณาถึงสมรรถนะของเทคนิคการสวิตช์เป็นสิ่งสำคัญด้วยเช่นกัน ซึ่งจากผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM ในตารางที่ 2.2 พบว่า วิธีดังกล่าวสามารถให้ประสิทธิภาพการสวิตช์ที่ดี และสามารถให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมากกว่าวิธี PWM นอกจากนี้ ปริมาณฮาร์มอนิกเนื่องจากผลการสวิตช์ของวิธี SVPWM มีค่าน้อยกว่าวิธี PWM

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2000	Mendalek N.and Al-Haddad K.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ สำหรับใช้ออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรงบนแกนดีคิว ร่วมกับการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) และเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดังกล่าวได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
2	2006	Lenwari W., Sumner M. and Zanchetta P.	นำเสนอระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว โดยระบบควบคุมกระแสชดเชยได้ออกแบบร่วมกับการใช้ตัวควบคุมแบบพีพร้อมกันเรโซแนนซ์ (P+resonant) และเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM ส่วนการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ
3	2009	Zadkhast S. and Mokhtari H.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว สำหรับนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมกระแสชดเชย และตัวควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง (ตัวควบคุมใช้แบบค่า Gain)

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และระบบควบคุมของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
4	2010	Rahmani S., Mendalek N. and Al-Haddad K.	นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว ร่วมกับการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี PWM โดยการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ
5	2010	Hongdong Y., Guangkuo S., Lingzhi C. and Hongfeng Z.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว สำหรับนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชย ร่วมกับการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และตัวควบคุมแบบทำซ้ำ (Repetitive controller)
6	2011	พลลสิทธิ์ สานติประพันธ์	นำเสนองานวิจัยวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว สำหรับการนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ร่วมกับการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี PWM

จากตารางที่ 2.3 ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และระบบควบคุมของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว พบว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัลไฟตรง ซึ่งการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวดังกล่าวมีข้อดี คือ สามารถลดการใช้ตัวควบคุมเหลือเพียง 2 ชุด และการควบคุมรูปสัญญาณกระแสชดเชยบนแกนดีคิวง่ายกว่าการควบคุมบนแกนสามเฟส นอกจากนี้ยังพบว่า ระบบการควบคุมบนแกนดีควนิยมนำไปใช้ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM ซึ่งเป็นวิธีที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีชซี

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2000	Elmitwally A., Abdelkader S., and Ekateb M.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีชซี ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี PWM โดยตัวควบคุมพีชซีดังกล่าวใช้สำหรับการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ
2	2000	Dell'Aquila A., Delvino G., Liserre M., and Zanchetta P.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีชซี เพื่อประมาณหาค่ารอบการทำงาน (duty cycle) ของพัลส์สวิตช์สำหรับควบคุมวงจรรอกกำลังแอกทีฟ นอกจากนี้ ได้มีการเปรียบเทียบกับการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมฮิสเทอรีซิส ซึ่งผลการเปรียบเทียบ พบว่า การควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมฮิสเทอรีซิส
3	2005	Dongmei Y, Qingding G., and Qing H.	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมพีชซีสำหรับการปรับขนาดแถบฮิสเทอรีซิสของตัวควบคุมฮิสเทอรีซิส ซึ่งการปรับขนาดแถบฮิสเทอรีซิสดังกล่าว มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟให้ดียิ่งขึ้น
4	2006	Lee T-S, Tzeng K-S and Chong M-S	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมพีชซีสำหรับการคำนวณปรับค่า $K_p$ และ $K_D$ ของตัวควบคุมแบบ PD iterative learning control ที่เหมาะสม เพื่อใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบบนแกนคิคว



ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้  
ตัวควบคุมพีชซี (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
5	2008	Chen Y. , Fu B. and Li Q.	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมพีชซีสำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ $K_p$ และ $K_i$ ของตัวควบคุมแบบพีไอที่เหมาะสมแบบ online-auto-modulation เพื่อใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ
6	2010	ปรจจรี ประสมศักดิ์	นำเสนองานวิจัยวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีชซีสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี PWM บนแกนสามเฟส
7	2011	Xia L., Taihang D., and Shengxue T.	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมพีชซีปรับขนาดแถบฮิสเตอร์ซิสของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส สำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยการปรับขนาดแถบฮิสเตอร์ซิสดังกล่าวเพื่อให้ค่าความถี่ของการสวิตช์มีค่าคงที่ตลอดการควบคุม
8	2011	Georgios T., and Georgios A.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมพีชซีร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส โดยตัวควบคุมพีชซีดังกล่าว ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าขนาดความผิดพลาดของกระแสชดเชยค่าใหม่ที่เหมาะสมสำหรับเป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสเพื่อสร้างพัลส์ควบคุมให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ
9	2012	Fei J. and Hou S.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวได้ โดยการปรับตัวดังกล่าว คือ การปรับกฎภายในตัวควบคุมพีชซี เพื่อเพิ่มสมรรถนะการควบคุมให้ดียิ่งขึ้น และรักษาเสถียรภาพของระบบ

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีชซี (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
10	2014	Musa S. Radzi M.A.M. Hisham H. and Abdulwahab N.I.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมพีชซี ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี PWM บนแกนสามเฟส โดยตัวควบคุมพีชซีดังกล่าว ใช้สำหรับการคำนวณค่าเอาต์พุตแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์สำหรับนำไปเปรียบเทียบกับรูปสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อสร้างพัลส์สวิตช์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยวงจรรอกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีชซีดังตารางที่ 2.4 พบว่า ตัวควบคุมพีชซีได้ถูกนำมาใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟหลายรูปแบบ เช่น การนำมาใช้เป็นตัวควบคุมหลักในการควบคุมกระแสชดเชยโดยตรง หรือการใช้ตัวควบคุมพีชซีสำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมหลักในระบบควบคุมกระแสชดเชย ทั้งนี้เพื่อให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยดียิ่งขึ้น จากการสำรวจดังกล่าว ถือเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัยในการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยที่สามารถปรับตัวได้เมื่อโหลดฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟและตัวควบคุมพีชซี

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	1997	Ingram, D.M.E. and Round S.D.	นำเสนอการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรอก ( $L_f$ ) ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยอาศัยการเลือกค่าที่มีขนาดไม่เกินค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ( $L_{f,min}$ ) ที่ทำให้วงจรรอกกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง
2	1998	Thomas T., Haddad K., Joos G. and Jaafari	นำเสนอการออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี ( $C_{dc}$ ) ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยการเลือกค่าที่มากกว่าค่าตัวเก็บประจุต่ำสุด ( $C_{dc,min}$ ) ที่คำนวณโดยสมการที่เกี่ยวข้องกับค่ากำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรองกำลังแอกทีฟ  
และตัวควบคุมพีชซี (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
3	1999	Benchaita L., Saadate S. and Nia A.S	นำเสนอการออกแบบค่าแรงดันบัลไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ของ วงจรรองกำลังแอกทีฟ โดยการเลือกค่าที่มีขนาด มากกว่า 1.5 เท่าของค่าขอดแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC
4	1999	Wu C-J. and Liu G-Y.	นำเสนอการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัว ควบคุมพีชซีแบบเหมาะสมที่สุด โดยใช้วิธีเจเนติก อัลกอริทึม (genetic algorithm) หรือวิธี GA
5	2008	Fang G., Kwok N. M. and Ha Q.	นำเสนอการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัว ควบคุมพีชซีแบบเหมาะสมที่สุด โดยใช้วิธีการหาค่า เหมาะสมที่สุดแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (partical swram optimaization) หรือวิธี PSO

จากตารางที่ 2.5 พบว่า ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรองกำลังแอกทีฟ  
ได้แก่ ค่าแรงดันบัลไฟตรง ค่าตัวเก็บประจุดีซี และค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรอง จะอาศัยวิธีการ  
ออกแบบที่ง่าย โดยใช้สมการการคำนวณไม่ซับซ้อนร่วมกับการกำหนดเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมกับ  
ระบบ นอกจากนี้ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมพีชซี พบว่า จะนิยมใช้วิธีการ  
ค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยในการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัว  
ควบคุมพีชซี เช่น วิธี GA วิธี PSO และวิธี ATS โดยจากผลการสำรวจยังไม่ปรากฏวิธีการออกแบบ  
ตัวควบคุมพีชซีวิธีอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีแผนการคิดค้นวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีชซีวิธีใหม่  
สำหรับนำไปใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

ตารางที่ 2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีบอร์ด DSP สำหรับใช้สร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟ

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2000	Mzhmoum M. and Bruyant N.	นำเสนอการสร้างระบบควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟส โดยใช้บอร์ด DSP ซีพียู TMS320C40 (50 MHz) สำหรับการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และสร้างตัวควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง (RST controller) ส่วนการควบคุมกระแสชดเชยได้ใช้ตัวควบคุมแบบพีโอร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี PWM ที่สร้างด้วยวงจรถอด
2	2009	Taihang D., Yongsheng C., Shuguang S., and Jinwei W.	นำเสนอการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟสโดยใช้บอร์ด DSP ซีพียู TMS320F2812 (150 MHz , 18 kB RAM) สำหรับการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี $i_p-i_q$ การควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส และการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีโอ
3	2009	Kesler M. and Ozdemir E.	นำเสนอการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟส โดยใช้บอร์ด DSP ซีพียู TMS320F28335 (150 MHz, 68 kB RAM) สำหรับการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ การควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส และการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีโอ

จากผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีบอร์ด DSP สำหรับใช้สร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟดังตารางที่ 2.6 พบว่า บอร์ด DSP ซีพียู TMS320F28335 ที่มีความเร็วในการประมวลผลสูงเท่ากับ 150 MHz และมีหน่วยความจำหลัก (RAM) มากที่สุดเท่ากับ 68 kB เหมาะกับการใช้คำนวณระบบการควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟที่มีความซับซ้อนและต้องการความเร็วในการประมวลผลสูง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้บอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ซึ่ง

ใช้ซีพียู TMS320F2833 ในการประมวลผล สำหรับการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมกรองกำลัง แยกทีฟในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

### 2.3 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้นำเสนอในบทนี้ คือ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรกรองกำลังแยกทีฟแบบขนานในส่วนต่าง ๆ ซึ่งทุกผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในบทนี้เป็นประโยชน์และสำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัย สำหรับการดำเนินการวิจัย คิดค้น และพัฒนางานวิจัยด้านการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแยกทีฟให้ดียิ่งขึ้นต่อไป



## บทที่ 3

### การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดี สำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

#### 3.1 กล่าวนำ

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟจำเป็นต้องมีการตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยในปัจจุบันมีวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกหลายวิธี ได้แก่ วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (Akagi H. and et al., 1984) วิธีแกนหมุนสี่คว (Takeda M. and et al., 1988) วิธีเอสดี (Lin C.E. and et al., 1992) วิธีกรอบอ้างอิง  $a-b-c$  (Chang and Chen, 2000) วิธีวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (EI-Habrouk and Darwish, 2001) และวิธีฟูรีเยร์สี่คว (Sujitjorn S. and et al., 2007) เป็นต้น โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับวิธีเอสดี เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่มีสมรรถนะในการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดี อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบได้ภายหลังการชดเชย นอกจากนี้อัลกอริทึมการคำนวณของวิธีดังกล่าวมีความหลากหลายสามารถเลือกได้ตามวัตถุประสงค์การชดเชย ซึ่งแต่ละอัลกอริทึมอาศัยการคำนวณที่ง่ายและเหมาะสมกับการโปรแกรมทางดิจิทัลอย่างยิ่ง นอกจากนี้วิธีเอสดีสามารถใช้ได้กับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสทั้งชนิดสมดุลและไม่สมดุล อย่างไรก็ตามในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะพิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้าที่สมดุลเท่านั้น สำหรับเนื้อหาที่จะนำเสนอในบทนี้ประกอบด้วย การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดี ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อที่ 3.2 การพัฒนาการตรวจจับฮาร์มอนิกวิธีเอสดี ซึ่งเรียกวินิจฉัยที่พัฒนาใหม่ว่า วิธีฟูรีเยร์เอสดี จะนำเสนอในหัวข้อที่ 3.3 นอกจากนี้การเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธีเอสดีกับวิธีฟูรีเยร์เอสดี ได้นำเสนอไว้เช่นกันในหัวข้อที่ 3.4

#### 3.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดี

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดี (Synchronous Detection: SD) หรือวิธี SD แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ วิธีเอสดีแบบกระแสเท่ากัน (equal current synchronous detection: CSD) วิธีเอสดีแบบกำลังเท่ากัน (equal power synchronous detection: PSD) และวิธีเอสดีแบบอิมพีแดนซ์เท่ากัน (equal impedance synchronous detection: ZSD) โดยทั้ง 3 รูปแบบใช้อินพุตสำหรับการคำนวณที่เหมือนกัน คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟส ( $v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$ ) และค่ากระแสไฟฟ้าที่

โพลสามเฟส ( $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ ) ส่วนเอาต์พุตการคำนวณ คือ ค่ากระแสอ้างอิงในการชดเชยสามเฟส ( $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ ) รายละเอียดขั้นตอนการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกของแต่ละรูปแบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 3.2.1 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดีแบบกระแสเท่ากัน

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดีแบบกระแสเท่ากันหรือวิธี CSD เป็นวิธีที่ใช้การสมมติให้ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟเข้ากับระบบไฟฟ้าแล้วกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟสจะอยู่ในสถานะสมดุลและขนาดเท่ากันดังสมการที่ (3.1)

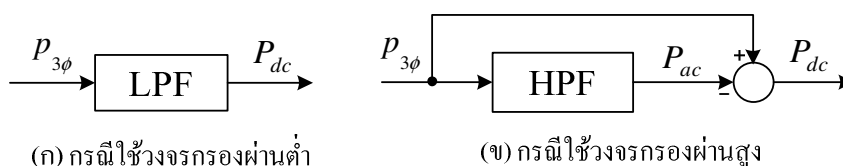
$$I_{sa} = I_{sb} = I_{sc} = I_s \quad (3.1)$$

การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดีสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่ากำลังแอกทีฟสามเฟส ( $p_{3\phi}$ ) จากสมการที่ (3.2) ดังนี้

$$p_{3\phi} = v_{sa}i_{La} + v_{sb}i_{Lb} + v_{sc}i_{Lc} \quad (3.2)$$

ขั้นที่ 2 แยกปริมาณแอกทีฟมูลฐาน ( $P_{dc}$ ) ออกจากปริมาณฮาร์มอนิก ( $P_{ac}$ ) ที่อยู่รวมกันในค่ากำลังแอกทีฟสามเฟส ( $p_{3\phi}$ ) โดยใช้วงจรกรอง (Filter) ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ทั้งวงจรกรองผ่านต่ำ (Low pass Filter :LPF) หรือวงจรกรองผ่านสูง (High Pass Filter: HPF) โดยการใช้วงจรกรองทั้งสองกรณีสามารถแสดงโครงสร้างการแยกปริมาณแอกทีฟมูลฐานได้ดังรูปที่ 3.1 ดังนี้



รูปที่ 3.1 การแยกปริมาณแอกทีฟมูลฐานออกจากปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟสามเฟส

ขั้นที่ 3 คำนวณค่ากำลังแอกทีฟเฉลี่ยของแต่ละเฟส ( $P_{a,av}, P_{b,av}, P_{c,av}$ ) โดยใช้สมการที่ (3.3) ถึง (3.5) ตามลำดับ

$$P_{a,av} = \frac{P_{dc} V_{sa}}{V_{tot}} \quad (3.3)$$

$$P_{b,av} = \frac{P_{dc} V_{sb}}{V_{tot}} \quad (3.4)$$

$$P_{c,av} = \frac{P_{dc} V_{sc}}{V_{tot}} \quad (3.5)$$

จากสมการที่ (3.3) ถึง (3.5) ค่า  $V_{sa}$   $V_{sb}$   $V_{sc}$  คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส และ  $V_{tot}$  คือ ผลรวมของค่ายอดแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟส ( $V_{tot} = V_{sa} + V_{sb} + V_{sc}$ )

ขั้นที่ 4 จำนวนค่ากระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟส ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) โดยใช้สมการที่ (3.6) ถึง (3.8) ตามลำดับ

$$i_{sa} = \frac{2v_{sa} P_{a,av}}{V_{sa}^2} \quad (3.6)$$

$$i_{sb} = \frac{2v_{sb} P_{b,av}}{V_{sb}^2} \quad (3.7)$$

$$i_{sc} = \frac{2v_{sc} P_{c,av}}{V_{sc}^2} \quad (3.8)$$

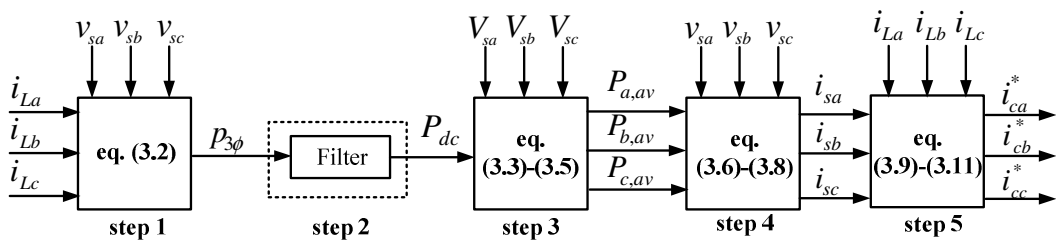
ขั้นที่ 5 จำนวนค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ ) ให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟดังสมการที่ (3.9) ถึง (3.11) ดังนี้

$$i_{ca}^* = i_{La} - i_{sa} \quad (3.9)$$

$$i_{cb}^* = i_{Lb} - i_{sb} \quad (3.10)$$

$$i_{cc}^* = i_{Lc} - i_{sc} \quad (3.11)$$





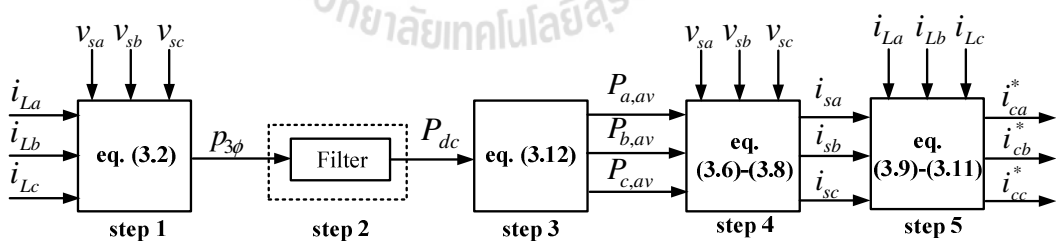
รูปที่ 3.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี CSD

จากขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกทั้ง 5 ขั้นตอนข้างต้นสามารถเขียนอธิบายเป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

### 3.2.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดีแบบกำลังเท่ากัน

วิธีเอสดีแบบกำลังเท่ากันหรือวิธี PSD เป็นวิธีที่ใช้การสมมติให้ภายหลังการชดเชยค่ากำลังแอกทีฟของโหลดในแต่ละเฟสจะต้องมีขนาดเท่ากัน การคำนวณตรวจจับวิธีนี้จะเหมือนกับวิธี CSD ในทุกขั้นตอนยกเว้นขั้นตอนที่ 3 ซึ่งเป็นขั้นตอนการคำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟเฉลี่ยของแต่ละเฟส ( $P_{a,av}, P_{b,av}, P_{c,av}$ ) โดยในกรณีวิธี PSD จะคำนวณค่ากำลังดังกล่าวโดยใช้สมการที่ (3.12) แทน ซึ่งหลังจากที่คำนวณค่ากำลังแอกทีฟเฉลี่ยของแต่ละเฟสได้แล้วจะดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนที่ 4 และ 5 ของวิธี CSD ต่อไป ดังแผนภาพการคำนวณตรวจจับรูปที่ 3.3

$$P_{a,av} = P_{b,av} = P_{c,av} = \frac{P_{dc}}{3} \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PSD

### 3.2.3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดีแบบอิมพีแดนซ์เท่ากัน

วิธีเอสดีแบบอิมพีแดนซ์เท่ากันหรือวิธี ZSD เป็นวิธีที่ใช้การสมมติให้ภายหลังการชดเชยค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดในแต่ละเฟสจะต้องมีขนาดเท่ากันดังสมการที่ (3.13) ซึ่งขั้นตอนการคำนวณตรวจจับวิธีนี้ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนเช่นกัน โดยขั้นตอนที่ 1 2 และ 5 จะเหมือนกับสองวิธี

ที่ผ่านมา แต่ในขั้นตอนที่ 3 วิธีนี้จะเป็นการดำเนินการคำนวณหาค่าขนาดอิมพีแดนซ์โดยใช้สมการที่ (3.14) และขั้นตอนที่ 4 การคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) สำหรับวิธี ZSD จะดำเนินการคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.15) ถึง (3.17) ตามลำดับ เมื่อคำนวณค่ากระแสดังกล่าวได้แล้วจึงดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนที่ 5 ต่อไปตามแผนภาพรูปที่ 3.4

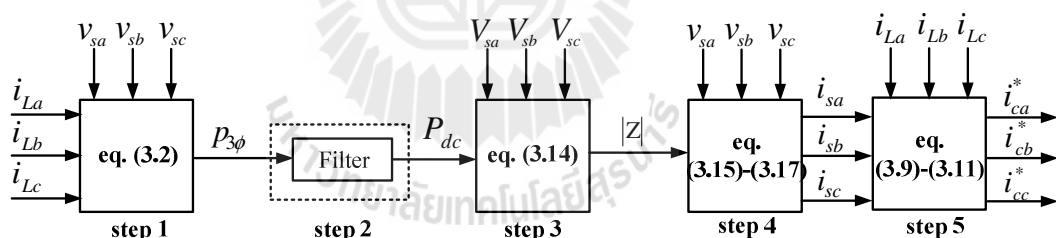
$$Z_a = Z_b = Z_c = |Z| \quad (3.13)$$

$$|Z| = \frac{V_{sa}^2 + V_{sb}^2 + V_{sc}^2}{2P_{dc}} \quad (3.14)$$

$$i_{sa} = \frac{v_{sa}}{|Z|} \quad (3.15)$$

$$i_{sb} = \frac{v_{sb}}{|Z|} \quad (3.16)$$

$$i_{sc} = \frac{v_{sc}}{|Z|} \quad (3.17)$$

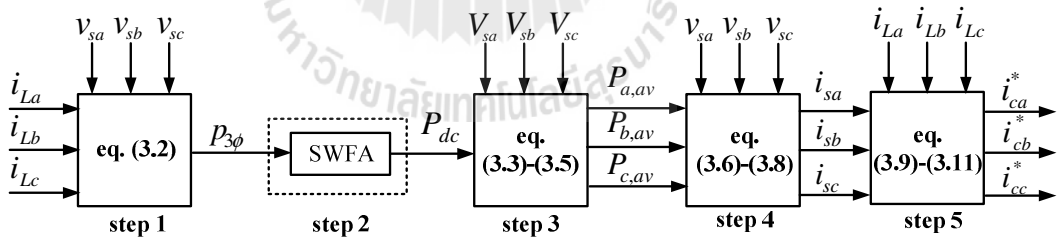


รูปที่ 3.4 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี ZSD

### 3.3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี (SD with Fourier: SDF) หรือเรียกว่าวิธี SDF เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นมาจากวิธี SD โดยนำหลักการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดวเลื่อน (Sliding Window with Fourier Analysis: SWFA) (EI-Habrouk M. and Darwish M.K., 2001) เข้ามาช่วยแยกกำลังแอกทีฟมูลฐานออกจากปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟแทนการใช้วงจรกรองในขั้นตอนที่ 2 ของวิธี SD ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการแยกปริมาณฮาร์มอนิกให้ดียิ่งขึ้น แผนภาพการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 (กรณีการใช้ SWFA กับวิธี CSD) จาก

รูปดังกล่าวการใช้วิธี SWFA ของวิธี SDF จะเริ่มต้นจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของสมการออยเลอร์-ฟูรีเยร์ (Euler-Fourier formulas) ของกำลังแอกทีฟสามเฟส ( $p_{3\phi}$ ) ดังสมการที่ (3.18) ซึ่งมีองค์ประกอบสองเทอม คือ เทอมที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณกระแสตรง (dc component) และเทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ (ac component) โดยในที่นี้เทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงจะเปรียบเสมือนเป็นปริมาณแอกทีฟมูลฐาน ( $P_{dc}$ ) ส่วนเทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับเปรียบเสมือนปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ ( $P_{ac}$ ) การแยกปริมาณทั้งสองออกจากกันโดยใช้วิธี SWFA จะเริ่มต้นจากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์  $A_0$  โดยการรับข้อมูลค่ากำลังแอกทีฟสามเฟสหรือ  $p_{3\phi}$  มาหนึ่งคาบ จำนวน  $N$  ข้อมูล เพื่อคำนวณตามสมการที่ (3.19) (ช่วงเวลาในการคำนวณนี้เป็นช่วงเวลาในการกำหนดค่าเริ่มต้นของวิธี SDF) และจะเก็บค่า  $p_{3\phi}$  หนึ่งคาบดังกล่าวในรูปแบบของลำดับแถวดังรูปที่ 3.6 หลังจากนั้นในรอบการคำนวณถัดไปจะเริ่มต้นจากการรับข้อมูล  $p_{3\phi}$  ค่าใหม่ ( $p_{3\phi}(N_0 + N)$ ) และลบออกด้วยข้อมูล  $P_{3\phi}$  ค่าเก่า ( $p_{3\phi}(N_0 - 1)$ ) เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_0$  ค่าใหม่ ( $A_0^{(new)}$ ) ดังสมการที่ (3.20) โดยที่ ( $A_0^{(old)}$ ) คือ ค่าสัมประสิทธิ์  $A_0$  ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณในรอบก่อนหน้า ซึ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_0^{(new)}$  ในทุกรอบของการรับข้อมูล  $p_{3\phi}$  ค่าใหม่ จะทำให้ได้ค่ากำลังแอกทีฟมูลฐาน ( $P_{dc}$ ) ค่าใหม่ในทุกรอบจากการคำนวณตามสมการที่ (3.21) โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับช่วงเวลาซีกตัวอย่าง (sampling time)  $T$  วินาที ซึ่งหลังจากที่คำนวณได้ค่า  $P_{dc}$  เรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกตามวิธี SD ในขั้นที่ 3 ถึงขั้นที่ 5 ต่อไป



รูปที่ 3.5 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF

$$p_{3\phi}(kT) = \underbrace{\frac{A_0}{2}}_{dc \text{ component}} + \underbrace{\sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega kT) + B_h \sin(h\omega kT)]}_{ac \text{ component}} \quad (3.18)$$

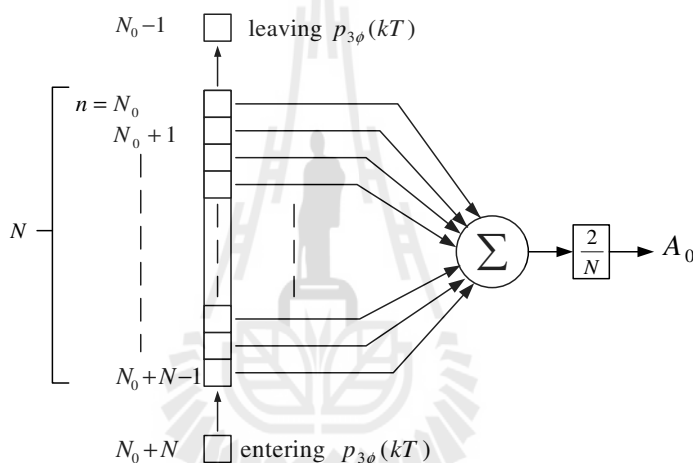
$$\text{โดยที่ } A_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_{3\phi}(nT) \cos(nh\omega T) \quad ; h=0,1,2,\dots,\infty$$

$$B_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_{3\phi}(nT) \sin(nh\omega T) \quad ; h=0,1,2,\dots,\infty$$

$$A_0 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_{3\phi}(nT) \quad (3.19)$$

$$A_0^{(new)} = A_0^{(old)} - \frac{2}{N} p_{3\phi}(N_0 - 1)T + \frac{2}{N} p_{3\phi}(N_0 + N)T \quad (3.20)$$

$$P_{dc}(kT) = \frac{A_0}{2} \quad (3.21)$$



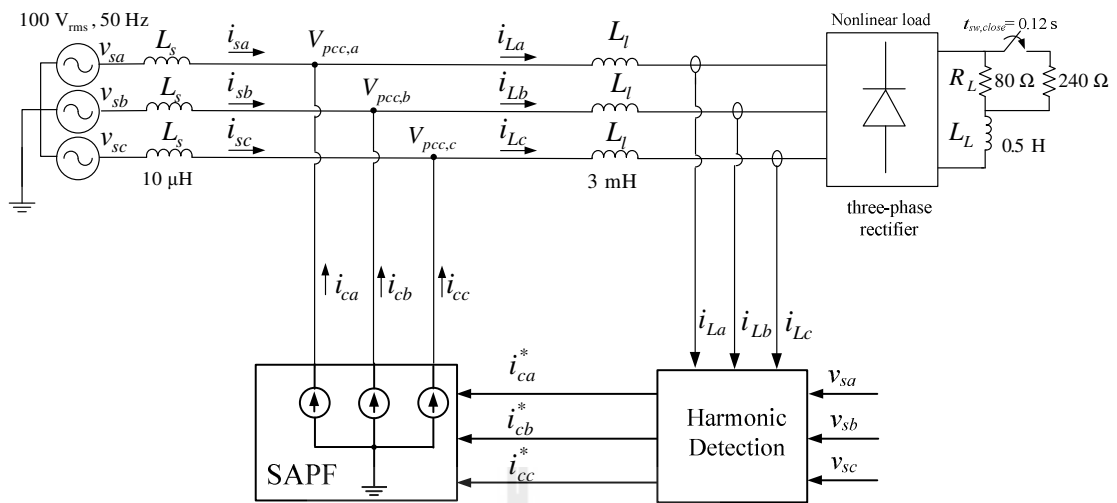
รูปที่ 3.6 แผนภาพอธิบายการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A_0$  ของ SWFA

### 3.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเอสดีกับวิธีฟูริเยร์เอสดี

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกเพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD กับวิธี SDF แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 จากรูปดังกล่าว ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมมูลพิกัดแรงดันเท่ากับ  $100 \text{ V}_{\text{rms}}$  ความถี่มูลฐานเท่ากับ  $50 \text{ Hz}$  ต่อเข้ากับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น คือ วงจรไดโอดเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดความต้านทาน ( $R_L$ )  $80 \ \Omega$  อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ( $L_L$ )  $0.5 \text{ H}$  และกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานเป็น  $60 \ \Omega$  ( $80 \ \Omega$  ขนานกับ  $240 \ \Omega$ ) ณ เวลา  $0.12$  วินาที โดยโหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า

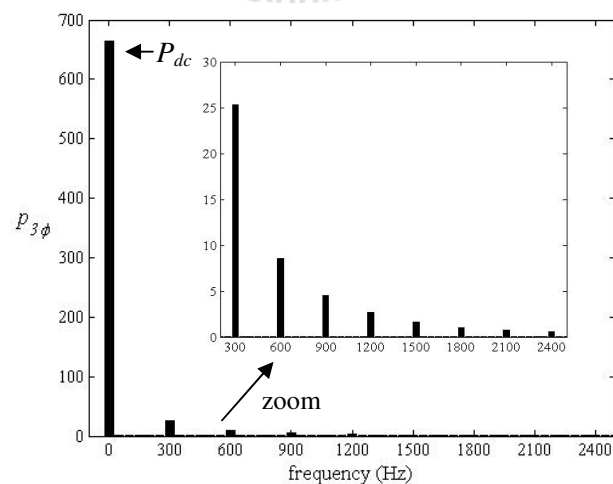
ส่วนที่ 2 บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิก (harmonic detection) ทำหน้าที่คำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยในที่นี้จะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะ



รูปที่ 3.7 ระบบสำหรับการตรวจสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก

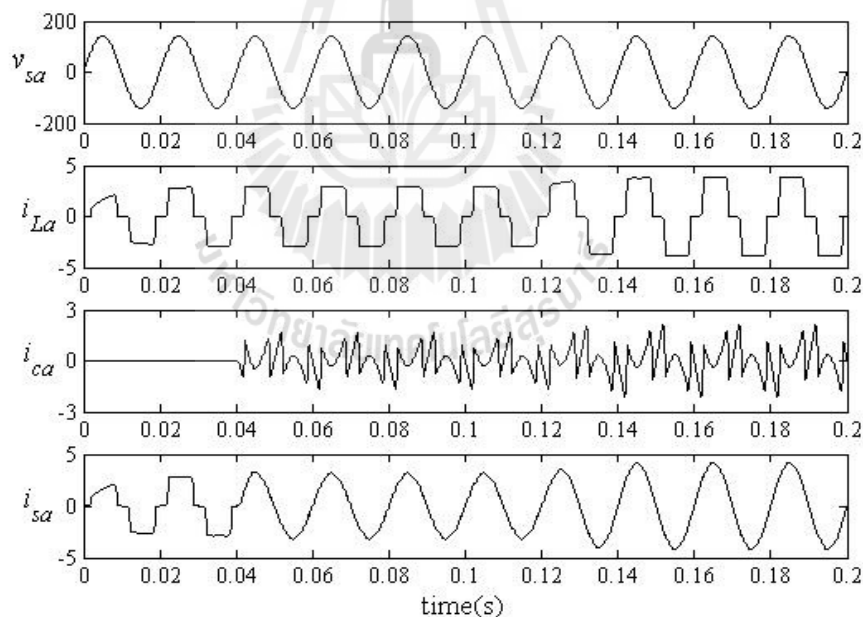
การตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างการใช้วิธี SD กับวิธี SDF

ส่วนที่ 3 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยในที่นี้ โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติ ทั้งนี้เพื่อพิจารณาเฉพาะผลการตรวจจับฮาร์มอนิก โดยไม่พิจารณาถึงผลกระทบด้านโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุมอื่น ๆ ดังนั้นจึงทำให้รูปสัญญาณกระแสชดเชย ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ ) มีลักษณะเหมือนกับรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ( $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ ) ที่ได้จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกทุกประการ



รูปที่ 3.8 สเปกตรัมของกำลังแอกทีฟสามเฟส

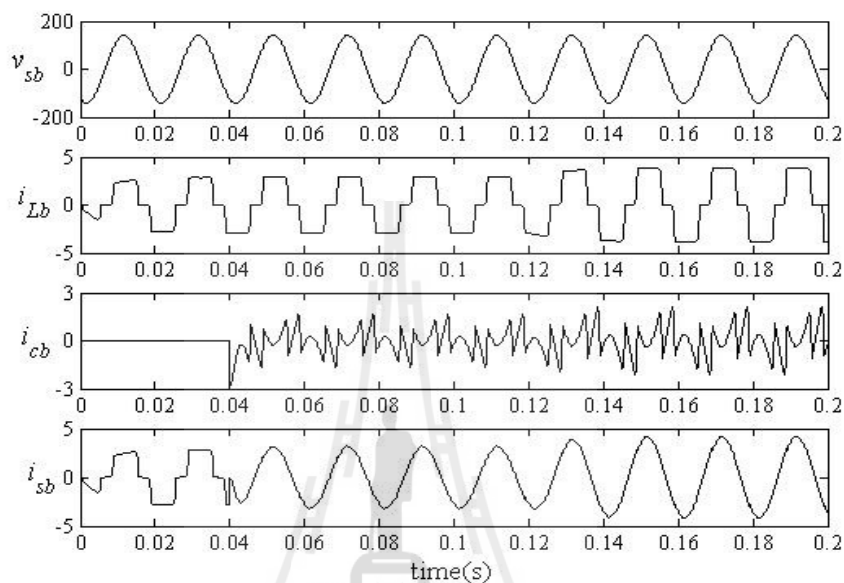
การเปรียบเทียบการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธี SD กับวิธี SDF ในที่นี้จะเลือกใช้เฉพาะ อัลกอริทึมการคำนวณแบบ CSD ทั้งนี้เนื่องจาก ระบบที่พิจารณาเป็นระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส สมดุลและภายหลังการชดเชยมีเป้าหมายต้องการให้กระแสที่แหล่งจ่ายมีขนาดเท่ากันและสมดุล ด้วยเช่นกัน เมื่อทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Simulink ร่วมกับชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blockset: PSB) ของ MATLAB พบว่า ค่ากำลังแอกทีฟสามเฟส ( $P_{3\phi}$ ) ประกอบด้วยปริมาณกำลังแอกทีฟมูลฐาน ( $P_{dc}$ ) และปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ ( $P_{ac}$ ) ดังสเปกตรัมในรูปที่ 3.8 โดยปริมาณกำลังแอกทีฟมูลฐานจะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่งค่าความถี่เท่ากับ 0 Hz ส่วนปริมาณฮาร์มอนิกตำแหน่งแรกปรากฏที่ค่าความถี่เท่ากับ 300 Hz (ปริมาณฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่ำสุด) ดังรูปที่ 3.8 จากผลสเปกตรัมในข้างต้น การออกแบบวงจรกรองเพื่อเลือกค่าความถี่ตัด ( $f_c$ ) สำหรับใช้แยกปริมาณมูลฐานออกจากปริมาณฮาร์มอนิกในขั้นตอนที่ 2 ของวิธี SD จึงสามารถเลือกได้ภายในช่วง  $0 \text{ Hz} < f_c < 300 \text{ Hz}$  โดยในที่นี้ผู้วิจัยได้ทำการเลือกค่าความถี่ตัดเท่ากับ 150 Hz และเลือกชนิดวงจรกรองเป็นวงจรกรองผ่านต่ำอันดับ 2 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกับการใช้ SWFA ของวิธี SDF



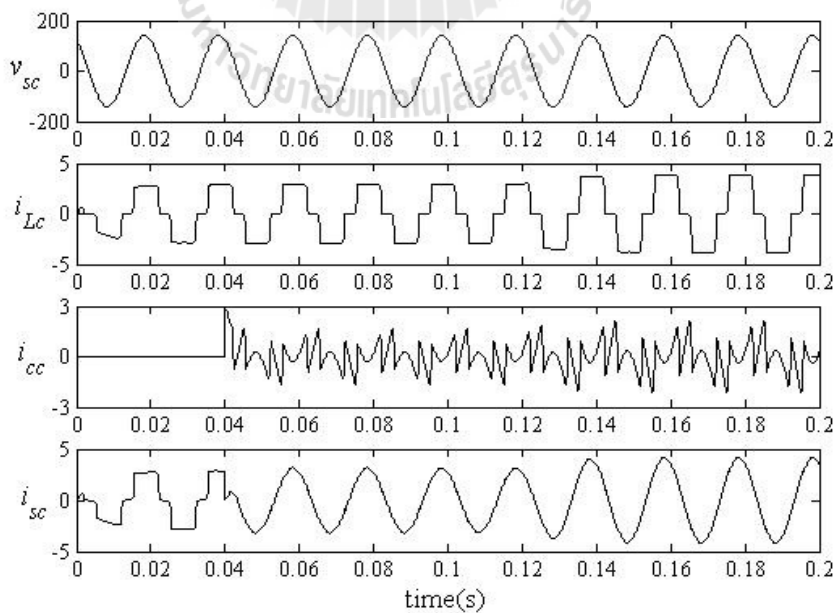
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส  $a$  กรณีใช้วิธี SD

ผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับฮาร์มอนิกของระบบรูปที่ 3.7 ของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  กรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกใช้วิธี SD แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 ถึง 3.11 ตามลำดับ และกรณีวิธี SDF แสดงได้ดังรูปที่ 3.12 ถึง 3.14 ตามลำดับเช่นกัน โดยการจำลองสถานการณ์กำหนดให้เริ่มทำการ

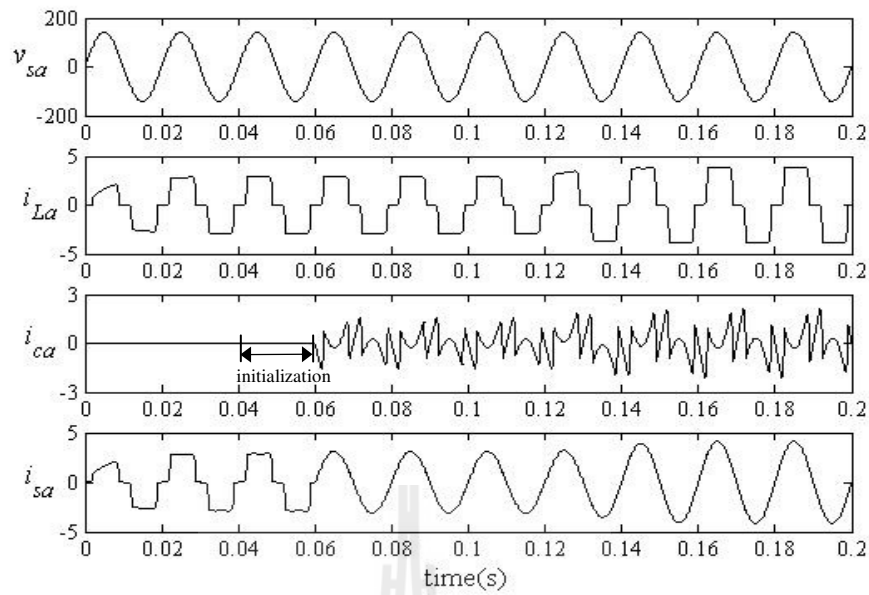
ชุดเซซาร์มอนิกที่เวลาเท่ากับ 0.04 วินาทีเป็นต้นไป และกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงโหลดของ วงจรเรียงกระแสจากโหลดที่พิจารณา คือ  $R_L = 80 \Omega$  เป็น  $R_L = 60 \Omega$  ( $80 \Omega$  ขนานกับ  $240 \Omega$ ) แบบฉับพลันที่เวลา 0.12 วินาที เป็นต้นไป ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของวิธีการตรวจจับ ฮาร์โมนิกวิธี SD และวิธี SDF ในช่วงการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดแบบทันทีทันใด



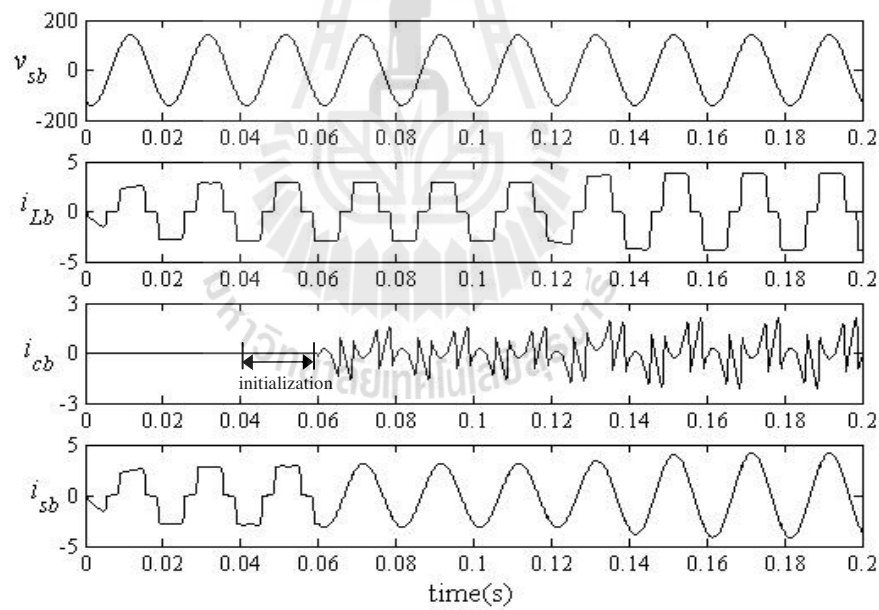
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกเฟส  $b$  กรณีใช้วิธี SD



รูปที่ 3.11 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกเฟส  $c$  กรณีใช้วิธี SD

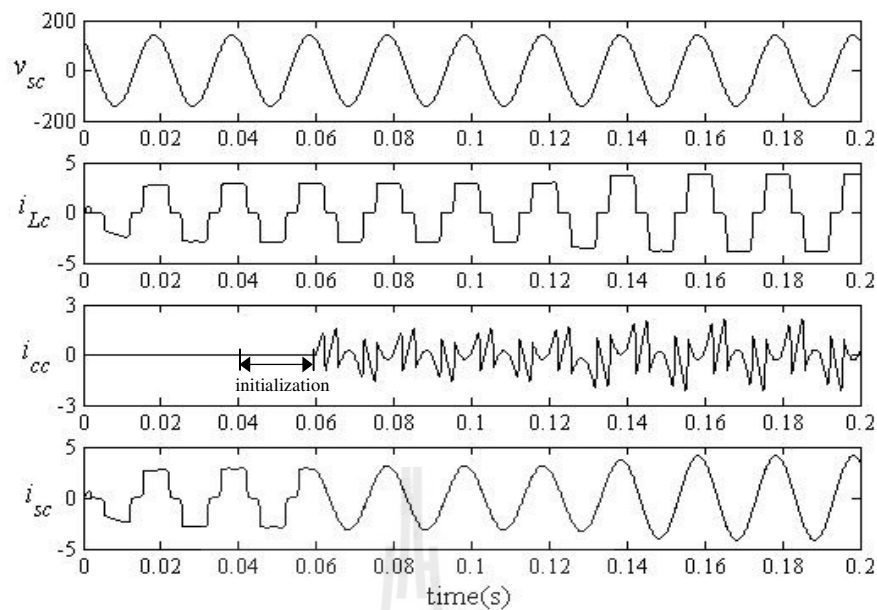


รูปที่ 3.12 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส  $a$  กรณีใช้วิธี SDF



รูปที่ 3.13 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส  $b$  กรณีใช้วิธี SDF





รูปที่ 3.14 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส  $c$  กรณีใช้วิธี SDF

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 3.9 ถึง 3.11 กรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SD ในช่วงเวลาก่อนการชดเชยตั้งแต่ 0 ถึง 0.04 วินาที สังเกตได้ว่า รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ทั้งสามเฟส ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) มีลักษณะเช่นเดียวกับกระแสไฟฟ้าที่โหลดทุกประการ แต่หลังจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟฉีดกระแสชดเชย ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ ) เข้าระบบไฟฟ้าตั้งแต่เวลา 0.04 วินาที เป็นต้นไป พบว่า รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยค่า  $\%THD$  ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  มีค่าเท่ากัน เท่ากับ 1.49% ในขณะที่ก่อนการชดเชยค่า  $\%THD$  ของกระแสดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 26.37% 26.40% และ 26.40% ตามลำดับเฟสดังตารางที่ 3.1 นอกจากนี้ เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก  $R_L = 80 \Omega$  เป็น  $R_L = 60 \Omega$  อย่างฉับพลันที่เวลา 0.12 วินาที ทำให้ค่ายอดกระแสไฟฟ้าที่โหลดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.8 A เป็น 3.8 A ซึ่งสังเกตได้ว่าวิธี SD ยังคงสามารถคำนวณค่ากระแสอ้างอิง ( $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ ) ได้คล้อยตามขนาดที่เพิ่มขึ้นของกระแสโหลด (กรณีวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติรูปสัญญาณของ  $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$  จะเหมือนกับ  $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ ) ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายตั้งแต่เวลา 0.12 วินาที เป็นต้นไปมีลักษณะเป็นรูปไซน์และมีขนาดยอดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเช่นกันดังรูปที่ 3.9 3.10 และ 3.11 สำหรับเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ตามลำดับ โดยค่า  $\%THD$  ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยกรณีโหลด  $R_L = 60 \Omega$  นี้ มีค่าเท่ากับ 1.54% 1.53% และ 1.53% ตามลำดับเฟส ในขณะที่ก่อนมีการชดเชย ค่า  $\%THD$  เท่ากับ 25.69% 25.72% และ 25.72% ตามลำดับเฟส เช่นกัน ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงค่า  $\%THD$  สามารถดูได้จากตารางที่ 3.1

สำหรับกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SDF ดังผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 3.12 ถึง 3.14 สังเกตได้ว่า รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยทั้งสามเฟสตั้งแต่เวลา 0.06 วินาที เป็นต้นไป มีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้นซึ่งวัดค่า %THD ของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ได้เท่ากับ 0.70% 0.70% และ 0.71% ตามลำดับ (ในช่วงเวลา 0.04 ถึง 0.06 วินาที หรือ 1 คาบรูปสัญญาณ คือ ช่วงเวลาที่ใช้สำหรับการกำหนดค่าเริ่มต้น (initialization) ของการคำนวณวิธี SDF จึงไม่มีการชดเชย) จากนั้นเมื่อโพลดีการแปลงแปลงจะเห็นได้ว่าวิธี SDF สามารถปรับตัวคำนวณค่ากระแสอ้างอิงได้ตามขนาดที่เพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่โหลดได้เช่นกัน ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยทั้งสามเฟสมีลักษณะเป็นรูปไซน์และมีขนาดกระแสที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.12 ถึง 3.14 โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0.65% 0.65% และ 0.66% ตามลำดับเฟส ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

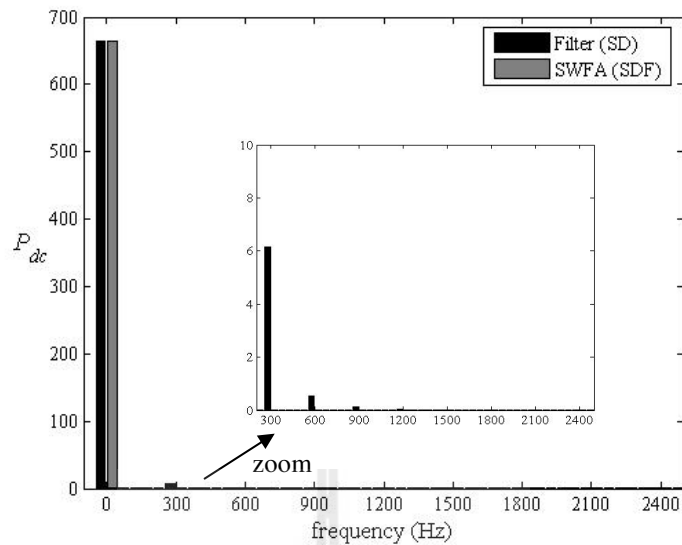
หมายเหตุ: การคำนวณหาค่า %THD ของกระแสในแต่ละเฟสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.22 และการคำนวณหาค่า %THD เฉลี่ยทั้งสามเฟสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.23

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (3.22)$$

โดยที่  $I_n$  คือ ค่า RMS ของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่  $n$

$I_1$  คือ ค่า RMS ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

$$\%THD \text{ เฉลี่ย} = \sqrt{\frac{\sum_{j=a,b,c} \%THD_j^2}{3}} \quad (3.23)$$



รูปที่ 3.15 สเปกตรัมของกำลังแอกทีฟมูลฐานที่ได้จากการแยกออกจากปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟโดยใช้วงจรกรองของวิธี SD และที่ใช้ SWFA ของวิธี SDF

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD กับวิธี SDF

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_s$ )					
	ค่า %THD ก่อนการชดเชย		ค่า %THD หลังการชดเชย			
			วิธี SD		วิธี SDF	
	$R_L = 80 \Omega$	$R_L = 60 \Omega$	$R_L = 80 \Omega$	$R_L = 60 \Omega$	$R_L = 80 \Omega$	$R_L = 60 \Omega$
a	26.37%	25.69%	1.49%	1.54%	0.70%	0.65%
b	26.40%	25.72%	1.49%	1.53%	0.70%	0.65%
c	26.40%	25.72%	1.49%	1.53%	0.71%	0.66%
เฉลี่ย	26.39%	25.71%	1.49%	1.53%	0.70%	0.65%

จากตารางที่ 3.1 ค่า %THD เฉลี่ย ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชยของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาตอนเริ่มต้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ (โหลด  $R_L = 80 \Omega$ ) มีค่าสูงเท่ากับ 26.39% ในขณะที่ภายหลังการชดเชย กรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกใช้วิธี SD มีค่า %THD เฉลี่ย เท่ากับ 1.49% ส่วนกรณีวิธี SDF ให้ค่า %THD เฉลี่ย เท่ากับ 0.70% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลจากการใช้วิธี SD ทั้งนี้เนื่องจากสมรรถนะของการแยกปริมาณแอกทีฟมูลฐานออกจากปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟของวิธี SDF ที่ใช้ SWFA มีความถูกต้องและแม่นยำสูงกว่าการใช้วงจรกรองของวิธี SD ดังผล

สเปกตรัมกำลังแอกทีฟมูลฐาน ( $P_{dc}$ ) รูปที่ 3.15 ซึ่งจากรูปดังกล่าว จะสังเกตได้ว่า ปริมาณแอกทีฟมูลฐานที่ได้จากการแยกโดยใช้วงจรกรองของวิธี SD ยังคงมีปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟปรากฏเหลืออยู่ที่ความถี่ 300 Hz 600 Hz 900 Hz และ 1200 Hz ในขณะที่การใช้ SWFA ของวิธี SDF สามารถแยกปริมาณแอกทีฟมูลฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีโดยไม่ปรากฏปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟเหลืออยู่ ซึ่งผลการแยกปริมาณแอกทีฟมูลฐานดังกล่าวในกรณีโหลด  $R_L = 60 \Omega$  ให้ผลในลักษณะเช่นเดียวกับกรณีโหลด  $R_L = 80 \Omega$  ด้วยเหตุนี้ จึงส่งผลให้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF มีสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี SD

### 3.5 สรุป

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อกำหนดค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย โดยในบทนี้ได้นำเสนอวิธี SD รวมถึงพัฒนาวิธีการที่เรียกว่าวิธี SDF ซึ่งผลการเปรียบเทียบการตรวจจับฮาร์มอนิกทั้งสองวิธีพบว่า วิธี SDF ให้สมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี SD โดยค่า %THD เฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยกรณีที่ใช้วิธี SDF ให้ค่า %THD เฉลี่ย น้อยกว่าวิธี SD ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF สำหรับคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟในบทต่อไป

## บทที่ 4

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบระบบควบคุม ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

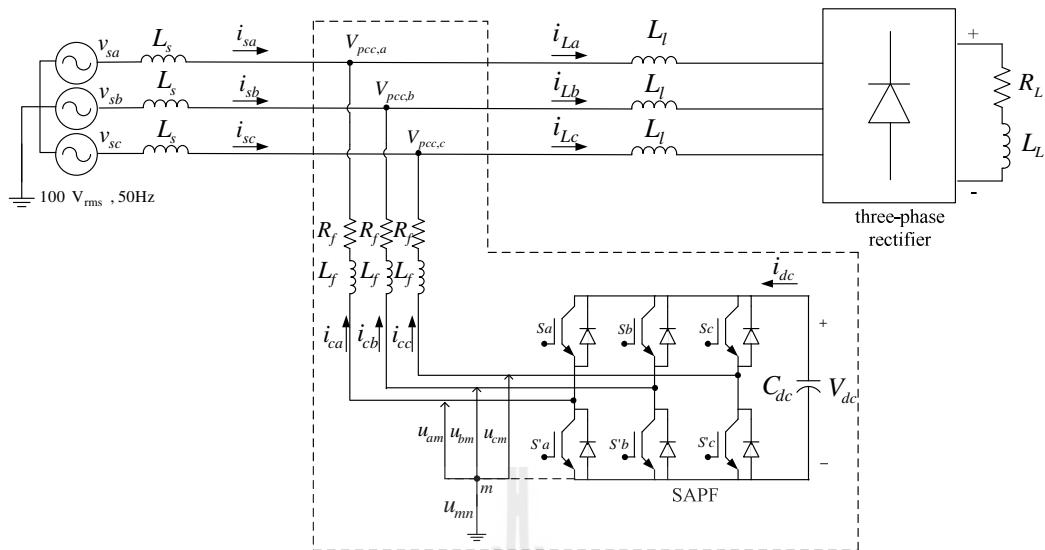
#### 4.1 กล่าวนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัลไฟตรงให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งการวิเคราะห์แบบจำลองดังกล่าวในอดีตที่ผ่านมา พลสิทธิ สานติประพันธ์ ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ (พลสิทธิ สานติประพันธ์, 2554) ดังนั้น ในบทนี้จึงเป็นการศึกษา ทบทวนและทำความเข้าใจเกี่ยวกับการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟสและแกนดีคิว รวมไปถึงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.2 การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัลไฟตรงบนแกนดีคิวที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ เทคนิคการสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็มจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.5 และการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบผลการกำจัดฮาร์มอนิก ด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ระบบควบคุมจากการออกแบบร่วมกับตัวควบคุมพีไอบนแกนดีคิว ได้ถูกนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.6

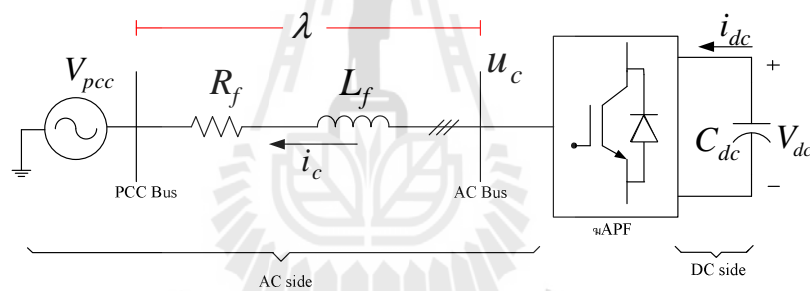
#### 4.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

##### 4.2.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานบนแกนสามเฟส

ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อนี้มีเพียงส่วนของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าที่จุด PCC (point of common coupling) ภายในกรอบเส้นประ ซึ่งเมื่อนำมาเขียนใหม่ในรูปแบบแผนภาพเส้นเดียว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC จะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส และมุมต่างเฟสระหว่างบัส PCC กับบัส AC กำหนดให้เท่ากับ  $\lambda$



รูปที่ 4.1 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน



รูปที่ 4.2 ระบบที่พิจารณาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 4.2 การหาแบบจำลองเริ่มต้นจากการวิเคราะห์วงจรทางด้าน AC ซึ่งเมื่อพิจารณาใช้กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ทั้งสามเฟสจะได้ดังสมการที่ (4.1) ถึง (4.3) ดังนี้

$$u_{ca} = L_f \frac{di_{ca}}{dt} + R_f i_{ca} + V_{pcc,a} \quad (4.1)$$

$$u_{cb} = L_f \frac{di_{cb}}{dt} + R_f i_{cb} + V_{pcc,b} \quad (4.2)$$

$$u_{cc} = L_f \frac{di_{cc}}{dt} + R_f i_{cc} + V_{pcc,c} \quad (4.3)$$

โดยที่  $u_{ca} = u_{am} + u_{mn}$   $u_{cb} = u_{bm} + u_{mn}$  และ  $u_{cc} = u_{cm} + u_{mn}$

ดำเนินการแทนค่า  $u_{ca}$   $u_{cb}$  และ  $u_{cc}$  ลงในสมการที่ (4.1) ถึง (4.3) และจัดเทอมสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์กระแสชดเชยจะได้ดังสมการที่ (4.4) ถึง (4.6)

$$\frac{di_{ca}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} i_{ca} + \frac{1}{L_f} (u_{am} + u_{mn}) - \frac{1}{L_f} V_{pcc,a} \quad (4.4)$$

$$\frac{di_{cb}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} i_{cb} + \frac{1}{L_f} (u_{bm} + u_{mn}) - \frac{1}{L_f} V_{pcc,b} \quad (4.5)$$

$$\frac{di_{cc}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} i_{cc} + \frac{1}{L_f} (u_{cm} + u_{mn}) - \frac{1}{L_f} V_{pcc,c} \quad (4.6)$$

เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นระบบสมดุลจึงส่งผลให้ผลรวมของกระแสชดเชย และแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} = 0$  และ  $V_{pcc,a} + V_{pcc,b} + V_{pcc,c} = 0$ ) จากผลดังกล่าว จึงทำให้ผลรวมค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรองกำลังแอกทีฟมีค่าเท่ากับศูนย์เช่นกันดังสมการที่ (4.7) และเมื่อดำเนินการจัดเทอมสมการที่ (4.7) ใหม่ให้อยู่ในรูปของค่า  $u_{mn}$  จะแสดงได้ดังสมการที่ (4.8)

$$u_{am} + u_{bm} + u_{cm} + 3u_{mn} = 0 \quad (4.7)$$

$$u_{mn} = -\frac{1}{3}(u_{am} + u_{bm} + u_{cm}) = -\frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} u_{jm} \quad (4.8)$$

แทนสมการที่ (4.8) ลงในสมการที่ (4.4) ถึง (4.6) ได้ผลดังนี้

$$\frac{di_{ca}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} i_{ca} + \frac{1}{L_f} (u_{am} - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} u_{jm}) - \frac{1}{L_f} V_{pcc,a} \quad (4.9)$$

$$\frac{di_{cb}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} i_{cb} + \frac{1}{L_f} (u_{bm} - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} u_{jm}) - \frac{1}{L_f} V_{pcc,b} \quad (4.10)$$

$$\frac{di_{cc}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} i_{cc} + \frac{1}{L_f} (u_{cm} - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} u_{jm}) - \frac{1}{L_f} V_{pcc,c} \quad (4.11)$$

เขียนสมการที่ (4.9) ถึง (4.11) ใหม่ให้อยู่ในรูปทั่วไปจะได้สมการที่ (4.12)

$$\frac{di_{ck}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f}i_{ck} + \frac{1}{L_f}(u_{km} - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} u_{jm}) - \frac{1}{L_f}V_{pcc,k}; k = a, b, c \quad (4.12)$$

จากสมการที่ (4.12) เมื่อแทนค่า  $k$  ด้วย  $a, b$  และ  $c$  จะได้สมการอนุพันธ์กระแส  
ชดเชยของเฟส  $a, b$  และ  $c$  ตามลำดับ

ลำดับต่อมาจะพิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของวงจร  
กำลังแยกที่เฟสหว่างด้าน AC กับ DC ซึ่งแสดงดังสมการที่ (4.13) และ (4.14) ตามลำดับ ดังนี้

$$i_{dc} = \sum_{k=a,b,c} c_k i_{ck} \quad ; k = a, b, c \quad (4.13)$$

$$u_{km} = c_k V_{dc} \quad ; k = a, b, c \quad (4.14)$$

โดยที่  $c_k$  คือ สถานะการสวิตช์ของอุปกรณ์ไอจีบีทีทั้งสามเฟสของวงจร  
กำลังแยกที่ฟ ซึ่งมียารละเอียดดังนี้

$c_k = 1$  เมื่อ  $s_k$  นำกระแส (on) และ  $s'_k$  หยุดนำกระแส (off)

$c_k = 0$  เมื่อ  $s_k$  หยุดนำกระแส (off) และ  $s'_k$  นำกระแส (on)

โดยที่  $k = a, b, c$

เมื่อนำสมการที่ (4.14) แทนลงในสมการที่ (4.12) จะได้สมการที่ (4.15) ดังนี้

$$\frac{di_{ck}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f}i_{ck} + \frac{1}{L_f}(c_k V_{dc} - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} c_j V_{dc}) - \frac{1}{L_f}V_{pcc,k} \quad ; k = a, b, c \quad (4.15)$$

หรือ

$$\frac{di_{ck}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f}i_{ck} + \frac{1}{L_f}(c_k - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} c_j)V_{dc} - \frac{1}{L_f}V_{pcc,k} \quad ; k = a, b, c \quad (4.16)$$

$$\frac{di_{ck}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f}i_{ck} + \frac{1}{L_f}d_{sk}V_{dc} - \frac{1}{L_f}V_{pcc,k} \quad ; k = a, b, c \quad (4.17)$$



จากสมการที่ (4.16) กำหนดให้เทอม  $c_k - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} c_j$  คือ ฟังก์ชันการสวิตช์ (switching function:  $d_{sk}$ ) ซึ่งเขียนแสดงใหม่ได้ดังสมการที่ (4.17) จากสมการดังกล่าว ทำให้ทราบว่า  $u_{ck} = d_{sk} V_{dc}$  ซึ่งค่า  $d_{sk}$  เมื่อเขียนกระจายทั้งสามเฟสแสดงได้ดังสมการที่ (4.18) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} d_{sa} \\ d_{sb} \\ d_{sc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_a \\ c_b \\ c_c \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

ลำดับสุดท้ายทำการวิเคราะห์ห้วงจรรูปที่ 4.2 ทางด้าน DC ซึ่งค่าอนุพันธ์แรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.19) ซึ่งจากสมการดังกล่าว เมื่อแทน  $i_{dc}$  ด้วยสมการที่ (4.13) จะได้ดังสมการที่ (4.20)

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} (-i_{dc}) \quad (4.19)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C_{dc}} \sum_{k=a,b,c} c_k i_{ck} \quad (4.20)$$

เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่เป็นระบบสมดุลจะส่งผลให้ผลรวมของกระแสชดเชยทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นจึงส่งผลให้เทอม  $\sum_{k=a,b,c} c_k i_{ck}$  เท่ากับเทอม  $\sum_{k=a,b,c} d_{sk} i_{ck}$  ด้วยเช่นกันจากการเท่ากันของทั้งสองเทอมในข้างต้นจึงทำให้สมการอนุพันธ์ของ  $V_{dc}$  เป็นดังสมการที่ (4.21)

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C_{dc}} \sum_{k=a,b,c} d_{sk} i_{ck} \quad (4.21)$$

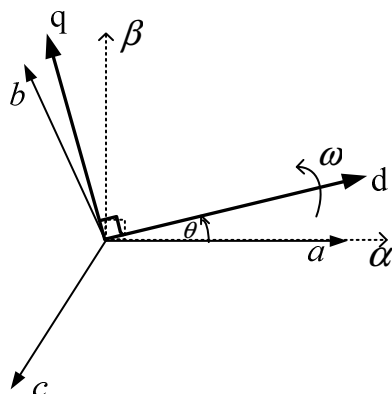
สมการที่ (4.17) และ (4.21) ทำการเขียนใหม่ให้อยู่รูปของเมตริกซ์จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกำลังแยกที่ฟสำหรับระบบที่พิจารณาตามรูปที่ 4.2 บนแกนสามเฟส ดังสมการที่ (4.22) ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & 0 & 0 & \frac{d_{sa}}{L_f} \\ 0 & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & \frac{d_{sb}}{L_f} \\ 0 & 0 & -\frac{R_f}{L_f} & \frac{d_{sc}}{L_f} \\ -\frac{d_{sa}}{C_{dc}} & -\frac{d_{sb}}{C_{dc}} & -\frac{d_{sc}}{C_{dc}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \\ V_{dc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{pcc,a} \\ V_{pcc,b} \\ V_{pcc,c} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนสามเฟส (*abc*) จะต้องใช้ตัวควบคุมทั้งหมดสามชุดสำหรับแต่ละเฟส ซึ่งกระแสชดเชย (หรือกระแสฮาร์มอนิก) ในแต่ละเฟสมีลักษณะรูปสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในลักษณะการแกว่ง (oscillation) มาก ซึ่งจะยากต่อการควบคุม ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงเลือกดำเนินการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว (*d-q axis*) ซึ่งนอกจากจะช่วยลดการใช้ตัวควบคุมเหลือเพียงสองชุดแล้ว กระแสชดเชยบนแกนดีคิวยังมีลักษณะรูปสัญญาณที่ง่ายต่อการควบคุมมากกว่าบนแกนสามเฟสอีกด้วย ลำดับต่อไปจะดำเนินการแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟสตามสมการที่ (4.22) ไปอยู่บนแกนดีคิว รายละเอียดสามารถดูได้จากหัวข้อต่อไป

#### 4.2.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานบนแกนดีคิว

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิวในหัวข้อนี้ คือ การนำปริมาณไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ปรากฏในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟสตามสมการที่ (4.22) แปลงไปอยู่บนแกนดีคิว ซึ่งแกนดีคิวดังกล่าวจะหมุนด้วยความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมการแปลงแกนดีคิว

การแปลงปริมาณไฟฟ้าใด ๆ ( $f$ ) จากแกนสามเฟสไปอยู่บนแกนดีควสามารถพิจารณาได้จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังรูปที่ 4.3 จากรูปดังกล่าว การแปลงแกนดีควจะอาศัยการแปลงผ่านแกนแอลฟาเบต้า ( $\alpha\beta$ -axis) โดยใช้สมการที่ (4.23) จากนั้นจะดำเนินการแปลงจากแกนแอลฟาเบต้าไปอยู่บนแกนดีควด้วยสมการที่ (4.24) อย่างไรก็ตาม ถ้านำสองสมการดังกล่าวมาพิจารณารวมกันจะได้สมการใหม่สำหรับการคำนวณแปลงแกนจากแกนสามเฟสไปอยู่บนแกนดีควได้โดยตรง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.25) ซึ่งสมการดังกล่าวเรียกว่า สมการแปลงแกนแบบปาร์ก (Park's transformation) ที่ได้รวมเทอมศูนย์ (zero component) ไว้ด้วย

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\text{กำหนดให้ } \mathbf{K} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ว่า } [f_{dq0}] = \mathbf{K}[f_{abc}]$$

จากเมตริกซ์  $\mathbf{K}$  ในข้างต้นพบว่า เป็นเมตริกซ์เชิงตั้งฉาก (orthogonal matrix) คือ ผลคูณของเมตริกซ์  $\mathbf{K}$  กับเมตริกซ์  $\mathbf{K}$  ทรานส์โพส ( $\mathbf{K}^T$ ) จะเท่ากับเมตริกซ์เอกลักษณ์ (identity

matrix) ( $\mathbf{K}\mathbf{K}^T = \mathbf{I}$ ) ซึ่งผลจากการที่เมตริกซ์  $\mathbf{K}$  เป็นออร์โทกอนนอร์เมตริกซ์ดังกล่าว จะทำให้เมตริกซ์นี้มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ เมตริกซ์  $\mathbf{K}$  ผกผัน ( $\mathbf{K}^{-1}$ ) จะเท่ากับเมตริกซ์  $\mathbf{K}$  ทรานส์โพส

การหาแบบจำลองของวงจรรอกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว จะเริ่มต้นจากการพิจารณาแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ หรือ  $d_{sk}$  ที่กำหนดขึ้นตามสมการที่ (4.26) ไปอยู่บนแกนดีคิว โดยจากสมการที่ (4.26) กำหนดให้ขนาดของฟังก์ชันการสวิตช์อยู่ในรูปแบบของค่าครรรชนีการมอดูเลต (Modulation index:  $M$ ) และมุม  $\phi$  คือ มุมเฟสของฟังก์ชันการสวิตช์

$$\begin{bmatrix} d_{sa} \\ d_{sb} \\ d_{sc} \end{bmatrix} = \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

จากสมการที่ (4.26) ดำเนินการแปลงไปอยู่บนแกนดีคิวโดยไม่พิจารณาเทอมศูนย์ (ทั้งนี้เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นระบบสมดุล) สามารถอธิบายได้ดังนี้

จาก  $[f_{dq}] = \mathbf{K}[f_{abc}]$  จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} d_{sd} \\ d_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} d_{sd} \\ d_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} \sin(\omega t + \phi - \theta) \\ \frac{3}{2} \cos(\omega t + \phi - \theta) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} d_{sd} \\ d_{sq} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi - \theta) \\ \cos(\omega t + \phi - \theta) \end{bmatrix}$$

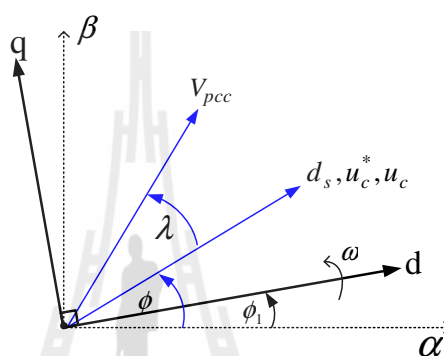
กำหนดให้มุม  $\theta$  สำหรับการคำนวณเท่ากับ  $\omega t - \frac{\pi}{2} + \phi_1$  ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันการสวิตช์บนแกนดีคิว ดังนี้

$$\begin{bmatrix} d_{sd} \\ d_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \cos(\phi - \phi_1) \\ \sin(\phi - \phi_1) \end{bmatrix}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} d_{sd} \\ d_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \cos(\phi_1 - \phi) \\ -\sin(\phi_1 - \phi) \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

โดยมุม  $\phi_1$  คือ มุมที่ใช้สำหรับหมุนแกนดีคิวซึ่งสามารถเลือกกำหนดมุมที่มุมของปริมาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในระบบที่พิจารณาได้



รูปที่ 4.4 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแบบจำลองสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

จากฟังก์ชันการสวิตช์บนแกนดีคิวในข้างต้น สามารถเขียนเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.4 จากรูปดังกล่าว เวกเตอร์แรงดันเอาต์พุตของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ( $u_c$ ) จะมีมุมเฟสเดียวกันกับมุมเฟสของแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์ ( $u_c^*$ ) และมุมเฟสของฟังก์ชันการสวิตช์ ( $d_s$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับมุม  $\phi$  นอกจากนี้ มุมต่างเฟสระหว่างเวกเตอร์แรงดันเอาต์พุตของวงจรกรองกำลังแอกทีฟกับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ( $V_{pcc}$ ) มีค่าเท่ากับ  $\lambda$  ซึ่งสอดคล้องกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาหาแบบจำลองรูปที่ 4.2

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปที่ 4.4 ทำให้ทราบว่าค่าแรงดัน  $V_{pcc}$  บนแกนดีคิวมีค่าเท่ากับสมการที่ (4.28) คือ

$$\begin{bmatrix} V_{pcc,d} \\ V_{pcc,q} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} V_m \cos(-\lambda + \phi_1 - \phi) \\ -V_m \sin(-\lambda + \phi_1 - \phi) \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

โดยที่  $V_m$  คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้า  $V_{pcc}$  บนแกนสามเฟส

จากสมการที่ (4.27) และ (4.28) ถ้ากำหนดมุมสำหรับการหมุนแปลงแกนดีคิวที่มุมของแรงดัน  $V_{pcc}$  ( $\phi_1 = \lambda + \phi$ ) จะได้ค่าฟังก์ชันการสวิตช์ และค่าแรงดัน  $V_{pcc}$  บนแกนดีคิวใหม่ดังสมการที่ (4.29) และ (4.30) ตามลำดับ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} d_{sd} \\ d_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \cos(\lambda) \\ -\sin(\lambda) \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$\begin{bmatrix} V_{pcc,d} \\ V_{pcc,q} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} V_m \cos(0) \\ -V_m \sin(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

ลำดับต่อมา คือ การพิจารณาแปลงแกนดีคิวของสมการความสัมพันธ์ระหว่างด้าน AC และ DC ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟอธิบายได้ดังนี้

*กรณีสมการความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า*

จากความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าทั้งสองด้านบนแกนสามเฟสตามสมการที่ (4.13) คือ  $i_{dc} = \sum_{k=a,b,c} c_k i_{ck}$  โดยที่  $k = a, b, c$  ทำการแปลงสมการดังกล่าวไปอยู่บนแกนดีคิวแสดงได้ดังนี้

$$i_{dc} = \sum_{k=a,b,c} c_k i_{ck} = \sum_{k=a,b,c} d_{sk} i_{ck}; k = a, b, c$$

$$i_{dc} = [d_{s(abc)}]^T [i_{c(abc)}]$$

จากสมการการแปลงแกนดีคิว คือ  $[f_{dq}] = \mathbf{K}[f_{abc}]$  แต่ในทางกลับกัน  $[f_{abc}] = \mathbf{K}^{-1}[f_{dq}]$  ด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$i_{dc} = [\mathbf{K}^{-1}[d_{s(dq)}]]^T \mathbf{K}^{-1}[i_{c(dq)}]$$

$$i_{dc} = \mathbf{K} \mathbf{K}^{-1} [d_{s(dq)}]^T [i_{c(dq)}]$$

$$i_{dc} = [d_{s(dq)}]^T [i_{c(dq)}]$$

$$i_{dc} = \begin{bmatrix} d_{sd} & d_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}$$

หรือ

$$i_{dc} = \underbrace{d_{sd}i_{cd}}_{i_{dc1}} + \underbrace{d_{sq}i_{cq}}_{i_{dc2}} \quad (4.31)$$

กรณีสมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า

สมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองด้านบนแกนสามเฟส คือ  $u_{ck} = d_{sk}V_{dc}$  โดยที่  $k = a, b, c$  ทำการแปลงไปอยู่บนแกนดีควแสดงได้ดังนี้

$$u_{ck} = d_{sk}V_{dc}; k = a, b, c$$

$$[u_{c(abc)}] = [d_{s(abc)}]V_{dc}$$

$$\mathbf{K}[u_{c(abc)}] = \mathbf{K}[d_{s(abc)}]V_{dc}$$

$$[u_{c(dq)}] = [d_{s(dq)}]V_{dc}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{sd} \\ d_{sq} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (4.32)$$

หลังจากที่พิจารณาแปลงแกนดีควของสมการฟังก์ชันสวิทช์และสมการความสัมพันธ์ด้าน AC และ DC แล้ว ลำดับต่อไปจะดำเนินการแปลงสมการแบบจำลองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟสสมการที่ (4.22) ไปอยู่บนแกนดีคว โดยจะแยกพิจารณาเป็นกรณีสมการอนุพันธ์กระแสชดเชย (สมการที่ (4.17)) และกรณีสมการอนุพันธ์แรงดันบัสไฟตรง (สมการที่ (4.21)) ดังนี้

กรณีสมการอนุพันธ์กระแสชดเชย

จากสมการอนุพันธ์กระแสชดเชยบนแกนสามเฟส คือ

$$\frac{di_{ck}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f}i_{ck} + \frac{1}{L_f}d_{sk}V_{dc} - \frac{1}{L_f}V_{pcc,k}; k = a, b, c$$

หรือ

$$\frac{d[i_{c(abc)}]}{dt} = -\frac{R_f}{L_f}[i_{c(abc)}] + \frac{1}{L_f}[d_{s(abc)}]V_{dc} - \frac{1}{L_f}[V_{pcc,(abc)}]$$

ดำเนินการแปลงสมการข้างต้นไปอยู่บนแกนดีควแสดงได้ดังนี้

$$\frac{d\mathbf{K}^{-1}[i_{c(dq)}]}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} \mathbf{K}^{-1}[i_{c(dq)}] + \frac{1}{L_f} \mathbf{K}^{-1}[d_{s(dq)}]V_{dc} - \frac{1}{L_f} \mathbf{K}^{-1}[V_{pcc,(dq)}]$$

สำหรับเทอม  $\frac{d\mathbf{K}^{-1}[i_{c(dq)}]}{dt}$  สามารถใช้คุณสมบัติอนุพันธ์ผลคูณได้ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $\mathbf{K}^{-1} \frac{d[i_{dq}]}{dt} + \frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt}[i_{dq}]$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mathbf{K}^{-1} \frac{d[i_{c(dq)}]}{dt} + \frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt}[i_{c(dq)}] = -\frac{R_f}{L_f} \mathbf{K}^{-1}[i_{c(dq)}] + \frac{1}{L_f} \mathbf{K}^{-1}[d_{s(dq)}]V_{dc} - \frac{1}{L_f} \mathbf{K}^{-1}[V_{pcc,(dq)}]$$

ดำเนินการคูณเมตริกซ์  $\mathbf{K}$  ตลอดทั้งสมการจะได้ดังสมการที่ (4.33)

$$\mathbf{K}\mathbf{K}^{-1} \frac{d[i_{c(dq)}]}{dt} + \mathbf{K} \frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt}[i_{c(dq)}] = -\frac{R_f}{L_f} \mathbf{K}\mathbf{K}^{-1}[i_{c(dq)}] + \frac{1}{L_f} \mathbf{K}\mathbf{K}^{-1}[d_{s(dq)}]V_{dc} - \frac{1}{L_f} \mathbf{K}\mathbf{K}^{-1}[V_{pcc,(dq)}]$$

หรือ

$$\frac{d[i_{c(dq)}]}{dt} + \mathbf{K} \frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt}[i_{c(dq)}] = -\frac{R_f}{L_f}[i_{c(dq)}] + \frac{1}{L_f}[d_{s(dq)}]V_{dc} - \frac{1}{L_f}[V_{pcc,(dq)}] \quad (4.33)$$

จากสมการที่ (4.33) ทำการแยกพิจารณาเฉพาะเทอม  $\mathbf{K} \frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt}$  ดังนี้

$$\mathbf{K} \frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \left( \frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt} \right)$$

โดยที่ค่า  $\frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt}$  สามารถคำนวณได้ดังนี้



$$\frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \right)$$

$$\frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\omega \sin(\theta) & -\omega \cos(\theta) & 0 \\ -\omega \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\omega \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\omega \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\omega \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mathbf{K} \frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt} = \frac{2}{3} \omega \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix}$$

หรือ

$$\mathbf{K} \frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt} = \frac{2}{3} \omega \begin{bmatrix} -\frac{3}{2} \sin(0) & -\frac{3}{2} \cos(0) & 0 \\ \frac{3}{2} \cos(0) & \frac{3}{2} \sin(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จากผลลัพธ์ของ  $\mathbf{K} \frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt}$  ในข้างต้นได้รวมองค์ประกอบเทอมศูนย์อยู่ด้วย ดังนั้นถ้าไม่พิจารณาเทอมของศูนย์ดังกล่าว สามารถเขียนผลลัพธ์ใหม่ได้ดังสมการที่ (4.34)

$$\mathbf{K} \frac{d\mathbf{K}^{-1}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

นำสมการที่ (4.34) กลับไปแทนลงในสมการที่ (4.33) จะได้ดังสมการที่ (4.35)

$$\frac{d[i_{c(dq)}]}{dt} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} [i_{dq}] = -\frac{R_f}{L_f} [i_{c(dq)}] + \frac{1}{L_f} [d_{s(dq)}] V_{dc} - \frac{1}{L_f} [V_{pcc,(dq)}] \quad (4.35)$$

จัดเทอมสมการที่ (4.35) ใหม่ให้อยู่ในรูปของค่าอนุพันธ์กระแสชดเชยบนแกนดี  
 คิวจะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{d[i_{c(dq)}]}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} [i_{c(dq)}] + \frac{1}{L_f} [d_{s(dq)}] V_{dc} - \frac{1}{L_f} [V_{pcc,(dq)}]$$

หรือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} d_{sd} \\ d_{sq} \end{bmatrix} V_{dc} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{pcc,d} \\ V_{pcc,q} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

กรณีสมการอนุพันธ์แรงดันบัสไฟตรง

จากแบบจำลองบนแกนสามเฟส สมการอนุพันธ์ของดันบัสไฟตรง คือ

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C_{dc}} \sum_{k=a,b,c} d_{sk} i_{ck} ; k=a,b,c$$

หรือ

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C_{dc}} [d_{s(abc)}]^T [i_{c(abc)}]$$

ดำเนินการแปลงสมการข้างต้น ไปอยู่บนแกนดีคิว แสดงได้ดังนี้

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C_{dc}} [\mathbf{K}^{-1} [d_{s(dq)}]]^T \mathbf{K}^{-1} [i_{c(dq)}]$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C_{dc}} [\mathbf{K}^{-1}]^T [d_{s(dq)}]^T \mathbf{K}^{-1} [i_{c(dq)}]$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C_{dc}} \mathbf{K} \mathbf{K}^{-1} [d_{s(dq)}]^T [i_{c(dq)}]$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C_{dc}} [d_{s(dq)}]^T [i_{c(dq)}]$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C_{dc}} [d_{sd} \quad d_{sq}] \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{d_{sd}i_{cd}}{C_{dc}} - \frac{d_{sq}i_{cq}}{C_{dc}} \quad (4.37)$$

จากสมการอนุพันธ์กระแสขดเคเบิลและแรงดันบัสไฟตรงบนแกนดีควิสมการที่ (4.36) และสมการที่ (4.37) นำมาเขียนใหม่รวมกันเป็นเมตริกซ์จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟดังสมการที่ (4.38)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega & \frac{d_{sd}}{L_f} \\ -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & \frac{d_{sq}}{L_f} \\ -\frac{d_{sd}}{C_{dc}} & -\frac{d_{sq}}{C_{dc}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{pcc,d} \\ V_{pcc,q} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

แทนค่าฟังก์ชันสวิตช์  $d_{s(dq)}$  ตามสมการที่ (4.29) และค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_{pcc,(dq)}$  ดังสมการที่ (4.30) ลงในสมการที่ (4.38) สุดท้ายจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีควิดังสมการที่ (4.39)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2L_f} \cos(\lambda) \\ -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2L_f} \sin(\lambda) \\ -\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2C_{dc}} \cos(\lambda) & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2C_{dc}} \sin(\lambda) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m}{2L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

#### 4.2.3 การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (model validation) วงจรกรองกำลังแอกทีฟตามระบบที่พิจารณารูปที่ 4.2 ในที่นี้จะทำการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแบบจำลองกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากการสร้างระบบที่พิจารณาโดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blocksets: PSB) ร่วมกับโปรแกรม Simulink โดยมีรายละเอียดดังนี้

การจำลองสถานการณ์ โดยใช้แบบจำลองของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

การจำลองสถานการณ์ระบบไฟฟ้ารูปที่ 4.2 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ จะใช้วิธีการกำหนดให้แบบจำลองดังกล่าวอยู่ในรูปของฟังก์ชันสถานะ (state function) ซึ่งจากสมการที่ (4.39) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสถานะได้ดังสมการที่ (4.40) ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{aligned} \quad (4.40)$$

โดยที่  $\mathbf{x}$  คือ ตัวแปรสถานะ (state variables) ของแบบจำลอง ( $\mathbf{x} = [i_{cd} \ i_{cq} \ V_{dc}]^T$ )

$u$  คือ อินพุตของแบบจำลอง ( $u = V_m$ )

$y$  คือ เอาต์พุตของแบบจำลอง ( $y = [i_{cd} \ i_{cq} \ V_{dc}]^T$ )

และเมตริกซ์  $\mathbf{A}$   $\mathbf{B}$   $\mathbf{C}$  และ  $\mathbf{D}$  ของแบบจำลอง คือ

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2L_f} \cos(\lambda) \\ -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2L_f} \sin(\lambda) \\ -\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2C_{dc}} \cos(\lambda) & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2C_{dc}} \sin(\lambda) & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = [0]$$

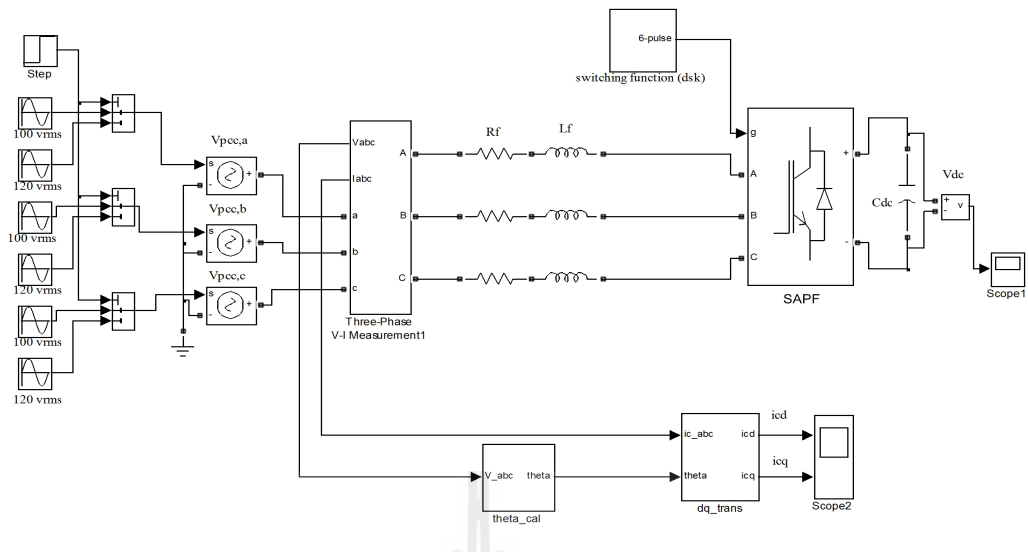
สำหรับค่ามุมต่างเฟส  $\lambda$  ระหว่างบัส PCC กับบัส AC สามารถคำนวณได้จากการนำมุมเฟสของแรงดัน  $V_{pcc}$  ลบด้วยมุมเฟสของแรงดัน  $u_c$  ซึ่งมุมเฟสของแรงดัน  $u_c$  ดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับมุมเฟสของสัญญาณแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์ ( $u_c^*$ ) ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้มุมเฟสของ  $u_c^*$  เท่ากับ 0 องศา ( $\phi = 0^\circ$ )

การโปรแกรมเพื่อหาผลเฉลยสมการสถานะ สมการที่ (4.40) เพื่อคำนวณค่าเอาต์พุตค่า  $i_{cd}$   $i_{cq}$  และ  $V_{dc}$  จะใช้วิธีการเขียนคำสั่ง ODE บน M-file ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งรายละเอียดโค้ดโปรแกรมดังกล่าวสามารถดูได้จาก ภาคผนวก ก.

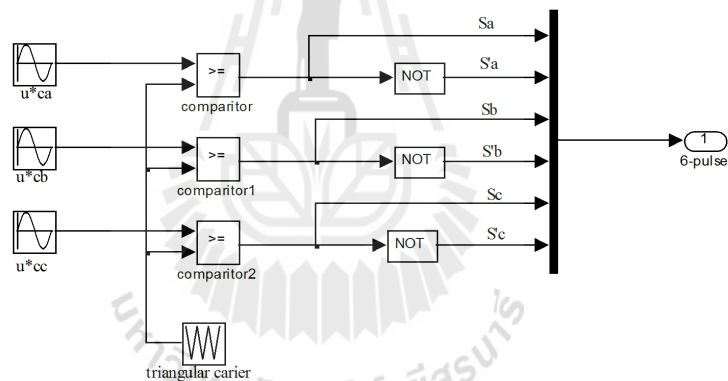
การจำลองสถานการณ์วงจรรอกกำลังแอกทีฟที่สร้างขึ้นโดยใช้ชุดบล็อก PSB จากระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 4.2 เมื่อนำมาสร้างโดยใช้ชุดบล็อก PSB ร่วมกับโปรแกรม Simulink สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 จากรูปดังกล่าว ภายในบล็อกฟังก์ชันการสวิตช์ หรือ switching function ( $d_{sk}$ ) แสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 4.6 จากรูปดังกล่าว คือ เทคนิคการสวิตช์อุปกรณ์ไอจีบีทีทั้ง 6 ตัว แบบวิธี PWM ซึ่งวิธีดังกล่าวจะนำสัญญาณแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์ทั้งสามเฟส ( $u_{ca}^*, u_{cb}^*, u_{cc}^*$ ) ในที่นี้ คือ สัญญาณรูปไซน์มุมเฟสเลื่อนเท่ากับ 0 องศา เปรียบเทียบกับสัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยม (triangular carrier:  $V_{tr}$ ) โดยมีค่าครรชนีการมอดูเลต หรือ  $M$  เป็นตัวกำหนดขนาดของแรงดันเอาต์พุตที่วงจรรอกกำลังแอกทีฟจ่ายออก ( $|u_{ca}|, |u_{cb}|, |u_{cc}|$ ) ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.41) และ (4.42) สำหรับการเปรียบเทียบของสองสัญญาณดังกล่าว มีเงื่อนไขในการสวิตช์ คือ ถ้า  $u_{ck}^* \geq V_{tr}$  สวิตช์  $S_k$  จะนำกระแส (on) และ  $S'_k$  หยุดนำกระแส (off) แต่ถ้า  $u_{ck}^* < V_{tr}$  สวิตช์  $S_k$  จะหยุดนำกระแส และ  $S'_k$  จะนำกระแสแทน โดยความถี่ของการสวิตช์ ( $f_{sw}$ ) ด้วยวิธี PWM จะมีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยมที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

$$M = \frac{|u_c^*|}{|V_{tr}|} = \frac{|u_c|}{\frac{V_{dc}}{2}} \quad (4.41)$$

$$|u_{ck}| = \frac{M}{2} V_{dc} \quad ; k=a, b, c \quad (4.42)$$



รูปที่ 4.5 ระบบไฟฟ้าพิจารณาที่สร้างขึ้นจากชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ โปรแกรม Simulink



รูปที่ 4.6 รายละเอียดภายในบล็อก switching function ( $d_{sk}$ )

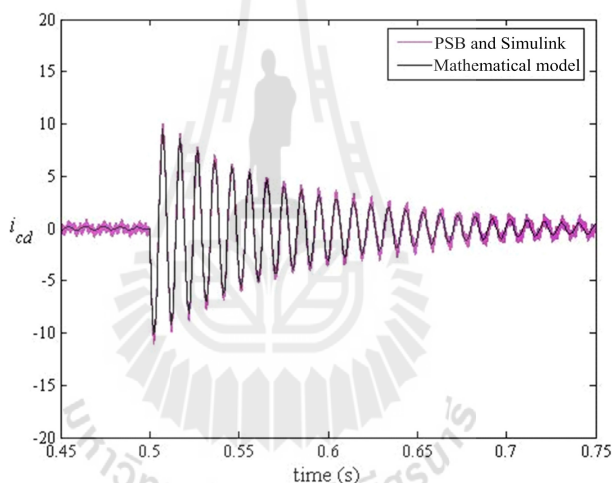
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC	$V_{pcc} = 100\angle 0^\circ \text{ V}_{rms} , 120\angle 0^\circ \text{ V}_{rms}$
ความถี่ของระบบ	$\omega = 100 \pi \text{ rad/s}$
ความต้านทานในสาย	$R_f = 0.1 \Omega$
ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง	$L_f = 5 \text{ mH}$
ตัวเก็บประจุดีซี	$C_{dc} = 150 \mu\text{F}$
ครรชนี้การมอดูเลต	$M = 0.8$

จากการอธิบายวิธีการจำลองสถานการณ์ทั้งของกรณีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และกรณีที่สร้างระบบโดยใช้ชุดบล็อก PSB และ Simulink ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบที่ พิจารณาสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

#### ผลการจำลองสถานการณ์

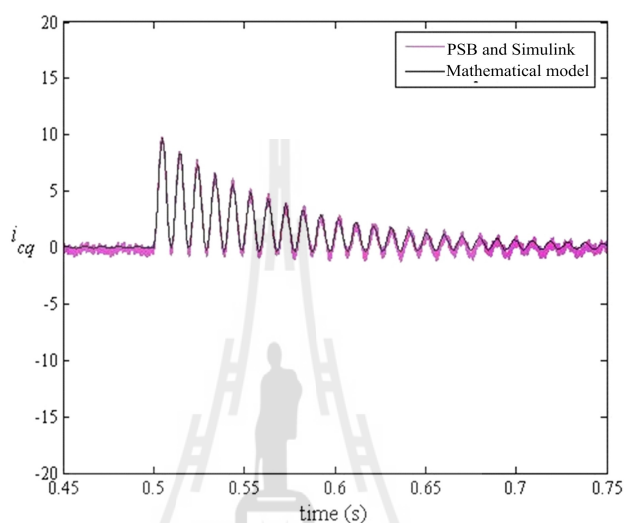
ผลการจำลองสถานการณ์ค่า  $i_{cd}$   $i_{cq}$  และ  $V_{dc}$  ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟใน ระบบไฟฟ้าที่พิจารณารูปที่ 4.2 ระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากการ จำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อก PSB และ Simulink ตั้งแต่เวลา 0.45 ถึง 0.75 วินาที แสดงได้ดัง รูปที่ 4.7 ถึง 4.9 ตามลำดับ โดยการจำลองสถานการณ์ได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดัน  $V_{pcc}$  จาก  $100 V_{rms}$  เป็น  $120 V_{rms}$  ตั้งแต่เวลา 0.5 วินาที เป็นต้นไป ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองใน สภาวะชั่วครู่ของทั้งสองกรณีดังกล่าว



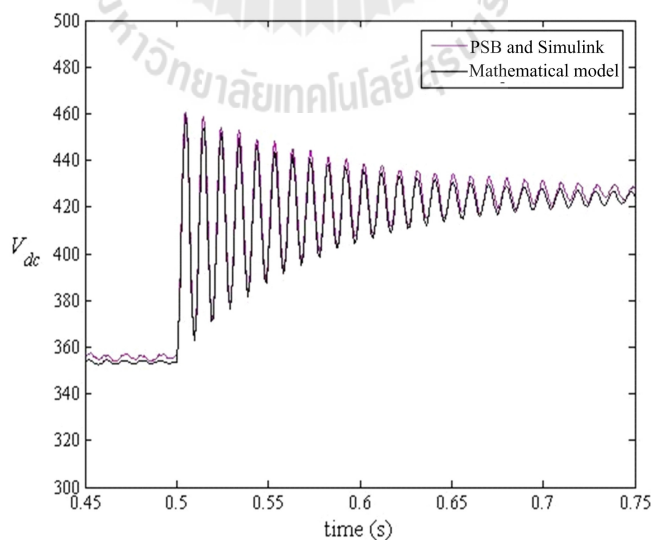
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า  $i_{cd}$

จากรูปที่ 4.7 ถึง 4.8 สังเกตได้ว่า ผลตอบสนองของค่า  $i_{cd}$  และ  $i_{cq}$  ที่ได้จากกรณี แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) จะมีลักษณะเป็นเส้นกราฟเรียบ ในขณะที่ ผลตอบสนองค่า  $i_{cd}$  และ  $i_{cq}$  ที่ได้จากกรณีการใช้ชุดบล็อก PSB และ Simulink (PSB and Simulink) จะมีการสั่นไหว ทั้งนี้เนื่องจากผลของความถี่ในการสวิตช์ สำหรับรูปที่ 4.9 ผลการจำลอง สถานการณ์เปรียบเทียบค่า  $V_{dc}$  จะเห็นได้ว่า ทั้งสองกรณีให้ผลการตอบสนองค่า  $V_{dc}$  ที่มีลักษณะ เป็นเส้นเรียบทั้งคู่ โดยในช่วงเวลาที่มีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดัน  $V_{pcc}$  จาก  $100 V_{rms}$  เป็น  $120 V_{rms}$  ที่ เวลา 0.5 วินาที เป็นต้นไป พบว่า กราฟ  $i_{cd}$  และ  $i_{cq}$  มีการแกว่งไกวก่อนที่จะเข้าสู่ค่าเท่ากับ 0 เช่นเดิม ส่วนกรณีค่า  $V_{dc}$  พบว่า มีลักษณะการแกว่งไกวจากค่า 355 V เพิ่มสู่ค่าเท่ากับ 425 V โดย

ผลการตอบสนอง  $i_{cd}$   $i_{cq}$  และ  $V_{dc}$  ดังกล่าวที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะคล้ายตามลักษณะของรูปกราฟที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยชุดบล็อกบล็อก PSB และ Simulink ซึ่งถ้าไม่พิจารณาถึงผลในการสวิตช์แล้ว สามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.2 มีความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อก PSB และ Simulink



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า  $i_{cq}$



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า  $V_{dc}$



### 4.3 การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวให้กับวงจรรอกำลังแอกทีฟจะใช้สมการอนุพันธ์กระแสชดเชยบนแกนดีคิวของแบบจำลองที่ได้จากหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งจากสมการที่ (4.36) นำมาเขียนแยกแกนดีและคิวได้ดังสมการที่ (4.43) และ (4.44) ตามลำดับดังนี้

$$\frac{di_{cd}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f}i_{cd} + \omega i_{cq} + \frac{u_{cd}}{L_f} - \frac{1}{L_f}V_{pcc,d} \quad ; \quad u_{cd} = d_{sd}V_{dc} \quad (4.43)$$

$$\frac{di_{cq}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f}i_{cq} - \omega i_{cd} + \frac{u_{cq}}{L_f} - \frac{1}{L_f}V_{pcc,q} \quad ; \quad u_{cq} = d_{sq}V_{dc} \quad (4.44)$$

จากสมการที่ (4.43) และ (4.44) จัดเทอมสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรอกำลังแอกทีฟ ( $u_{cd}, u_{cq}$ ) จะได้นี้

$$u_{cd} = L_f \frac{di_{cd}}{dt} + R_f i_{cd} - \omega L_f i_{cq} + V_{pcc,d} \quad (4.45)$$

$$u_{cq} = L_f \frac{di_{cq}}{dt} + R_f i_{cq} + \omega L_f i_{cd} + V_{pcc,q} \quad (4.46)$$

จากสมการข้างต้น ถ้าต้องการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีและคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) สามารถทำได้โดยการควบคุมผ่านค่าแรงดัน  $u_{cd}$  และ  $u_{cq}$  ซึ่งกำหนดให้ค่าแรงดันทั้งสอง คือ ค่าแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ ( $u_{cd}^*$  และ  $u_{cq}^*$ ) ดังสมการที่ (4.47) และ (4.48) โดยที่สมการดังกล่าวได้แทนเทอม  $L_f \frac{di_{cd}}{dt} + R_f i_{cd}$  และ  $L_f \frac{di_{cq}}{dt} + R_f i_{cq}$  ด้วยตัวแปร  $u_{LR,d}$  และ  $u_{LR,q}$  ตามลำดับ

$$u_{cd}^* = u_{LR,d} - \omega L_f i_{cq} + V_{pcc,d} \quad (4.47)$$

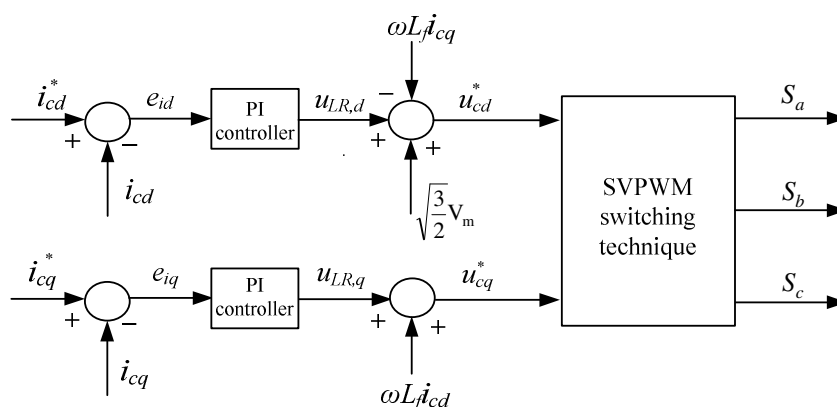
$$u_{cq}^* = u_{LR,q} + \omega L_f i_{cd} + V_{pcc,q} \quad (4.48)$$

ผลของการกำหนดมุมสำหรับการหมุนแปลงแกนคิกวี่ที่มุมแรงดัน  $V_{pcc}$  ดังนั้น จึงส่งผลให้ค่าแรงดัน  $V_{pcc,d}$  เท่ากับ  $\sqrt{3/2}V_m$  และค่าแรงดัน  $V_{pcc,q}$  เท่ากับ 0 จากผลดังกล่าว จึงทำให้เขียนสมการที่ (4.47) และ (4.48) ใหม่ได้ดังนี้

$$u_{cd}^* = u_{LR,d} - \omega i_{cq} + \sqrt{\frac{3}{2}}V_m \quad (4.49)$$

$$u_{cq}^* = u_{LR,q} + \omega i_{cd} \quad (4.50)$$

จากสองสมการข้างต้นจึงสามารถออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยร่วมกับการใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ได้ โดยการกำหนดให้เอาต์พุตของตัวควบคุม คือ ค่า  $u_{LR,d}$  และ  $u_{LR,q}$  ซึ่งแสดงเป็นแผนภาพระบบการควบคุมได้ดังรูปที่ 4.10 จากรูปดังกล่าว อินพุตของตัวควบคุม คือ ค่าผลต่างระหว่างกระแสอ้างอิงและกระแสชดเชยบนแกนดี ( $e_{id} = i_{cd}^* - i_{cd}$ ) และแกนคิก ( $e_{iq} = i_{cq}^* - i_{cq}$ ) โดยค่ากระแสอ้างอิงดังกล่าว คำนวณได้จากส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิก ด้วยวิธี SDF ที่ได้นำเสนอในบทที่ผ่านมา สำหรับเอาต์พุตของตัวควบคุม ( $u_{LR,d}, u_{LR,q}$ ) จะถูกนำไปดำเนินการทางคณิตศาสตร์กับเทอมต่าง ๆ ตามสมการที่ (4.49) และ (4.50) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ สัญญาณแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์ ( $u_{cd}^*, u_{cq}^*$ ) ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธีสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม (Space Vector PWM: SVPWM) เพื่อสร้างพัลส์สำหรับควบคุมสวิตช์ไอจีบีทีของวงจรรอกกำลังแยกที่ฟัั้งสามเฟส ( $S_a, S_b, S_c$ ) รายละเอียดเทคนิค SVPWM สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 4.5



รูปที่ 4.10 ระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนคิกวี่

หลังจากที่ได้ออกแบบโครงสร้างระบบควบคุมกระแสชดเชยแล้ว ลำดับต่อมา คือ การพิจารณาออกแบบค่า  $K_{pi}$  และ  $K_{li}$  ของตัวควบคุมพีไอ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

จากการกำหนดให้เอาต์พุตของตัวควบคุมบนแกนดี คือ  $u_{LR,d}$  และเอาต์พุตของตัวควบคุมบนแกนควิว คือ  $u_{LR,q}$  ดังนั้น จะได้ว่า

$$\underbrace{K_{pi}e_{id} + K_{li}\int e_{id}dt}_{PI \text{ controller}} = u_{LR,d} = L_f \frac{di_{cd}}{dt} + R_f i_{cd} \quad (4.51)$$

$$\underbrace{K_{pi}e_{iq} + K_{li}\int e_{iq}dt}_{PI \text{ controller}} = u_{LR,q} = L_f \frac{di_{cq}}{dt} + R_f i_{cq} \quad (4.52)$$

สมการที่ (4.51) และ (4.52) เป็นสมการในทางโดเมนเวลา (time domain) แต่การออกแบบตัวควบคุมในงานวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการอยู่บนโดเมนเอส เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) สมการดังกล่าวเพื่อให้ได้สมการทางโดเมนเอส ซึ่งผลการแปลงลาปลาซของสมการที่ (4.51) และ (4.52) แสดงได้ดังสมการที่ (4.53) และ (4.54) ตามลำดับ ดังนี้

$$K_{pi}e_{id} + \frac{K_{li}e_{id}}{s} = U_{LR,d} = L_f s I_{cd} + R_f I_{cd} \quad (4.53)$$

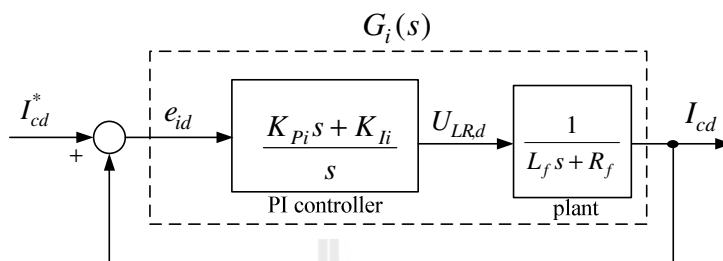
$$K_{pi}e_{iq} + \frac{K_{li}e_{iq}}{s} = U_{LR,q} = L_f s I_{cq} + R_f I_{cq} \quad (4.54)$$

จากสมการที่ (4.53) และ (4.54) สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function:  $\frac{C(s)}{R(s)}$ ) ของตัวควบคุมและพลานต์ (plant) ของระบบได้ดังสมการที่ (4.55) และ (4.56) ตามลำดับ ดังนี้

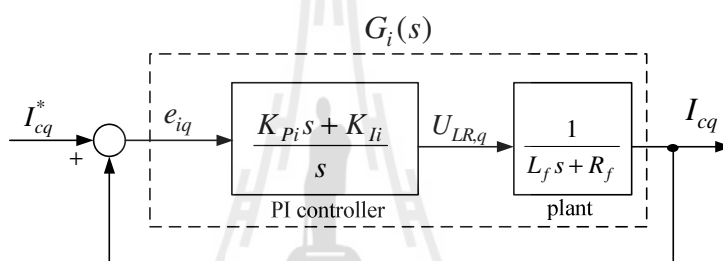
$$\frac{U_{LR,d}}{e_{id}} = \frac{U_{LR,q}}{e_{iq}} = \frac{K_{pi}s + K_{li}}{s} \quad (4.55)$$

$$\frac{I_{cd}}{U_{LR,d}} = \frac{I_{cq}}{U_{LR,q}} = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (4.56)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวควบคุมกับพลานต์ของระบบดังสมการที่ (4.55) กับสมการที่ (4.56) สามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อกการควบคุมกระแสชดเชยแบบวงปิด (closed loop) ได้ดังรูปที่ 4.11 ดังนี้



(ก) บล็อกการควบคุมกระแสสำหรับแกนดี



(ข) บล็อกการควบคุมกระแสสำหรับแกนคว

รูปที่ 4.11 แผนภาพบล็อกการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอบนแกนดีและคว

แผนภาพบล็อกดังรูปที่ 4.11 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน  $T_i(s)$  ของระบบควบคุมได้ดังสมการที่ (4.57) ดังนี้

$$T_i(s) = \frac{I_{cd}}{I_{cd}^*} = \frac{I_{cq}}{I_{cq}^*} = \frac{G_i(s)}{1 + G_i(s)H(s)} \Big|_{H(s)=1} = \frac{\frac{K_{pi}s + K_{li}}{L_f s^2 + R_f s}}{1 + \frac{K_{pi}s + K_{li}}{L_f s^2 + R_f s}}$$

หรือ

$$T_i(s) = \frac{K_{pi}}{L_f} \left( \frac{s + \frac{K_{li}}{K_{pi}}}{s^2 + \left(\frac{R_f + K_{pi}}{L_f}\right)s + \frac{K_{li}}{L_f}} \right) \quad (4.57)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมกระแสชดเชยดังสมการที่ (4.57) เมื่อพิจารณาการออกแบบค่า  $K_{P_i}$  และ  $K_{I_i}$  โดยใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามลักษณะเฉพาะ (characteristic polynomial) ของฟังก์ชันถ่ายโอน  $T_i(s)$  กับพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานดังสมการที่ (4.58) ผลการเทียบสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะทำให้ได้สมการสำหรับออกแบบค่า  $K_{P_i}$  และ  $K_{I_i}$  ดังสมการที่ (4.59) และ (4.60) ตามลำดับ

$$G(s) = \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2} \quad (4.58)$$

$$K_{P_i} = 2\zeta\omega_{ni}L_f - R_f \quad (4.59)$$

$$K_{I_i} = \omega_{ni}^2 L_f \quad (4.60)$$

โดยที่  $\zeta$  คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.707  
 $\omega_{ni}$  คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของตัวควบคุมกระแสชดเชย  
 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2\pi f_h$  rad/s  
 $f_h$  คือ ความถี่ของลำดับฮาร์โมนิกลำดับสูงสุดที่พิจารณากำจัดในระบบ

#### 4.4 การออกแบบระบบควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

การออกแบบระบบควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟเริ่มต้นจากการพิจารณาสมการของแบบจำลองสมการที่ (4.38) ในส่วนของสมการอนุพันธ์แรงดันบัลไฟตรงบนแกนดีคิว ซึ่งถ้าเขียนสมการดังกล่าวใหม่จะได้ดังสมการที่ (4.61) ดังนี้

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = -d_{sd}i_{cd} - d_{sq}i_{cq} \quad (4.61)$$

และจากสมการที่ (4.31) คือ  $i_{dc} = d_{sd}i_{cd} + d_{sq}i_{cq}$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_{dc} = -d_{sd}i_{cd} - d_{sq}i_{cq} \quad (4.62)$$

ทำการแทนค่าฟังก์ชันสวิตช์  $d_{sd}$  และ  $d_{sq}$  ตามสมการที่ (4.29) จะได้ดังสมการที่ (4.63)

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_{dc} = -\left(\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2} \cos(\lambda)\right) i_{cd} + \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2} \sin(\lambda)\right) i_{cq} \quad (4.63)$$

การออกแบบระบบควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟในที่นี่จะกำหนดใช้เงื่อนไขการออกแบบให้มุมต่างเฟส ( $\lambda$ ) มีค่าเท่ากับ 0 จากผลดังกล่าวจึงทำให้สมการที่ (4.63) ปรากฏเหลือเพียงเทอมของ  $i_{cd}$  ดังสมการที่ (4.64) และเพื่อง่ายต่อการอธิบายจึงกำหนดให้ใช้ตัวแปรใหม่แทนค่า  $-i_{dc}$  คือ  $i_{cd,v}^*$  ซึ่งเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (4.65)

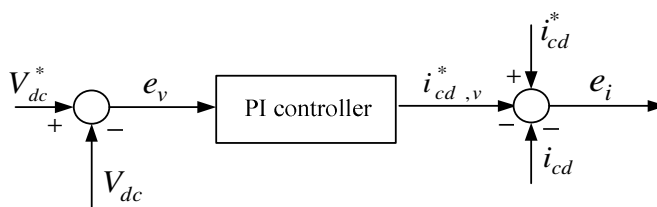
$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_{dc} = -\left(\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2}\right) i_{cd} \quad (4.64)$$

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_{dc} = \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2}\right) (i_{cd,v}^*) \quad (4.65)$$

จากสมการที่ (4.65) สามารถออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงโดยใช้ตัวควบคุมพีไอได้โดยการกำหนดให้เอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ คือ ค่า  $i_{cd,v}^*$  ดังแสดงได้จากสมการที่ (4.66)

$$i_{cd,v}^* = \underbrace{K_{Pv} e_v + K_{Iv} \int e_v dt}_{PI \text{ controller}} \quad (4.66)$$

โดยที่  $e_v$  คือ ผลต่างระหว่างค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง ( $V_{dc}^*$ ) และค่าแรงดันจริงที่วัดคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_{dc}$  ( $V_{dc}$ ) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ระบบควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงบนแกนดี

ลำดับต่อมา พิจารณาแปลงลาปลาซสมการที่ (4.65) และ (4.66) ซึ่งผลการแปลงได้ดังสมการที่ (4.67) และ (4.68) ตามลำดับดังนี้

$$C_{dc}sV_{dc} = -I_{dc} = \left( \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2} \right) (I_{cd,v}^*) \quad (4.77)$$

$$I_{cd,v}^* = K_{Pv}e_v + \frac{K_{Iv}e_v}{s} \quad (4.78)$$

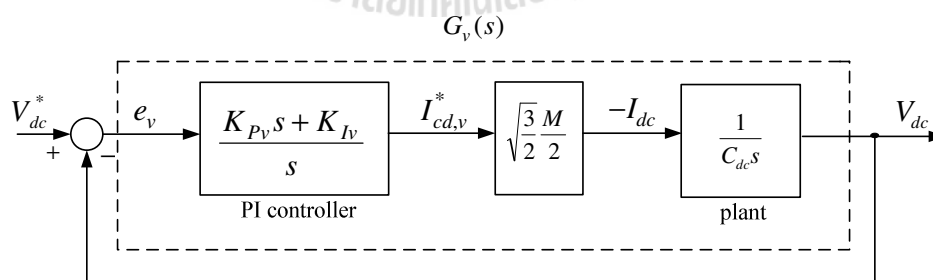
สมการที่ (4.67) และ (4.68) สามารถเขียนแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมและพลานต์ของระบบได้ดังสมการที่ (4.69) และ (4.70) ตามลำดับ

$$\frac{I_{cd,v}^*}{e_v} = \frac{K_{Pv}s + K_{Iv}}{s} \quad (4.69)$$

$$\frac{V_{dc}}{-I_{dc}} = \frac{1}{C_{dc}s} \quad (4.70)$$

$$\frac{-I_{dc}}{I_{cd,v}^*} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2} \quad (4.71)$$

จากสมการที่ (4.69) และ (4.70) สามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อกการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงแบบวงปิดได้ดังรูปที่ 4.13 โดยการเชื่อมโยงระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมกับพลานต์ของระบบอาศัยการคำนวณตามสมการที่ (4.71)



รูปที่ 4.13 แผนภาพบล็อกการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

แผนภาพบล็อกดังรูปที่ 4.13 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน  $T_v(s)$  ของระบบควบคุมได้ดังสมการที่ (4.72)

$$T_v(s) = \frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{G_v(s)}{1 + G_v(s)H(s)} \Big|_{H(s)=1} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2} \left( \frac{K_{Pv}s + K_{Iv}}{C_{dc}s^2} \right)}{1 + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2} \left( \frac{K_{Pv}s + K_{Iv}}{C_{dc}s^2} \right)}$$

หรือ

$$T_v(s) = \frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2} \frac{K_{Pv}}{C_{dc}} \left( \frac{s + \frac{K_{Iv}}{K_{Pv}}}{s^2 + \left( \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2} \frac{K_{Pv}}{C_{dc}} \right) s + \left( \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{2} \frac{K_{Iv}}{C_{dc}} \right)} \right) \quad (4.72)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนสมการที่ (4.72) ทำการออกแบบค่า  $K_{Pv}$  และ  $K_{Iv}$  โดยใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์พจน์พหุนามลักษณะเฉพาะกับฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานสมการที่ (4.58) ซึ่งผลการเทียบสัมประสิทธิ์แสดงได้ดังสมการที่ (4.73) และ (4.74) ตามลำดับ

$$K_{Pv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{4}{M} \zeta \omega_{nv} C_{dc} \quad (4.73)$$

$$K_{Iv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{2}{M} \omega_{nv}^2 C_{dc} \quad (4.74)$$

โดยที่  $\omega_{nv}$  คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) กรณีการควบคุมค่าแรงดัน

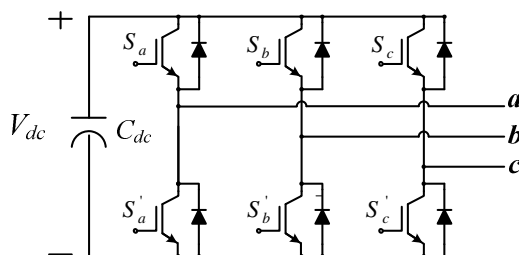
บัสไฟตรง (การออกแบบค่า  $\omega_{nv}$  ควรออกแบบให้มีค่าน้อย) (Mendalek N. and et al, 2003)

#### 4.5 เทคนิคการสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม

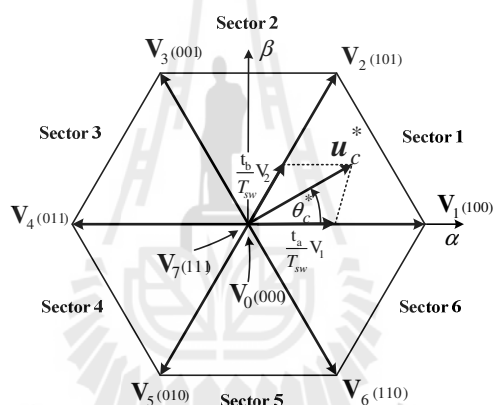
วงจรกรองกำลังแอกทีฟมีโครงสร้างดังรูปที่ 4.14 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไอจีบีที (IGBT) 6 ตัว เป็นวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีตัวเก็บประจุ ( $C_{dc}$ ) เป็นแหล่งเก็บสะสมพลังงาน การควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้สามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามกระแสอ้างอิงสามารถทำได้โดยการควบคุมการสวิตช์อุปกรณ์ไอจีบีทีทั้ง 6 ตัว โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกเทคนิคการสวิตช์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม (SVPWM) ทั้งนี้เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถให้ประสิทธิภาพการสวิตช์ที่ดี ให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมากกว่าวิธี PWM และก่อให้เกิดปริมาณฮาร์มอนิกเนื่องจากผลการสวิตช์น้อยกว่าวิธี PWM



(Kumar T.V. and Rao S.S., 2010) รายละเอียดการสวิตช์ด้วยวิธี SVPWM สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.14 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน



รูปที่ 4.15 ไดอะแกรมสเปซเวกเตอร์

การสวิตช์อุปกรณ์ไอจีบีทีด้วยวิธี SVPWM เป็นวิธีการควบคุมการสวิตช์ทั้งสามเฟสไปพร้อม ๆ กันซึ่งรูปแบบการ on (1) และ off (0) ของสวิตช์ไอจีบีทีที่ตัวบนทั้งสามตัว ( $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$ ) สามารถแบ่งออกได้เป็น 8 สถานะเวกเตอร์แรงดัน คือ  $V_0(000)$   $V_1(100)$   $V_2(110)$   $V_3(010)$   $V_4(011)$   $V_5(001)$   $V_6(101)$  และ  $V_7(111)$  โดย  $V_0$  และ  $V_7$  คือ เวกเตอร์ศูนย์ (zero vector) และ  $V_1$  ถึง  $V_6$  คือ เวกเตอร์แอกทีฟ (active vector) ซึ่งตำแหน่งของเวกเตอร์แรงดันทั้ง 8 เวกเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 จากรูปดังกล่าว ตำแหน่งของเวกเตอร์แรงดันทั้งหมดสามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็น 6 ส่วน ซึ่งจะเรียกว่า เซกเตอร์ (sector) โดยแต่ละเซกเตอร์จะมีมุมกว้างเท่า ๆ กันเท่ากับ  $\pi/3$  rad ส่วน  $u^*$  คือ เวกเตอร์แรงดันอ้างอิงในการสวิตช์ ซึ่งการคำนวณค่าดังกล่าวจะอธิบายไว้ในส่วนของหลักการสวิตช์ต่อไป ค่าแรงดันของเวกเตอร์ทั้ง 8 สามารถแปลงให้อยู่บนแกนแอลฟาเบต้าซึ่งคู่ได้จากตารางที่ 4.2 โดยค่าแรงดันดังกล่าว คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรกรอง

กำลังแอกทีฟบนแกนแอลฟาเบต้า (การแปลงปริมาณไฟฟ้าใด ๆ จากแกนสามเฟสไปอยู่บนแกนแอลฟาเบต้า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.23))

หลักการสวิตช์อุปกรณ์ไอจีบีทีทั้ง 6 ตัว ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ที่ดับเบิลยูเอ็มสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่าขนาด ( $|u_c^*|$ ) และมุม ( $\theta_c^*$ ) ของเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงในการสวิตช์ ( $u_c^*$ ) จากสมการที่ (4.75) และ (4.76) ตามลำดับ โดยอาศัยค่าแรงดันอ้างอิงบนแกนแอลฟาเบต้า  $u_{c\alpha}^*$  และ  $u_{c\beta}^*$

$$|u_c^*| = \sqrt{u_{c\alpha}^{*2} + u_{c\beta}^{*2}} \quad (4.75)$$

$$\theta_c^* = \tan^{-1} \left( \frac{u_{c\beta}^*}{u_{c\alpha}^*} \right) \quad (4.76)$$

จากการคำนวณหาค่า  $\theta_c^*$  ของเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงการสวิตช์ตามสมการที่ (4.76) จะทำให้ทราบว่าเวกเตอร์แรงดันดังกล่าวตกอยู่ในเซกเตอร์ใด ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 4.15 ถ้าค่า  $\theta_c^*$  อยู่ในช่วง 0 ถึง  $\pi/3$  เวกเตอร์  $u_c^*$  จะอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 (sector 1) เป็นต้น สำหรับค่า  $\theta_c^*$  ค่าอื่น ๆ สามารถระบุเซกเตอร์ได้ตามตารางที่ 4.3 ซึ่งจากตารางดังกล่าว รูปแบบการสวิตช์ของทั้ง 6 เซกเตอร์ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันบนแกนอ้างอิงแอลฟาเบต้าตามรูปแบบสถานะสวิตช์ไอจีบีทีสามตัวบน

รูปแบบสถานะสวิตช์	แรงดันเอาต์พุตของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกน $\alpha\beta$		
$V_{0-7}(s_a, s_b, s_c)$	$u_{c\alpha}^*$	$u_{c\beta}^*$	$ u_c^*  \angle \theta_c^*$
$V_0 (000)$	0	0	0
$V_1 (100)$	$\sqrt{2}V_{dc}/\sqrt{3}$	0	$\sqrt{2}V_{dc}/\sqrt{3} \angle 0$
$V_2 (101)$	$V_{dc}/\sqrt{6}$	$V_{dc}/\sqrt{2}$	$\sqrt{2}V_{dc}/\sqrt{3} \angle \pi/3$
$V_3 (001)$	$-V_{dc}/\sqrt{6}$	$V_{dc}/\sqrt{2}$	$\sqrt{2}V_{dc}/\sqrt{3} \angle 2\pi/3$
$V_4 (011)$	$-\sqrt{2}V_{dc}/\sqrt{3}$	0	$\sqrt{2}V_{dc}/\sqrt{3} \angle \pi$
$V_5 (010)$	$-V_{dc}/\sqrt{6}$	$-V_{dc}/\sqrt{2}$	$\sqrt{2}V_{dc}/\sqrt{3} \angle 4\pi/3$
$V_6 (110)$	$V_{dc}/\sqrt{6}$	$-V_{dc}/\sqrt{2}$	$\sqrt{2}V_{dc}/\sqrt{3} \angle 5\pi/3$
$V_7 (111)$	0	0	0

หมายเหตุ:  $|u_c^*| < \theta_c^*$  คือ ขนาดและมุมของแรงดันเอาต์พุตจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนแอลฟาเบต้า ซึ่งการคำนวณขนาดของแรงดันใช้สมการ  $|u_c^*| = \sqrt{u_{c\alpha}^{*2} + u_{c\beta}^{*2}}$

ตารางที่ 4.3 การระบุเซกเตอร์ของมุม  $\theta_c^*$  ใดๆ

เซกเตอร์	มุม $\theta_c^*$	เซกเตอร์	มุม $\theta_c^*$
1	$0 \leq \theta_c^* < \pi/3$	4	$\pi \leq \theta_c^* < 4\pi/3$
2	$\pi/3 \leq \theta_c^* < 2\pi/3$	5	$4\pi/3 \leq \theta_c^* < 5\pi/3$
3	$2\pi/3 \leq \theta_c^* < \pi$	6	$5\pi/3 \leq \theta_c^* < 2\pi$

ขั้นที่ 2 จำนวนช่วงเวลาการสวิตช์  $t_a$ ,  $t_b$  และ  $t_0$  ที่ปรากฏอยู่ในรูปที่ 4.16 ของเซกเตอร์  $n$  ใดๆ โดยใช้สมการที่ (4.77) ถึง (4.79) ตามลำดับดังนี้

$$t_a = \frac{\sqrt{2}T_{sw}|u_c^*|}{V_{dc}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_c^* + \frac{n-1}{3}\pi\right) \quad (4.77)$$

$$t_b = \frac{\sqrt{2}T_{sw}|u_c^*|}{V_{dc}} \sin\left(\theta_c^* + \frac{n-1}{3}\pi\right) \quad (4.78)$$

$$t_0 = T_{sw} - t_a - t_b \quad (4.79)$$

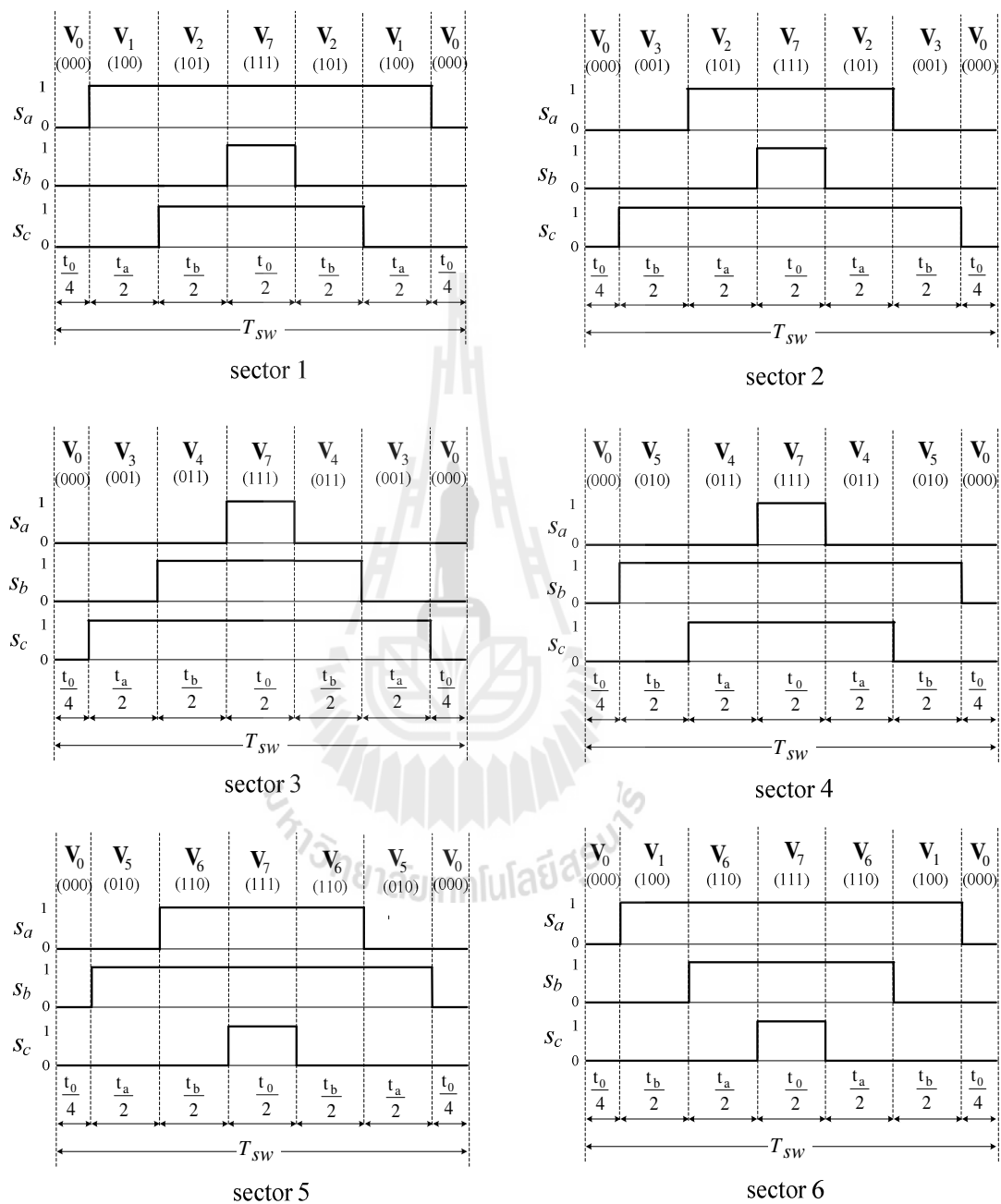
โดยที่  $n$  คือ ลำดับของเซกเตอร์ ( $n=1, 2, 3 \dots 6$ )

$T_{sw}$  คือ คาบเวลาการสวิตช์ (s)

ขั้นที่ 3 จำนวนสัญญาณอ้างอิงสามเฟส  $T_a$ ,  $T_b$  และ  $T_c$  สำหรับเปรียบเทียบกับสัญญาณพหุสามเหลี่ยมของแต่ละเซกเตอร์ โดยอาศัยค่าผลรวมของช่วงเวลาการสวิตช์  $on$  ของสวิตช์  $S_a$ ,  $S_b$  และ  $S_c$  ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.4

ขั้นที่ 4 สร้างพัลส์สัญญาณควบคุมสวิตช์ทั้ง 6 ตัว โดยนำสัญญาณ  $T_a$ ,  $T_b$  และ  $T_c$  เปรียบเทียบกับสัญญาณพหุรูปสามเหลี่ยม ( $V_{tr}$ ) ที่มีความถี่เท่ากับ  $f_{tr} = 1/T_{sw}$  ดังรูปที่ 4.17 โดยถ้า  $T_a$ ,  $T_b$  และ  $T_c$  มากกว่า  $V_{tr}$  สวิตช์ไอจีบีทีตัวบน  $S_a$ ,  $S_b$  และ  $S_c$  จะนำกระแส (on) ในขณะที่สวิตช์ตัวล่าง  $S'_a$ ,  $S'_b$  และ  $S'_c$  จะไม่นำกระแส (off) แต่ถ้า  $T_a$ ,  $T_b$  และ  $T_c$  น้อยกว่า  $V_{tr}$  สวิตช์ไอจีบีทีตัวบน  $S_a$ ,  $S_b$  และ  $S_c$  จะไม่นำกระแส (off) และสวิตช์ตัวล่าง  $S'_a$ ,  $S'_b$  และ  $S'_c$  จะนำกระแส

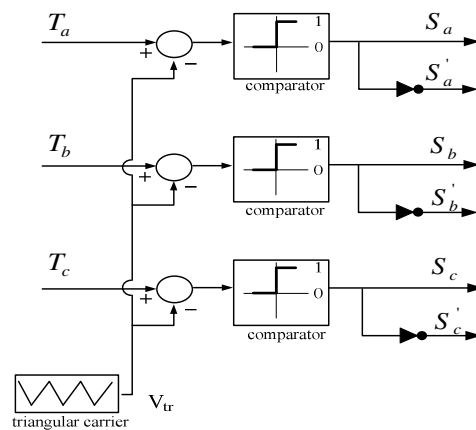
(om) แทน ตัวอย่างการสวิตช์สำหรับเซกเตอร์ที่ 1 สามารถดูได้จากรูปที่ 4.18 โดยความถี่ของการสวิตช์จะมีค่าเท่ากับของความถี่สัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยมที่ใช้ในการเปรียบเทียบ



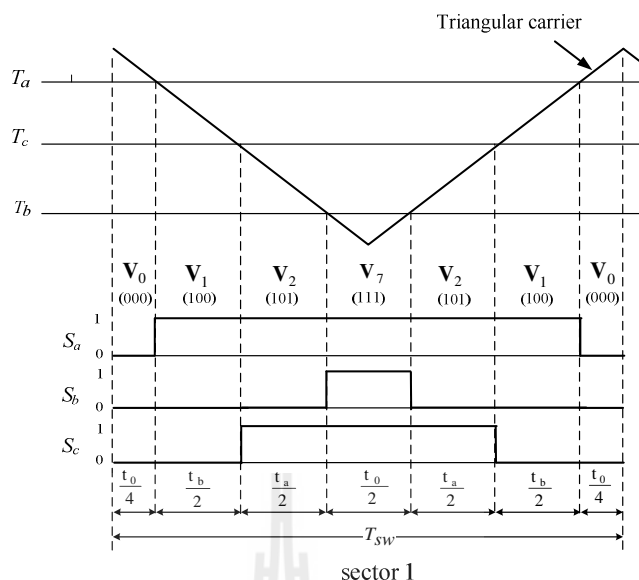
รูปที่ 4.16 รูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์ที่ 1 ถึง 6

ตารางที่ 4.4 สัญญาณอ้างอิง  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_c$  ของทั้ง 6 เซกเตอร์

เซกเตอร์	ช่วงเวลาการสวิตช์
1	$T_a = t_a/2 + t_b/2 + t_0/2 + t_b/2 + t_a/2$
	$T_b = t_0/2$
	$T_c = t_b/2 + t_0/2 + t_b/2$
2	$T_a = t_a/2 + t_0/2 + t_a/2$
	$T_b = t_0/2$
	$T_c = t_b/2 + t_a/2 + t_0/2 + t_a/2 + t_b/2$
3	$T_a = t_0/2$
	$T_b = t_b/2 + t_0/2 + t_b/2$
	$T_c = t_a/2 + t_b/2 + t_0/2 + t_b/2 + t_a/2$
4	$T_a = t_0/2$
	$T_b = t_b/2 + t_a/2 + t_0/2 + t_a/2 + t_b/2$
	$T_c = t_a/2 + t_0/2 + t_a/2$
5	$T_a = t_b/2 + t_0/2 + t_b/2$
	$T_b = t_a/2 + t_b/2 + t_0/2 + t_b/2 + t_a/2$
	$T_c = t_0/2$
6	$T_a = t_b/2 + t_a/2 + t_0/2 + t_a/2 + t_b/2$
	$T_b = t_a/2 + t_0/2 + t_a/2$
	$T_c = t_0/2$



รูปที่ 4.17 บล็อกไดอะแกรมการสร้างพัลส์ควบคุมสวิตช์อุปกรณ์ไอจีบีทีทั้ง 6 ตัว



รูปที่ 4.18 รูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์ที่ 1

#### 4.6 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟ

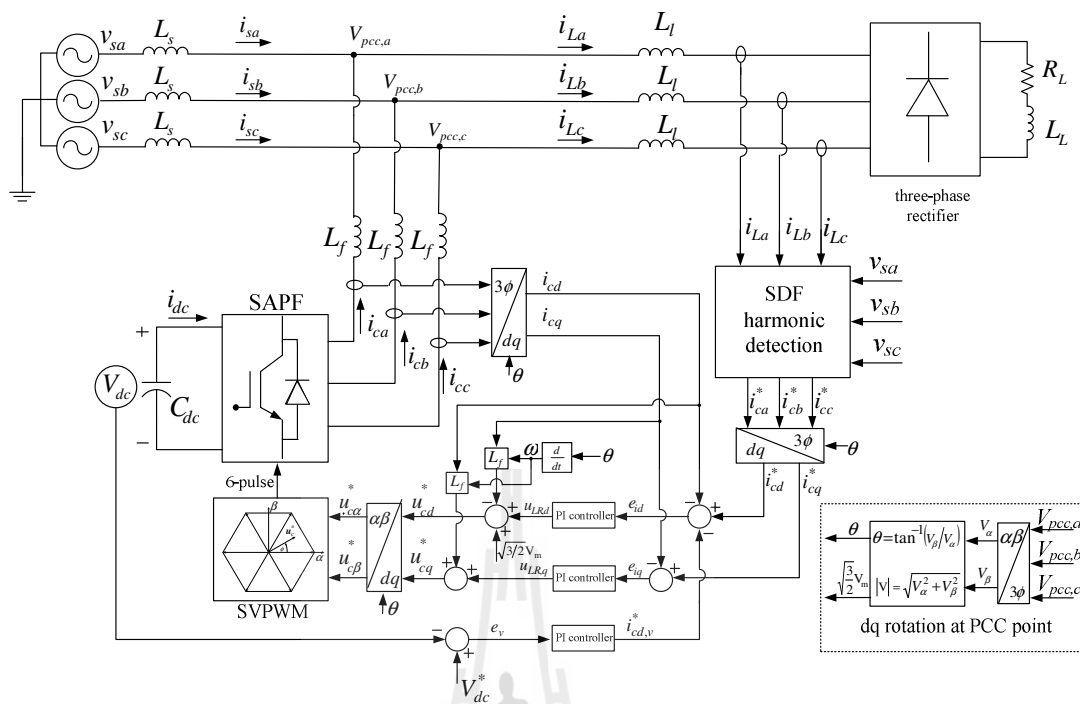
การจำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกโดยใช้วงจรรองกำลังแอกทีฟที่ได้ออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรงบนแกนคิดตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.19 จากรูปดังกล่าว ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

**ส่วนที่ 1** ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่มีแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายเท่ากับ  $100 V_{rms}$  ความถี่เท่ากับ 50 Hz โดยระบบไฟฟ้างดังกล่าวต่อเข้ากับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งผลของการต่อโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า

**ส่วนที่ 2** บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิก (harmonic detection) ทำหน้าที่คำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย ( $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ ) ให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยในที่นี้ใช้วิธี SDF

**ส่วนที่ 3** ระบบควบคุมการทำงานของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ได้แก่ การควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนคิดไว้รวมกับการใช้ตัวควบคุมพีไอและเทคนิคการสวิตช์แบบ SVPWM

**ส่วนที่ 4** วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 4.19 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบกำจัดฮาร์มอนิกที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา	$v_s = 100 \text{ V}_{\text{rms}} \text{ 50 Hz}$ , $L_s = 10 \text{ } \mu\text{H}$ , $L_l = 3 \text{ mH}$
โหลดของวงจรเรียงกระแส	$R_L = 80 \text{ } \Omega$ , $L_L = 0.5 \text{ H}$
พารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ	$V_{dc}^* = 360 \text{ V}$ , $C_{dc} = 2300 \text{ } \mu\text{F}$ , $L_f = 0.018 \text{ H}$
ความถี่ในการสวิตช์ (SVPWM)	$f_{sw} = 5 \text{ kHz}$
ตัวควบคุมพีไอสำหรับรูปการควบคุมกระแส	$K_{P_i} = 399.7990$ , $K_{I_i} = 4.4413 \times 10^6$
ตัวควบคุมพีไอสำหรับรูปการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง	$K_{P_v} = 0.2085$ , $K_{I_v} = 4.6336$

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าสำหรับรูปที่ 4.19 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 โดยยกออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ได้แก่ ค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}^*$ ) ค่าตัวเก็บประจุดีซี ( $C_{dc}$ ) และค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง ( $L_f$ ) ได้ใช้วิธีการต่าง ๆ ดังนี้

### การออกแบบค่าแรงดันบัลไฟตรง

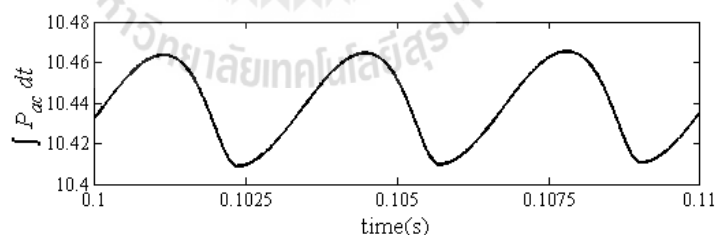
การออกแบบค่า  $V_{dc}^*$  จะใช้วิธีการเลือกค่าแรงดันที่มีขนาดมากกว่า 1.5 เท่าของค่า ยอดแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (Benchaita, L. and et al., 1999) (ค่ายอด  $V_{pcc} \approx 142$  V) ทั้งนี้เนื่องจากการกำหนดทิศทางกรไหลของกระแสชดเชย คือ จากวงจรกรองกำลังแอกทีฟไปยังโหลด ดังนั้นค่าแรงดัน  $V_{dc}^*$  จึงจำเป็นต้องมีค่ามากกว่าค่า  $V_{pcc}$  ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้ค่าเท่ากับ 360 V (ประมาณ 2.5 เท่าของค่ายอด  $V_{pcc}$ )

### การออกแบบค่าตัวเก็บประจุคิซี

การออกแบบค่า  $C_{dc}$  จะใช้หลักวิธีการออกแบบของ Thierry Thomas และคณะ (Thomas, T. and et al., 1998) โดยอาศัยการเลือกค่าตัวเก็บประจุที่มากกว่าค่าตัวเก็บประจุ  $C_{dc,min}$  ซึ่งค่า  $C_{dc,min}$  ดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.80) โดยการคำนวณจะอาศัยค่าปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟสามเฟส ( $P_{ac}$ ) และค่า  $V_{dc}^*$

$$C_{dc,min} = \frac{\Delta \int P_{ac} dt}{\Delta V_{dc}^* \times V_{dc}^*} \quad (4.80)$$

โดยที่  $\Delta V_{dc}^*$  คือ ค่าขนาดความพลิว (ripple) ของสัญญาณค่า  $V_{dc}^*$  ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุโดยปกติควรจะกำหนดให้มีค่าน้อย ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยได้กำหนดใช้ค่า  $\Delta V_{dc}^*$  สำหรับการออกแบบมีค่าเท่ากับ 5 V (< 2%)



รูปที่ 4.20 ผลรวมแบบอินทิเกรตปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ

สำหรับค่า  $\Delta \int P_{ac} dt$  สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.20 จากรูปดังกล่าว คือ สัญญาณการอินทิเกรตของค่า  $P_{ac}$  ที่เกิดขึ้นในระบบพิจารณา ซึ่งวัดค่า  $\Delta \int P_{ac} dt$  ได้ประมาณเท่ากับ 0.052 (10.462-10.410) นอกจากนี้ จากการออกแบบค่า  $V_{dc}^*$  เท่ากับ 360 V เมื่อทำการแทนค่าลงในสมการที่ (4.80) จะได้ว่า



$$C_{dc,\min} = \frac{0.052}{5 \times 360} = 28.88 \mu\text{F} \quad (\text{ผู้วิจัยเลือกใช้ } C_{dc} = 2300 \mu\text{F})$$

### การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

การออกแบบค่า  $L_f$  จะใช้วิธีการของ Ingram and Round (Ingram, D.M.E. and Round, S.D., 1997) คือ เลือกค่าที่มีขนาดไม่เกินค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ( $L_{f,\max}$ ) ที่ทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะกระแสอ้างอิงที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณสูงสุดได้ โดยการคำนวณแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงสูงสุด ( $\max(\frac{d i_c^*}{dt})$ ) โดยอาศัยองค์ประกอบของลำดับกระแสฮาร์มอนิก (Harmonic order) ที่มีขนาดกระแสมากที่สุด ( $i_{h(\max)}(t)$ ) ดังสมการที่ (4.81) และ (4.82) ดังนี้

$$i_{h,\max}(t) = A \sin(2\pi f t) \quad (4.81)$$

$$\max\left(\frac{d i_c^*}{dt}\right) \approx A 2\pi f \quad (4.82)$$

โดยที่  $A$  คือ แอมพลิจูดของลำดับกระแสฮาร์มอนิกที่มีขนาดกระแสสูงสุด (A)

$f$  คือ ความถี่ของลำดับฮาร์มอนิกที่มีขนาดกระแสสูงสุด (Hz)

สเปกตรัมขนาดกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังรูปที่ 4.19 ดูได้จากรูปที่ 4.21 ซึ่งสังเกตได้ว่า ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ( $f_5 = 250 \text{ Hz}$ ) มีขนาดกระแสมากที่สุดเท่ากับ 0.62 A ดังนั้น เมื่อทำการแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (4.82) จะได้ว่า

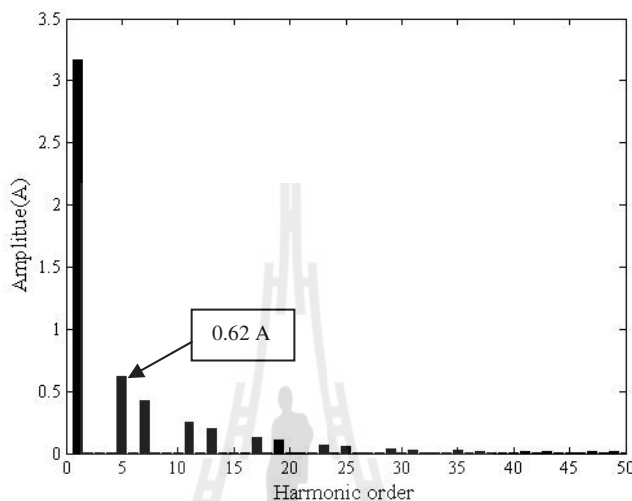
$$\max\left(\frac{d i_c^*}{dt}\right) \approx 0.62 \times 2\pi \times 250 = 973.90 \text{ A/s}$$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด หรือค่า  $L_{f,\max}$  จากสมการที่ (4.83) ดังนี้

$$L_{f,\max} = \frac{V_{dc}^* - V_{pcc}}{\max\left(\frac{d i_c^*}{dt}\right)} \quad (4.83)$$

แทนค่า  $V_{dc}^*$  และค่า  $\max(\frac{di_c^*}{dt})$  ลงในสมการที่ (4.83) จะได้ว่า

$$L_{f,\max} = \frac{360 - 142}{973.90} = 0.22 \text{ H} \quad (\text{ผู้วิจัยเลือกใช้ } L_f = 0.018 \text{ H})$$



รูปที่ 4.21 สเปกตรัมฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

นอกจากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้อธิบายในข้างต้นแล้ว การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรงสามารถอธิบายได้ดังนี้

การออกแบบค่า  $K_{P_i}$  และ  $K_{I_i}$  ของตัวคุมแบบพีไอสำหรับควบคุมกระแสชดเชย

จากสมการสำหรับการออกแบบค่า  $K_{P_i}$  และ  $K_{I_i}$  ดังสมการที่ (4.59) และ (4.60) การออกแบบจะพิจารณากำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าที่พิจารณาลำดับสูงสุดที่  $h = 50$  ( $f_{50} = 2500 \text{ Hz}$ ) ดังนั้น จะได้ค่า  $K_{P_i}$  และ  $K_{I_i}$  ดังนี้

$$\omega_{ni} = 2\pi f_{50} = 2 \times \pi \times 2500 = 5000\pi \text{ rad/s}$$

$$K_{P_i} = 2\zeta\omega_{ni}L_f - R_f = 2(0.707)(5000\pi)(0.018) - 0 = 399.7990$$

$$K_{I_i} = \omega_{ni}^2 L_f = (5000\pi)^2 (0.018) = 4.4413 \times 10^6$$

การออกแบบค่า  $K_{Pv}$  และ  $K_{Iv}$  ของตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับควบคุม  
ค่าแรงดันบัสไฟตรง

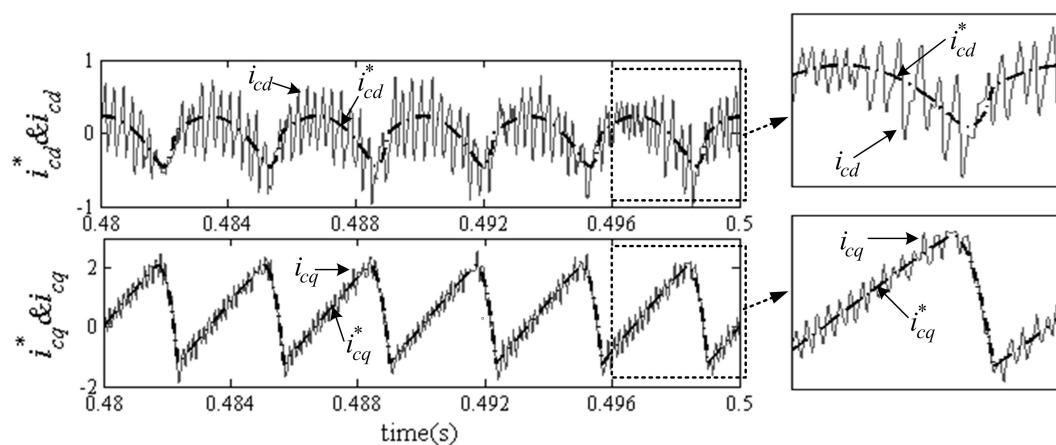
จากสมการออกแบบค่า  $K_{Pv}$  และ  $K_{Iv}$  สมการที่ (4.73) และ (4.74) ทำการ  
ออกแบบโดยกำหนดให้ค่า  $M=0.8$  และค่า  $\omega_{nv}=10\pi$  rad/s ดังนั้น จะได้ค่า  $K_{Pv}$  และ  $K_{Iv}$  ดังนี้

$$K_{Pv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{4}{M} \zeta \omega_{nv} C_{dc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{4}{(0.8)} (0.707)(10\pi)(2300 \times 10^{-6}) = 0.2085$$

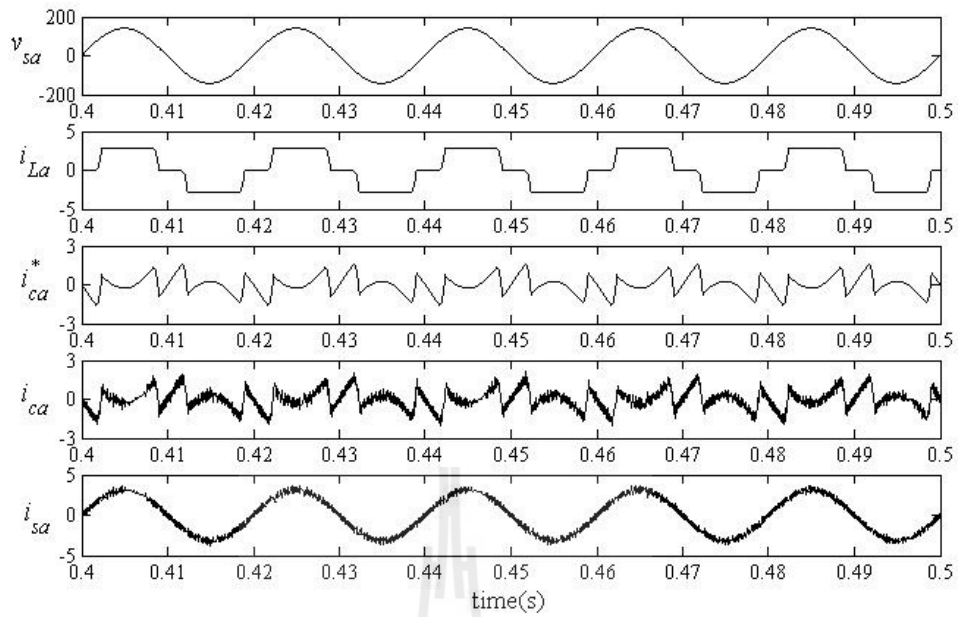
$$K_{Iv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{2}{M} \omega_{nv}^2 C_{dc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{2}{(0.8)} (10\pi)^2 (2300 \times 10^{-6}) = 4.6336$$

หลังจากออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชย และค่าแรงดันบัสไฟตรง  
แล้ว ลำดับต่อไปจะทำการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าที่พิจารณารูปที่ 4.19 ซึ่ง  
ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.22 ถึง 4.26

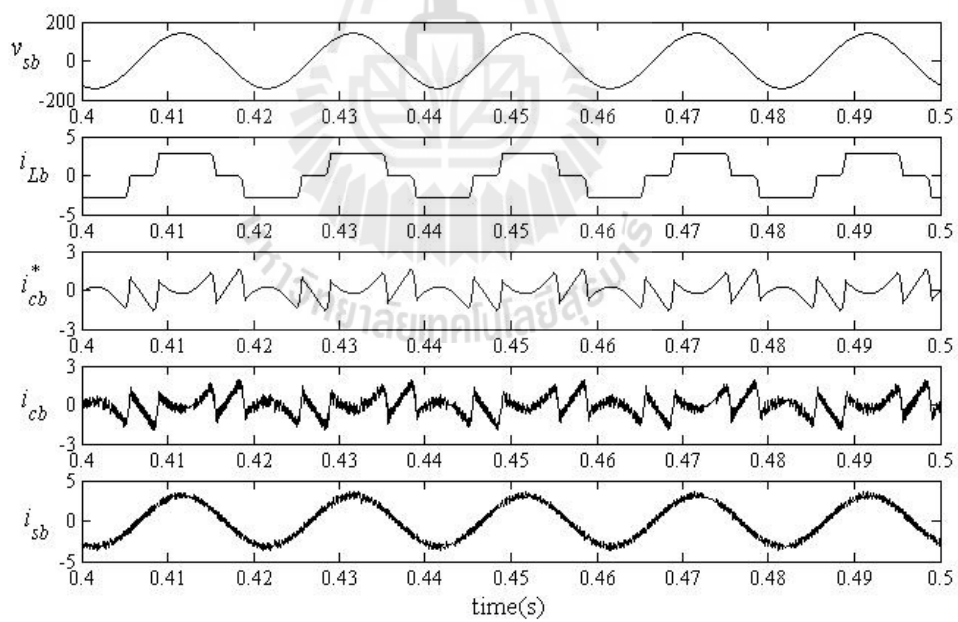
จากรูปที่ 4.22 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบระหว่างกระแสชดเชยของวงจรกรอง  
กำลังแอกทีฟกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF บนแกนดีคิว  
ในช่วงเวลา 0.48 ถึง 0.5 วินาที จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอของลูปกระแสที่ได้  
ออกแบบไว้ สามารถควบคุมให้กระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) ให้มีลักษณะคล้ายตามรูป  
สัญญาณกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิว ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า กระแสชดเชยบนแกนดีมี  
ลักษณะการสั่นไหวมากเมื่อเทียบกับกระแสอ้างอิง ในขณะที่กระแสชดเชยบนแกนคิวมีการสั่นไหว  
น้อยกว่าเมื่อเทียบกับกระแสอ้างอิง ซึ่งจากผลดังกล่าว จึงทำให้กระแสชดเชยบนแกนสามเฟสมี  
ลักษณะสั่นไหวด้วยเช่นกันดังรูปที่ 4.23 ถึง 4.25 สำหรับเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ตามลำดับ



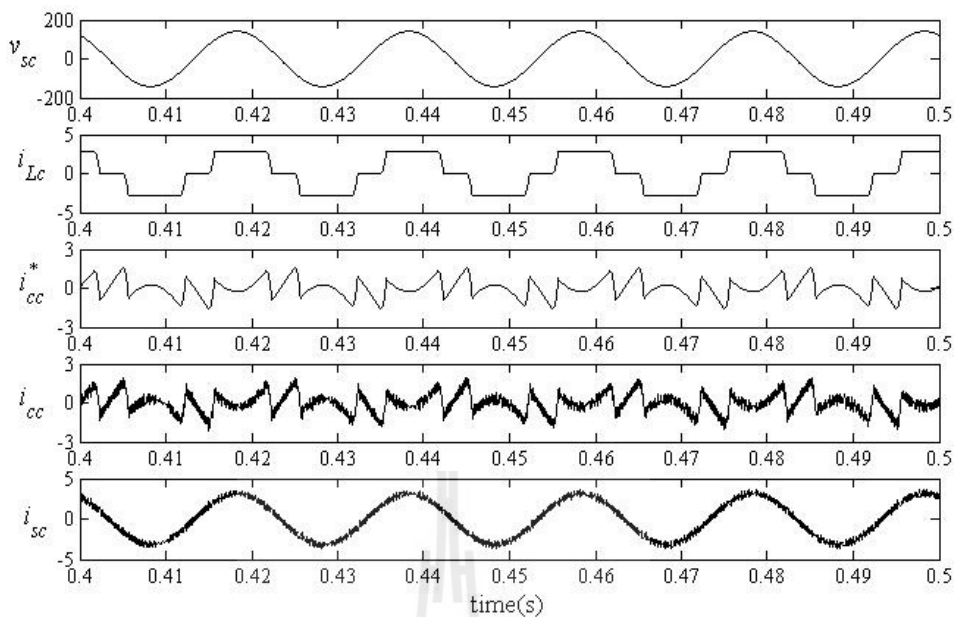
รูปที่ 4.22 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกระแสชดเชยกับกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิว



รูปที่ 4.23 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีเฟส  $a$



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีเฟส  $b$

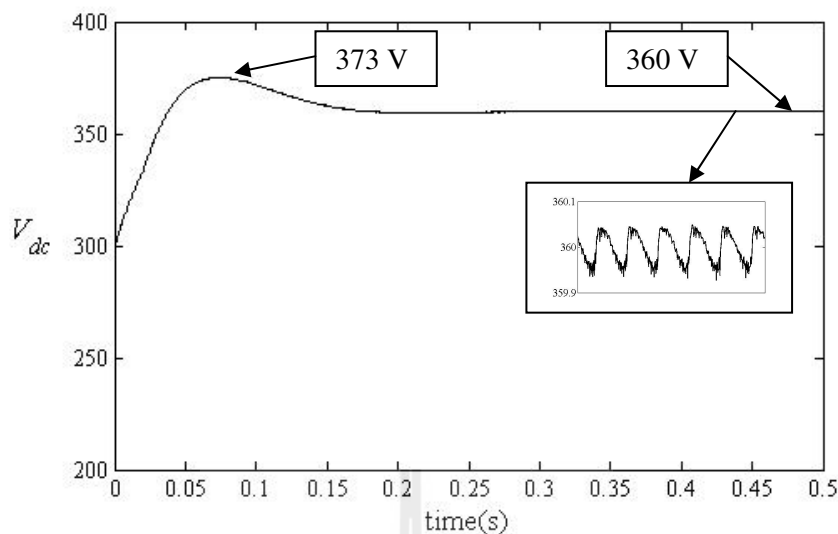


รูปที่ 4.25 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีเฟส  $c$

จากรูปที่ 4.23 ถึง 4.25 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ในช่วงเวลา 0.4 วินาที ถึง 0.5 วินาที ซึ่งจะสังเกตได้ว่า เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟชนิดกระแสชดเชย ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ ) ที่มีลักษณะรูปสัญญาณคล้ายตามกระแสอ้างอิง ( $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ ) จะส่งผลให้รูปสัญญาณของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) กลับมามีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปสัญญาณก่อนการชดเชยที่มีลักษณะเหมือนกับกระแสที่โหลด ( $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ ) จากผลดังกล่าวจึงทำให้ค่า  $\%THD$  ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยทั้งสามเฟสมีค่าลดลงเท่ากับ 2.40% 2.78% และ 3.12% ตามลำดับเฟส ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ในขณะที่ก่อนการชดเชยวัดค่า  $\%THD$  ของกระแสดังกล่าวได้เท่ากับ 26.37% 26.40% และ 26.40% สำหรับเฟส  $a$   $b$  และ  $c$

ตารางที่ 4.6 ค่า  $\%THD$  กรณีระบบควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีไอ

เฟส	ค่า $\%THD$ ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย	
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย
$a$	26.37%	2.40%
$b$	26.40%	2.78%
$c$	26.40%	3.12%
เฉลี่ย	26.39%	2.79%



รูปที่ 4.26 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง

นอกจากนี้ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ของวงจรรอกกำลัง แยกทีฟแสดงได้รูปที่ 4.26 จากรูปดังกล่าว ค่าแรงดันบัสไฟตรงที่วัดคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_{dc}$  ของวงจรรอกกำลังแยกทีฟในช่วงเวลาดังกล่าว 0 ถึง 0.5 วินาที สังเกตได้ว่า ในช่วงเวลาเริ่มต้นค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าขยอแรงดันสูงสุดเท่ากับ 373 V ก่อนที่จะลู่เข้าสู่ภาวะคงตัวที่ค่าแรงดันเท่ากับ 360 V ตามค่าแรงดันอ้างอิง ( $V_{dc}^*$ ) ที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 0.18 วินาที

จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้งหมดข้างต้น จะเห็นได้ว่า ระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงบนแกนดีคิวที่ใช้ตัวควบคุมพีไอตามที่ได้ออกแบบไว้ สามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้อยตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF และสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าตามแรงดันอ้างอิงได้

#### 4.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทบทวนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรอกกำลังแยกทีฟแบบขนานที่ใช้วิธีการแปลงแกนดีคิว การหาแบบจำลองดังกล่าวเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแยกทีฟ ระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมพีไอบนแกนดีคิวที่ได้จากการออกแบบโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเมื่อนำไปจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา พบว่า ตัวควบคุมพีไอคู่กระแสสามารถควบคุมให้วงจรรอก

กำลังแอกทีฟีดกระแสชดเชยได้คล้อยตามลักษณะกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี SDF และตัวควบคุมพีไอดูบแรงดันสามารถควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงให้มีค่าตามแรงดันอ้างอิงได้ โดยผลการกำจัดฮาร์โมนิกค่า  $\%THD$  ภายหลังจากชดเชยของกระแสที่แหล่งจ่าย พบว่า มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีก่อนการชดเชย



## บทที่ 5

### การควบคุมแบบฟัซซีสำหรับควบคุมกระแสชดเชย ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

#### 5.1 กล่าวนำ

ฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) หรือฟัซซีได้ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 1965 โดย Lotfi A. Zadeh (Zadeh L. A., 1965, อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) ซึ่งต่อมาได้เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในงานด้านระบบควบคุม การควบคุมแบบฟัซซีเป็นวิธีการควบคุมที่ชาญฉลาดและให้ประสิทธิภาพสูงเนื่องจากอาศัยข้อมูล ความรู้ และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญในระบบที่พิจารณาเป็นพื้นฐานในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพิจารณาที่แม่นยำ ดังนั้น ตัวควบคุมฟัซซีจึงเหมาะสมอย่างยิ่งกับระบบที่มีความซับซ้อน คลุมเครือ และหลายอินพุต ในอดีตที่ผ่านมา ปราจิริ ประสมศักดิ์ (ปราจิริ ประสมศักดิ์, 2553) ได้นำเสนอการใช้ตัวควบคุมฟัซซีสำหรับควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟร่วมกับเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มบนแกนสามเฟส แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะนำเสนอการนำตัวควบคุม ฟัซซีมาประยุกต์ใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟร่วมกับเทคนิคสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็มบนแกนสี่เฟส ซึ่งเนื้อหาในบทนี้ จะนำเสนอทบทวนทฤษฎีต่าง ๆ ของฟัซซี ได้แก่ ฟัซซีเซต การดำเนินการทางฟัซซีเซต ฟังก์ชันสมาชิก ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา กฎของฟัซซี และการอนุมานฟัซซี โดยในแต่ละส่วนดังกล่าวจะนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2 ถึง 5.7 ตามลำดับ นอกจากนี้ ในแต่ละหัวข้อจะได้อธิบายการออกแบบโครงสร้างส่วนต่าง ๆ ของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟไปพร้อมกัน

#### 5.2 ฟัซซีเซต

องค์ประกอบที่สำคัญของฟัซซี คือ ฟัซซีเซต ซึ่งเซตดังกล่าวมีความแตกต่างจากเซตชัดเจนแบบปกติทั่วไป เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างฟัซซีเซตกับเซตชัดเจนในที่นี้จะเริ่มต้นจากการอธิบายความหมายของเซตชัดเจนก่อน จากนั้นจะอธิบายความหมายของฟัซซีเซต ดังนี้

เซตชัดเจน (crisp set) คือ เซตที่มีการกำหนดขอบเขตอย่างชัดเจน ซึ่งจะให้ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0 และ 1 เท่านั้น (ตรรกะบูลีน) โดย 0 หมายถึง การไม่เป็นสมาชิกของเซต และ 1 หมายถึง การเป็นสมาชิกของเซต รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของเซตชัดเจนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1

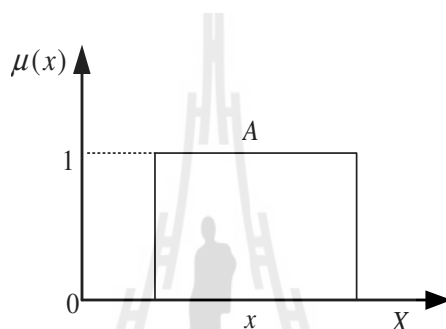


จากรูปดังกล่าว ค่าความเป็นสมาชิกของเซต  $A$  ที่ตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ใด ๆ ( $\mu_A(x)$ ) ในเอกภพสัมพัทธ์  $X$  จะเป็นไปตามสมการที่ (5.1) ดังนี้

$$\mu_A(x): X \rightarrow \{0,1\} \quad (5.1)$$

โดยที่  $\mu_A(x) = 1$  เมื่อ  $x$  อยู่ในเซต  $A$  อย่างสมบูรณ์

$\mu_A(x) = 0$  เมื่อ  $x$  ไม่อยู่ในเซต  $A$



รูปที่ 5.1 ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของเซตชัดเจน

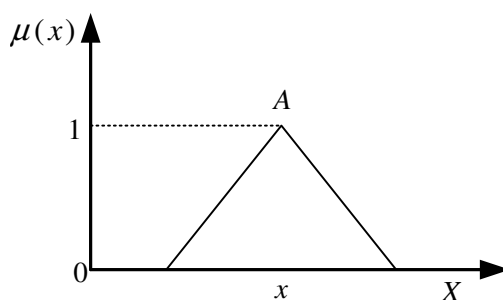
ฟัซซีเซต (fuzzy set) คือ เซตที่มีความคลุมเครือ ไม่มีการกำหนดขอบเขตที่ชัดเจน ค่าความเป็นสมาชิกสามารถมีมากกว่า 2 ค่า (ตรรกะหลายระดับ) ขึ้นอยู่กับรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก ซึ่งรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกที่นิยมใช้มีหลายรูปแบบ เช่น ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยม และฟังก์ชันรูปเกาส์เซียน เป็นต้น (ดูได้จากหัวข้อที่ 5.4) ยกตัวอย่างการอธิบายฟัซซีเซตกรณีฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยมได้ดังรูปที่ 5.2 จากรูปดังกล่าว ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต  $A$  ที่ตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ใด ๆ สามารถมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงได้ระหว่าง 0 ถึง 1 ดังสมการที่ (5.2)

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (5.2)$$

โดยที่  $\mu_A(x) = 1$  เมื่อ  $x$  อยู่ในเซต  $A$  อย่างสมบูรณ์

$\mu_A(x) = 0$  เมื่อ  $x$  ไม่อยู่ในเซต  $A$

$0 < \mu_A(x) < 1$  เมื่อ  $x$  อยู่ในเซต  $A$  เพียงบางส่วน



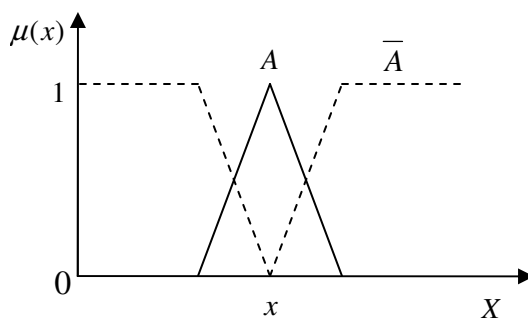
รูปที่ 5.2 ฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซต

### 5.3 การดำเนินการทางฟัซซีเซต

การดำเนินการทางฟัซซีเซต (fuzzy set operations) จะมีความหมายเหมือนกับเซตชัดเจน แต่จะให้ค่าเชิงตัวเลขที่แตกต่างกัน โดยเซตชัดเจนจะให้ผลว่า ตัวแปรสมาชิกอยู่หรือไม่อยู่ในเซต ( $\{0,1\}$ ) แต่สำหรับฟัซซีเซตจะให้ผลว่า ตัวแปรสมาชิกอยู่ในเซตด้วยระดับค่าความเป็นสมาชิก ระหว่าง 0 ถึง 1 ( $[0,1]$ ) พิจารณาตัวดำเนินการทางเซต 3 รูปแบบ คือ ส่วนเติมเต็ม (complement) ยูเนียน (union) และอินเตอร์เซกชัน (intersection) ดังนี้

ส่วนเติมเต็ม ของฟัซซีเซต  $A$  ( $\bar{A}$ ) คือ เซตที่ประกอบด้วยตัวแปรสมาชิก  $x$  ที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์  $X$  แต่ไม่อยู่ในฟัซซีเซต  $A$  (ส่วนที่แสดงเป็นเส้นประ) ดังรูปที่ 5.3 โดยค่าความเป็นสมาชิกของ  $\bar{A}$  ( $\mu_{\bar{A}}(x)$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.3) ซึ่งเท่ากับผลต่างระหว่างค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 กับค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต  $A$  ( $\mu_A(x)$ )

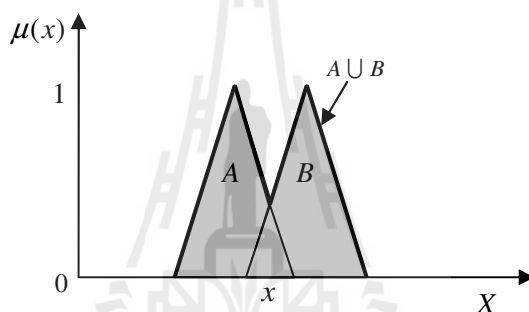
$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (5.3)$$

รูปที่ 5.3 ส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต  $A$

การยูเนียน ของฟัซซีเซต  $A$  กับฟัซซีเซต  $B$  ( $A \cup B$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 จากรูปดังกล่าว ผลการยูเนียนของฟัซซีเซต  $A$  และ  $B$  ที่ประกอบด้วยตัวแปรสมาชิก  $x$  ใด ๆ คือ ฟัซซีเซตทั้งหมด (ส่วนที่แรเงา) โดยค่าความเป็นสมาชิกของการยูเนียนระหว่างฟัซซีเซต  $A$  และ  $B$  ( $\mu_{A \cup B}(x)$ ) คือ ค่ามากที่สุด (maximum: max) ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเป็นสมาชิกของทั้งสอง ฟัซซีเซต ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.4)

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (5.4)$$

โดยที่  $\vee$  หมายถึง OR ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบหาค่ามากที่สุดระหว่างฟัซซีเซต

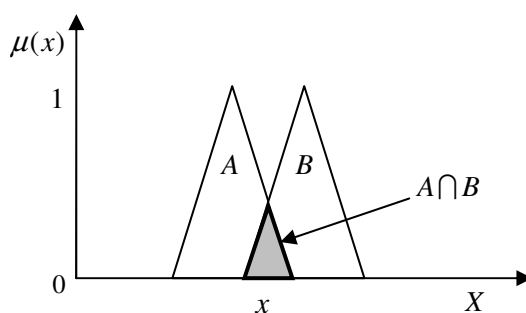


รูปที่ 5.4 การยูเนียนของฟัซซีเซต  $A$  และ  $B$

การอินเตอร์เซกชัน ของฟัซซีเซต  $A$  กับฟัซซีเซต  $B$  ( $A \cap B$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 5.5 โดยผลการอินเตอร์เซกชันระหว่างฟัซซีเซต  $A$  และ  $B$  คือ ฟัซซีเซตที่ประกอบด้วยตัวแปรสมาชิก  $x$  ที่เหมือนกันของฟัซซีเซต  $A$  และ  $B$  (ส่วนที่แรเงา) ซึ่งค่าความเป็นสมาชิกของการอินเตอร์เซกชันระหว่างฟัซซีเซต  $A$  และ  $B$  ( $\mu_{A \cap B}(x)$ ) คือ ค่าน้อยที่สุด (minimum: min) ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเป็นสมาชิกของทั้งสองฟัซซีเซต ดังสมการที่ (5.5)

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (5.5)$$

โดยที่  $\wedge$  หมายถึง AND ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบหาค่าน้อยที่สุดระหว่างฟัซซีเซต



รูปที่ 5.5 การอินทิเกรตเซกชันของฟัซซีเซต  $A$  และ  $B$

นอกจากการดำเนินการต่าง ๆ ของฟัซซีเซตจะให้ความหมายเหมือนกับเซตชัดเจนแล้ว ฟัซซีเซตยังมีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เหมือนกับเซตชัดเจนด้วยเช่นกัน ดังนี้

คุณสมบัติการสลับที่

$$A \cup B = B \cup A$$

$$A \cap B = B \cap A$$

คุณสมบัติการจัดกลุ่ม

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$$

คุณสมบัติการกระจาย

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

คุณสมบัติความเหมือน

$$A \cup A = A$$

$$A \cap A = A$$

คุณสมบัติเอกลักษณ์

$$A \cup \phi = A \text{ เมื่อ } \phi \text{ คือ ฟัซซีเซตว่าง}$$

$$A \cap U = A \text{ เมื่อ } U \text{ คือ เอกภพสัมพัทธ์}$$

$$A \cap \phi = \phi$$

$$A \cup U = U$$

คุณสมบัติการผกผัน

$$\overline{\overline{A}} = A$$

คุณสมบัติการส่งผ่าน

ถ้า  $(A \subset B) \cap (B \subset C)$  แล้วจะได้ว่า  $A \subset C$

กฎของเดอมอร์แกน (De Morgan)

$$\overline{(A \cup B)} = \bar{A} \cap \bar{B}$$

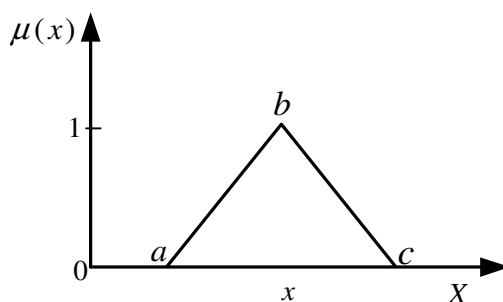
$$\overline{(A \cap B)} = \bar{A} \cup \bar{B}$$

#### 5.4 ฟังก์ชันสมาชิก

ฟังก์ชันสมาชิก (membership function) คือ ฟังก์ชันสำหรับใช้กำหนดค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรสมาชิก  $x$  ใด ๆ ซึ่งจะประกอบด้วยพีชคณิตอย่างน้อย 1 เซต ฟังก์ชันสมาชิกสามารถมีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมกับระบบปัญหาที่พิจารณาควบคุม และจะถูกกำหนดเลือกใช้โดยผู้เชี่ยวชาญ รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชคณิตนิยมใช้อย่างแพร่หลายมีอยู่ 4 รูปแบบ คือ ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม (triangular membership function: trimf) ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function: trapmf) ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน (Gaussian membership function: gaussmf) และ ฟังก์ชันสมาชิกรูประฆังคว่ำ (generalized bell membership function: gbellmf) ซึ่งแต่ละฟังก์ชันมีรายละเอียดดังนี้

ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ตำแหน่ง 3 ค่า คือ ค่าตำแหน่ง  $a$ ,  $b$  และ  $c$  ดังรูปที่ 5.6 โดยการคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ใด ๆ ( $\mu(x)$ ) ถูกแบ่งออกเป็น 5 กรณีซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.6) ดังนี้

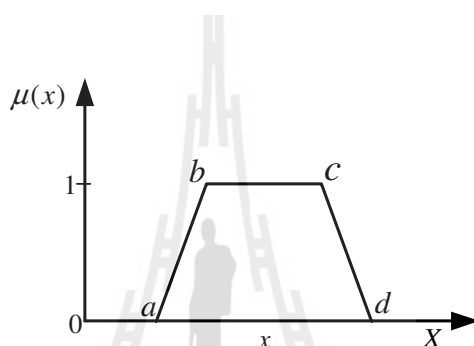
$$\mu(x) = \text{trimf}(x, [a \ b \ c]) = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & ; a < x < b \\ 1 & ; x = b \\ (c-x)/(c-b) & ; b < x < c \\ 0 & ; x \geq c \end{cases} \quad (5.6)$$



รูปที่ 5.6 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม

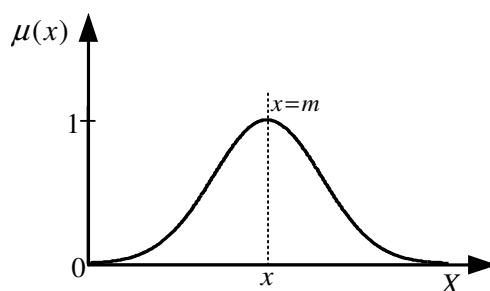
ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ตำแหน่ง 4 ค่า คือ ค่าตำแหน่ง  $a$   $b$   $c$  และ  $d$  ดังรูปที่ 5.7 ซึ่งค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ใด ๆ ได้ถูกแบ่งออกเป็น 5 กรณี ดังสมการที่ (5.7)

$$\mu(x) = \text{trapezmf}(x, [a \ b \ c \ d]) = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & ; a < x < b \\ 1 & ; b \leq x \leq c \\ (d-x)/(d-c) & ; c < x < d \\ 0 & ; x \geq d \end{cases} \quad (5.7)$$



รูปที่ 5.7 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน ดังรูปที่ 5.8 จะใช้ค่าพารามิเตอร์ 2 ค่า ในการกำหนดขนาดรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก คือ ค่า  $\sigma$  และ  $m$  โดย  $\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจะใช้สำหรับการกำหนดความกว้างของรูปเกาส์เซียน ส่วน  $m$  คือ ค่าเฉลี่ยที่ใช้สำหรับกำหนดค่าตำแหน่งกึ่งกลางของรูปเกาส์เซียน การคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ใด ๆ ในฟังก์ชันดังกล่าว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.8) ดังนี้

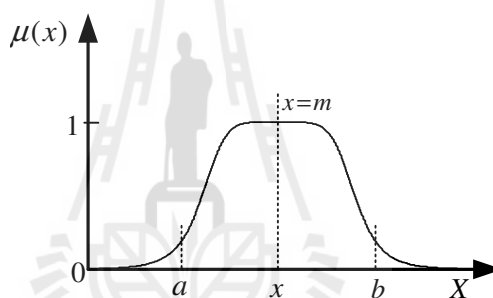


รูปที่ 5.8 ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน

$$\mu(x) = \text{gussmf}(x, [\sigma \ m]) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.8)$$

ฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ ดังรูปที่ 5.9 ใช้ค่าพารามิเตอร์ 3 ค่า คือ  $a$   $b$  และ  $m$  โดยพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$  จะใช้สำหรับกำหนดความกว้างของรูปประฆังคว่ำ ในขณะที่  $m$  ใช้กำหนดค่าตำแหน่งกึ่งกลางของรูปประฆังคว่ำเช่นเดียวกับกรณีรูปเกาส์เซียน การคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ใด ๆ คำนวณได้จากสมการที่ (5.9) ดังนี้

$$\mu(x) = \text{gbellmf}(x, [a \ b \ m]) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-m}{a}\right|^{2b}} \quad (5.9)$$

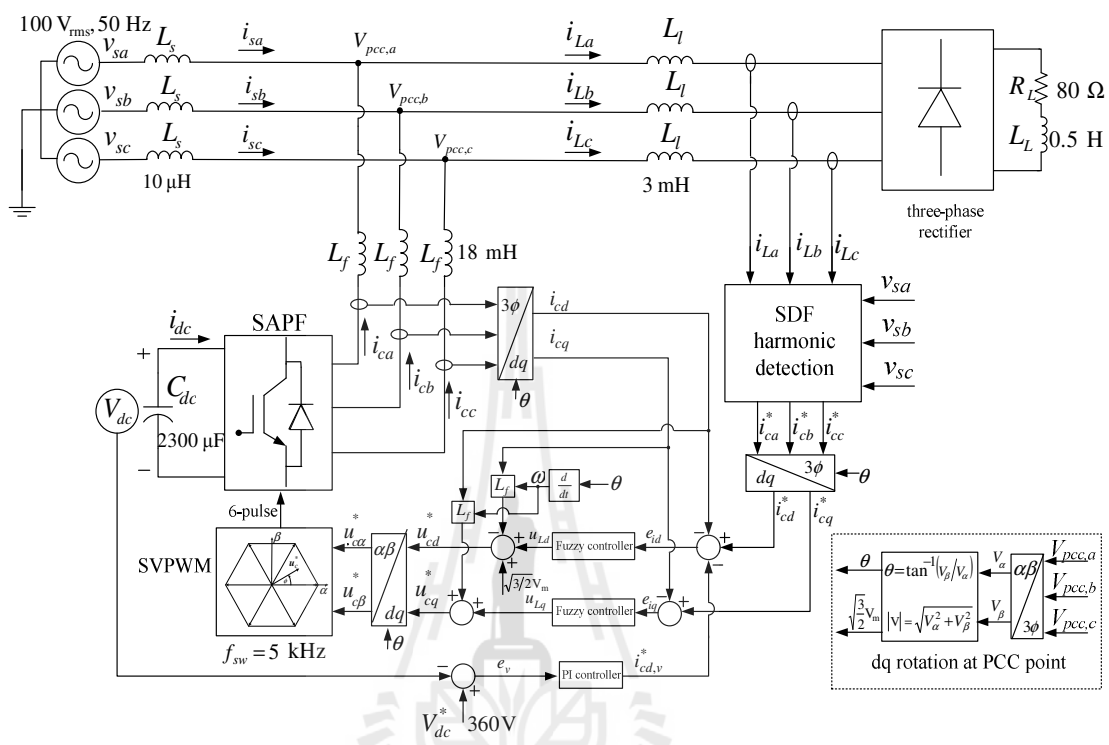


รูปที่ 5.9 ฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ

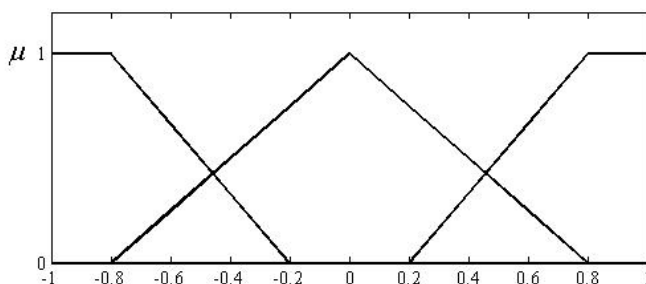
#### 5.4.1 การทดสอบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย

การออกแบบตัวควบคุมฟuzzy สำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลัง แยกทีไฟในระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 5.10 ในเบื้องต้น ผู้วิจัยจะพิจารณาการออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzy ก่อน ซึ่งในหัวข้อนี้ คือ การออกแบบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต และเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzy โดยใช้วิธีการทดสอบเปรียบเทียบการใช้รูปร่างฟังก์ชันสมาชิก 4 รูปแบบ คือ ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน และฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ ตามที่กำหนดดังรูปที่ 5.11 ถึง 5.14 ตามลำดับ โดยการทดสอบดังกล่าว โครงสร้างส่วนอื่น ๆ ของตัวควบคุมฟuzzy จะทำการกำหนดใช้เหมือนกัน ได้แก่ การกำหนดตัวแปรภาษาของอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzy (อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.5) กฎฟuzzy (อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.6) และวิธีการอนุมานฟuzzy แบบค่าสูงสุด-ต่ำสุดของ Mamdani ที่มีการทำดีฟuzzy แบบการ

หาจุดศูนย์ถ่วงหรือ COG (ดูได้จากหัวข้อที่ 5.7) ทั้งนี้เพื่อพิจารณาเฉพาะผลของรูปร่างฟังก์ชัน  
 สมาชิกที่มีต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

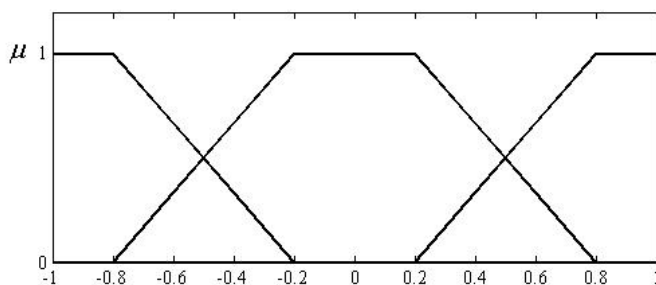


รูปที่ 5.10 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซี  
 สำหรับควบคุมกระแสชดเชย

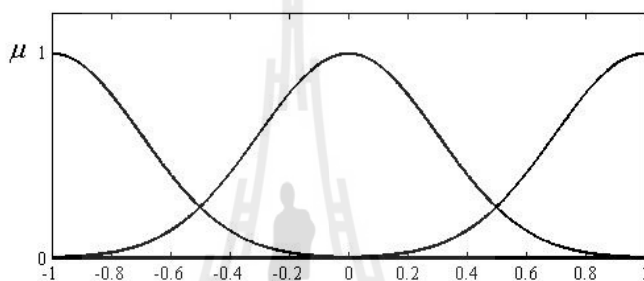


รูปที่ 5.11 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม

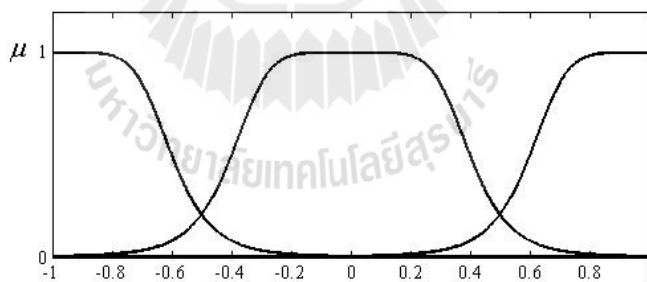




รูปที่ 5.12 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 5.13 ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน



รูปที่ 5.14 ฟังก์ชันสมาชิกรูปประมังกว่ำ

ผลการทดสอบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกสำหรับนำมาใช้เป็นฟังก์ชันสมาชิกอินพุต และเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 จากตารางดังกล่าว พบว่า ฟังก์ชันสมาชิก รูปสามเหลี่ยม ให้ผลค่า %THD เฉลี่ย (คำนวณโดยใช้สมการที่ (3.23) ในบทที่ 3) น้อยที่สุดเท่ากับ 1.73% และใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ต่อ 5 คาบรูปสัญญาณน้อยที่สุดเช่นกันเท่ากับ 428.24 วินาที ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวควบคุมฟัซซีที่มีฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมสำหรับนำไปใช้ควบคุมกระแสขดลวดของวงจรรอกกำลังแอกทีฟต่อไป

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบลักษณะรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy สำหรับ  
ใช้ควบคุมกระแสชดเชย

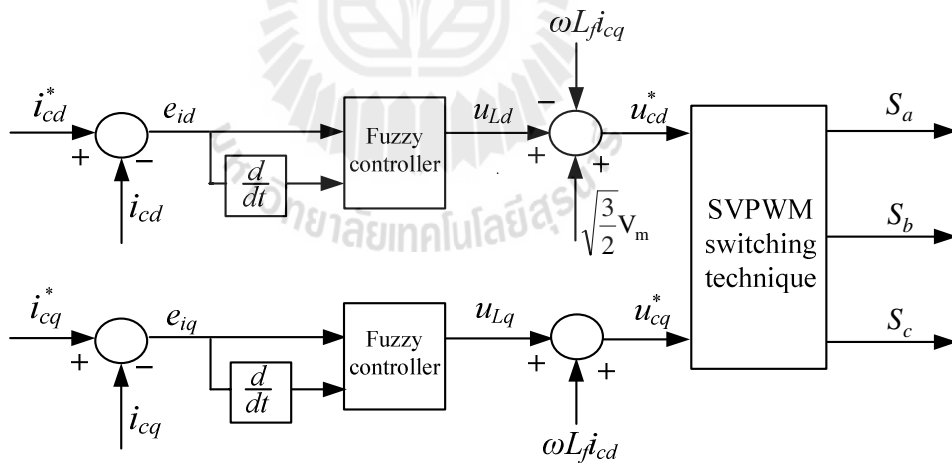
รูปร่างฟังก์ชัน สมาชิก	ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่าย หลังการชดเชย				เวลาจำลองสถานการณ์ ต่อ 5 คาบสัญญาณ (วินาที)
	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>	เฟส <i>c</i>	เฉลี่ย	
ฟังก์ชันสมาชิกรูป สามเหลี่ยม	1.61%	1.76%	1.81%	1.73%	428.24
ฟังก์ชันสมาชิกรูป สี่เหลี่ยมคางหมู	1.85%	1.73%	1.69%	1.76%	431.44
ฟังก์ชันสมาชิกรูป เกาส์เซียน	1.89%	1.64%	1.85%	1.80%	440.96
ฟังก์ชันสมาชิกรูป ระฆังคว่ำ	2.10%	1.92%	2.08%	2.04%	438.23

## 5.5 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา

การควบคุมแบบฟuzzyถูกออกแบบเพื่อให้มีความคลาดเคลื่อนเกี่ยวกับมนุษย์ สามารถคิด อ่าน เข้าใจ ตัดสินใจ รวมถึงสามารถสรุปต่อเหตุการณ์ที่ซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตามมนุษย์ไม่ได้มีกลไก การคิดแบบเชิงตัวเลขเช่นเดียวกับคอมพิวเตอร์ แต่จะใช้ภาษาช่วยในการอธิบายให้ความหมายแทน ซึ่งจะทำให้เข้าใจได้ง่ายกว่าการอธิบายในเชิงตัวเลข การควบคุมแบบฟuzzyใช้ฟังก์ชันสมาชิกที่ ประกอบด้วยฟuzzyเซตสำหรับระบุค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรสมาชิกในระบบที่พิจารณา โดย ตัวแปรสมาชิกดังกล่าวสำหรับการควบคุมแบบฟuzzyจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของภาษาแทนการใช้ ตัวเลข ซึ่งเรียกว่า ตัวแปรภาษา (linguistic variables) ตัวอย่างเช่น ความคลาดเคลื่อน (error) อัตรา การเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อน (error rate) เป็นต้น นอกจากนี้ ตัวแปรภาษาจะถูก กำหนดให้มีระดับค่าต่าง ๆ ในรูปแบบภาษาที่แตกต่างกัน เช่น “มาก” “ปานกลาง” หรือ “น้อย” เป็น ต้น ซึ่งระดับค่าของตัวแปรภาษาเหล่านี้จะเรียกว่า ค่าเชิงภาษา (linguistic value) การออกแบบตัว แปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยจะอธิบายใน หัวข้อต่อไป

**5.5.1 การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย**

ระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดักของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyแสดงได้ดังรูปที่ 5.15 จากรูปดังกล่าว อินพุตการควบคุม คือ ค่าความผิดพลาดของกระแสบนแกนดัก ( $e_{id}, e_{iq}$ ) ซึ่งคำนวณได้จากผลต่างระหว่างค่ากระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) กับค่ากระแสชดเชย ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) บนแกนดักดังสมการที่ (5.10) นอกจากนี้ อินพุตการควบคุมอีกค่าหนึ่งคือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดบนแกนดัก ( $\frac{de_{id}}{dt}, \frac{de_{iq}}{dt}$ ) สำหรับเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzyจะกำหนดให้เป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ( $L_f$ ) ของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดัก ( $u_{Ld}, u_{Lq}$ ) ซึ่งค่าแรงดันดังกล่าวจะถูกนำไปดำเนินการทางคณิตศาสตร์และผ่านเทคนิคการสวิตช์แบบ SVPWM เพื่อให้ได้พัลส์สำหรับใช้ควบคุมไฉบีทีของวงจรรองกำลังแอกทีฟเพื่อฉีดกระแสชดเชยต่อไป ตัวควบคุมฟuzzyบนแกนดักในรูปที่ 5.15 ผู้วิจัยจะใช้การออกแบบที่เหมือนกันทั้งสองแกน ดังนั้น การอธิบายเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyในที่นี้จะหมายถึงตัวควบคุมฟuzzyของทั้งสองแกน การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยกรณี 3 ค่าเชิงภาษา สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.15 ระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดักที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy

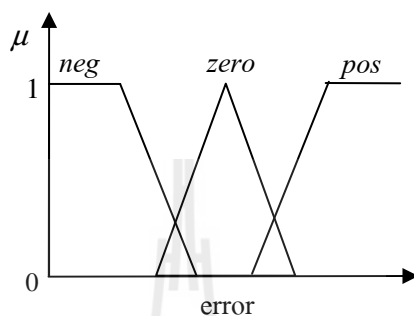
$$e_{ik} = i_{ck}^* - i_{ck} \quad ; k = d, q \tag{5.10}$$

ตารางที่ 5.2 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzy สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย  
กรณี 3 ค่าเชิงภาษา

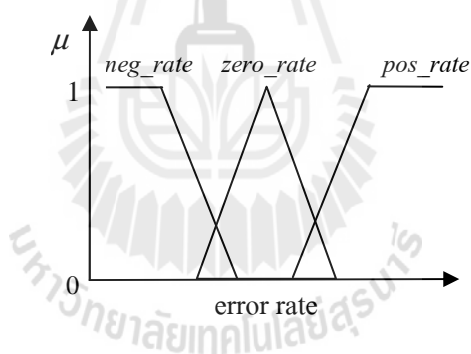
ค่าของระบบ	ตัวแปรภาษาและความหมาย		ค่าเชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	error ( $e_{id}, e_{iq}$ )	ค่าความผิดพลาด	<i>neg</i> (negative)	$i_{cd}^*, i_{cq}^* < i_{cd}, i_{cq}$ (น้อยกว่า)
			<i>zero</i>	$i_{cd}^*, i_{cq}^* = i_{cd}, i_{cq}$ (เท่ากับ)
			<i>pos</i> (positive)	$i_{cd}^*, i_{cq}^* > i_{cd}, i_{cq}$ (มากกว่า)
	error rate ( $\frac{de_{id}}{dt}, \frac{de_{iq}}{dt}$ )	อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด	<i>neg_rate</i>	ลบ
			<i>zero_rate</i>	คงที่
			<i>pos_rate</i>	บวก
เอาต์พุต ( $u_{Ld}, u_{Lq}$ )	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ $L_f$	<i>dec</i> (decrease)	ลดลง	
		<i>cons</i> (constant)	คงที่	
		<i>inc</i> (increase)	เพิ่มขึ้น	

จากตารางที่ 5.2 อินพุต error อินพุต error rate และเอาต์พุต voltage ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรทางภาษาของตัวควบคุมฟuzzy ในขณะที่ค่าเชิงภาษาของอินพุต error มีจำนวน 3 ค่า คือ “*neg*” “*zero*” และ “*pos*” ซึ่งแสดงเป็นฟังก์ชันสมาชิกได้ดังรูปที่ 5.16 อินพุต error rate กำหนดให้มีจำนวนค่าเชิงภาษา 3 ค่า เช่นกัน คือ “*neg\_rate*” “*zero\_rate*” และ “*pos\_rate*” สามารถแสดงเป็นฟังก์ชันสมาชิกดังรูปที่ 5.17 ส่วนเอาต์พุต voltage ประกอบด้วยค่าเชิงภาษา 3 ค่า คือ “*dec*” “*cons*” และ “*inc*” แสดงเป็นฟังก์ชันสมาชิกได้ดังรูปที่ 5.18 โดยความหมายของค่าเชิงภาษาทั้งหมดดังกล่าวสามารถดูได้จากตารางที่ 5.2 การกำหนดใช้ค่าเชิงภาษาจำนวน 3 ค่า ถือเป็นพื้นฐานการออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมฟuzzy สำหรับนำไปใช้ควบคุมกระแสชดเชย แต่ถ้าต้องการความละเอียดในการควบคุมเพื่อให้ได้สมรรถนะของตัวควบคุมที่ดียิ่งขึ้น สามารถทำได้โดยการกำหนดเพิ่มจำนวนค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟuzzy ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาเพิ่มจำนวนค่าเชิงภาษาของอินพุต error เป็น 5 ค่า ซึ่งประกอบด้วย “*very\_neg*” “*neg*” “*zero*” “*pos*” และ “*very\_pos*” ดังรูปที่ 5.19 จากการกำหนดเพิ่มจำนวนค่าเชิงภาษาของอินพุตดังกล่าวจะทำให้ได้เอาต์พุต voltage สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่มีจำนวนค่าเชิงภาษาละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 5 ค่า เช่นกัน ประกอบไปด้วย “*very\_dec*” “*dec*” “*cons*” “*inc*” และ “*very\_inc*” ดังรูปที่ 5.20 อย่างไรก็ตาม จำนวนค่าเชิงภาษาของอินพุต error rate ผู้วิจัยยังคงกำหนดใช้เพียง 3 ค่าเช่นเดิม (รูปที่ 5.17) คือ “*neg\_rate*”

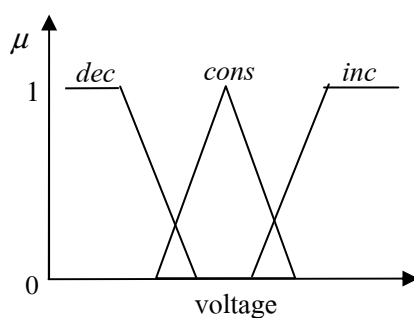
“zero\_rate” และ “pos\_rate” ทั้งนี้เพื่อจำกัดความซับซ้อนของตัวควบคุมฟัซซี และในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มุ่งเน้นให้ความสำคัญที่ค่าอินพุต error เป็นหลัก ดังนั้น จึงได้พิจารณาเพิ่มเฉพาะจำนวนค่าเชิงภาษาของอินพุต error เท่านั้น สำหรับความหมายของค่าเชิงภาษาของอินพุต error และเอาต์พุต voltage 5 ค่าเชิงภาษา ดูได้จากตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.16 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error กรณี 3 ค่าเชิงภาษา



รูปที่ 5.17 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate กรณี 3 ค่าเชิงภาษา

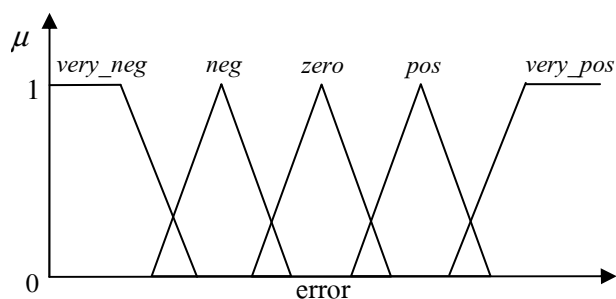


รูปที่ 5.18 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage กรณี 3 ค่าเชิงภาษา

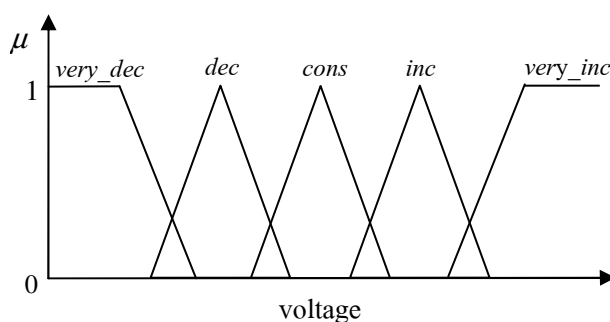
ตารางที่ 5.3 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย

กรณีอินพุต error และเอาต์พุต voltage 5 ค่าเชิงภาษา

ค่าของระบบ	ตัวแปรภาษาและความหมาย		ค่าเชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	error ( $e_{id}, e_{iq}$ )	ค่าความผิดพลาด	<i>very_neg</i> (very negative)	$i_{cd}^*, i_{cq}^* \ll i_{cd}, i_{cq}$ (น้อยกว่ามาก)
			<i>neg</i> (negative)	$i_{cd}^*, i_{cq}^* < i_{cd}, i_{cq}$ (น้อยกว่า)
			<i>zero</i>	$i_{cd}^*, i_{cq}^* = i_{cd}, i_{cq}$ (เท่ากับ)
			<i>pos</i> (positive)	$i_{cd}^*, i_{cq}^* > i_{cd}, i_{cq}$ (มากกว่า)
			<i>very_pos</i> (very positive)	$i_{cd}^*, i_{cq}^* \gg i_{cd}, i_{cq}$ (มากกว่ามาก)
	error rate ( $\frac{de_{id}}{dt}, \frac{de_{iq}}{dt}$ )	อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด	<i>neg_rate</i>	ลบ
			<i>zero_rate</i>	คงที่
<i>pos_rate</i>			บวก	
เอาต์พุต	voltage ( $u_{Ld}, u_{Lq}$ )	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ $L_f$	<i>very_dec</i> (very decrease)	ลดลงมาก
			<i>dec</i> (decrease)	ลดลง
			<i>cons</i> (constant)	คงที่
			<i>inc</i> (increase)	เพิ่มขึ้น
			<i>very_inc</i> (very increase)	เพิ่มขึ้นมาก



รูปที่ 5.19 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error กรณี 5 ค่าเชิงภาษา



รูปที่ 5.20 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage กรณี 5 ค่าเชิงภาษา

### 5.5.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมพีชซี กรณี 3 ค่าเชิงภาษากับกรณี 5 ค่าเชิงภาษา

การทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลัง แอกทีฟสำหรับระบบดังรูปที่ 5.10 โดยใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีที่กำหนดให้อินพุต error และเอาต์พุต voltage มีค่าเชิงภาษา 3 ค่า และค่าเชิงภาษา 5 ค่า แสดงผลได้ดังตารางที่ 5.4 (โครงสร้างส่วนอื่น ๆ ของตัวควบคุมพีชซี ได้แก่ กฎพีชซี สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 5.6 โดยกรณีที่ตัวควบคุมพีชซีใช้ค่าเชิงภาษา 3 ค่า จะใช้กฎข้อที่ 4 ถึง 12 (9 กฎ) ส่วนกรณีที่ใช้ค่าเชิงภาษาจำนวน 5 ค่า จะใช้กฎข้อที่ 1 ถึง 15 (15 กฎ) วิธีการอนุมานพีชซีใช้แบบค่าสูงสุด-ต่ำสุดของ Mamdani ที่มีการทำดีพีชซีแบบ COG ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.7)

ตารางที่ 5.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมพีชซี  
กรณี 3 ค่าเชิงภาษากับกรณี 5 ค่าเชิงภาษา

จำนวนค่า เชิงภาษา	ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่าย หลังการชดเชย				เวลาจำลองสถานการณ์ ต่อ 5 คาบสัญญาณ (วินาที)
	เฟส a	เฟส b	เฟส c	เฉลี่ย	
3	1.61%	1.76%	1.81%	1.73%	428.24
5	1.44%	1.54%	1.54%	1.51%	535.04

จากตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่า กรณีตัวควบคุมพีชซีกำหนดใช้จำนวนค่าเชิงภาษาของอินพุต error และเอาต์พุต voltage เท่ากับ 5 ค่า ให้ผลการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ดีกว่ากรณีที่ใช้ค่าเชิงภาษาเพียง 3 ค่า โดยกรณี 5 ค่าเชิงภาษาให้ค่า %THD เฉลี่ยของ

กระแสที่แหล่งจ่ายน้อยกว่าโดยเท่ากับ 1.51% ในขณะที่กรณี 3 ค่าเชิงภาษาให้ค่า %THD เฉลี่ยเท่ากับ 1.73% และสำหรับผลเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ต่อ 5 คาบรูปสัญญาณ พบว่า กรณี 5 ค่าเชิงภาษาใช้เวลาเท่ากับ 535.04 วินาที ส่วนกรณี 3 ค่าเชิงภาษาใช้น้อยกว่าโดยเท่ากับ 428.24 วินาที แต่เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มุ่งเน้นให้ความสำคัญที่ผลค่า %THD เฉลี่ยเป็นหลัก ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวควบคุมพีชชีที่มีจำนวนค่าเชิงภาษาของอินพุต error และเอาต์พุต voltage เท่ากับ 5 ค่า ส่วนอินพุต error rate กำหนดให้มีค่าเชิงภาษาเท่ากับ 3 ค่า สำหรับนำไปใช้ควบคุมกระแสขดลวดของวงจรรองกำลังแอกทีฟต่อไป

## 5.6 กฎพีชชี

กฎพีชชี คือ เงื่อนไขและข้อปฏิบัติดำเนินการควบคุมของตัวควบคุมพีชชี ซึ่งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อสมรรถนะการควบคุม กฎพีชชีจะถูกออกแบบและกำหนดขึ้นโดยผู้เชี่ยวชาญในระบบที่พิจารณา โดยรูปแบบของกฎพีชชีจะประกอบด้วยเงื่อนไขและข้อปฏิบัติ (IF-THEN) ดังนี้

IF  $x$  is  $A$

THEN  $y$  is  $B$

โดยที่  $x$  และ  $y$  คือ ตัวแปรภาษา และ  $A$  และ  $B$  คือ ค่าเชิงภาษา

เงื่อนไขในส่วนของ IF และข้อปฏิบัติของ THEN สามารถมีได้หลายเงื่อนไขและข้อปฏิบัติ ดังรูปแบบต่อไปนี้

IF  $x$  is  $A$  AND  $y$  is  $B$  OR  $z$  is  $C$

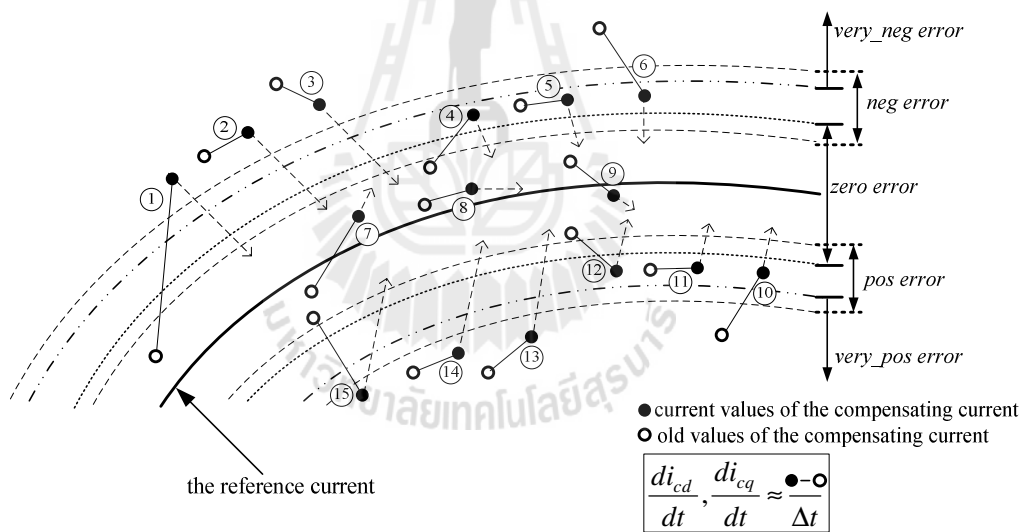
THEN  $p$  is  $D$   $q$  is  $E$

จากรูปแบบของกฎพีชชีข้างต้น ทุกเงื่อนไขในส่วนของ IF จะถูกตรวจสอบไปพร้อมกัน และจะรวมกันด้วยตัวดำเนินการทางพีชชีเซต เช่น อินเตอร์เซกชัน (AND) และยูเนียน (OR) โดยถ้าเงื่อนไขทั้งหมดเป็นจริงแล้ว ส่วนของ THEN จะถูกประเมินนำไปเป็นข้อปฏิบัติสำหรับการควบคุม การออกแบบรูปแบบของกฎพีชชี รวมไปถึงจำนวนกฎพีชชีที่ใช้ควบคุมไม่ควรกำหนดให้มีมากเกินไป โดยควรเลือกใช้กฎเท่าที่จำเป็นเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อลดความซับซ้อนของตัวควบคุมพีชชีที่อาจส่งผลกระทบต่อความเร็วในการประมวลผลได้



5.6.1 การออกแบบกฎฟuzzyสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย

จากการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyที่ใช้ค่าเชิงภาษาของอินพุต error จำนวน 5 ค่า และอินพุต error rate จำนวน 3 ค่า ในหัวข้อที่ผ่านมา ดังนั้น จำนวนกฎฟuzzyที่เป็นไปได้สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยจึงมีเท่ากับ 15 กฎ (5x3=15) โดยแต่ละกฎเกิดจากการออกแบบโดยอาศัยการวิเคราะห์ตำแหน่งของกระแสชดเชยดังรูปที่ 5.21 จากรูปดังกล่าว ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด ( $\frac{de_{id}}{dt}, \frac{de_{iq}}{dt}$ ) ที่ตำแหน่ง 1 3 4 6 7 9 10 12 13 และ 15 จะให้ความหมายทิศทาง (เครื่องหมาย +,-) ตรงกันข้ามกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชย ( $\frac{di_{cd}}{dt}, \frac{di_{cq}}{dt}$ ) เมื่อเทียบกับรูปสัญลักษณ์กระแสอ้างอิง กล่าวคือ  $\pm \frac{de_{id}}{dt} = \mp \frac{di_{cd}}{dt}$  และ  $\pm \frac{de_{iq}}{dt} = \mp \frac{di_{cq}}{dt}$  ในขณะที่ค่า  $\frac{de_{id}}{dt}, \frac{de_{iq}}{dt}$  ที่ตำแหน่ง 2 5 8 11 และ 14 จะให้ความหมายเหมือนกับค่า  $\frac{di_{cd}}{dt}, \frac{di_{cq}}{dt}$  คือ มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อเทียบกับรูปสัญลักษณ์กระแสอ้างอิง เช่นกัน



รูปที่ 5.21 การวิเคราะห์การควบคุมกระแสชดเชยสำหรับการออกแบบกฎฟuzzy

จากการวิเคราะห์ตำแหน่งของกระแสชดเชยทั้ง 15 ตำแหน่งตามรูปที่ 5.21 ทำให้สามารถออกแบบกฎฟuzzyจำนวน 15 กฎ ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

- กฎข้อที่ 1 IF error = *very\_neg* AND error rate = *neg\_rate* THEN voltage = *very\_dec*
- กฎข้อที่ 2 IF error = *very\_neg* AND error rate = *zero\_rate* THEN voltage = *very\_dec*
- กฎข้อที่ 3 IF error = *very\_neg* AND error rate = *pos\_rate* THEN voltage = *very\_dec*

- กฎข้อที่ 4 IF error = neg AND error rate = neg\_rate THEN voltage = dec
- กฎข้อที่ 5 IF error = neg AND error rate = zero\_rate THEN voltage = dec
- กฎข้อที่ 6 IF error = neg AND error rate = pos\_rate THEN voltage = dec
- กฎข้อที่ 7 IF error = zero AND error rate = neg\_rate THEN voltage = inc
- กฎข้อที่ 8 IF error = zero AND error rate = zero\_rate THEN voltage = cons
- กฎข้อที่ 9 IF error = zero AND error rate = pos\_rate THEN voltage = dec
- กฎข้อที่ 10 IF error = pos AND error rate = neg\_rate THEN voltage = inc
- กฎข้อที่ 11 IF error = pos AND error rate = zero\_rate THEN voltage = inc
- กฎข้อที่ 12 IF error = pos AND error rate = pos\_rate THEN voltage = inc
- กฎข้อที่ 13 IF error = very\_pos AND error rate = neg\_rate THEN voltage = very\_inc
- กฎข้อที่ 14 IF error = very\_pos AND error rate = zero\_rate THEN voltage = very\_inc
- กฎข้อที่ 15 IF error = very\_pos AND error rate = pos\_rate THEN voltage = very\_inc

หมายเหตุ: กรณีที่ตัวควบคุมพีชชีกำหนดใช้ค่าเชิงภาษาของอินพุต error และ error rate จำนวน 3 ค่า จะให้จำนวนกฎที่เป็นไปได้เท่ากับ 9 กฎ ( $3 \times 3 = 9$ ) ซึ่งแสดงได้ดังกฎข้อที่ 4 ถึง 12

จากกฎพีชชีที่ได้ออกแบบสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยทั้ง 15 กฎ ข้างต้น จะยกตัวอย่างการอธิบายความหมายของกฎข้อที่ 1 4 8 12 และ 15 ดังนี้

ความหมายของกฎข้อที่ 1 ถ้าค่าอินพุต error มีค่าเท่ากับ very\_neg และค่า error rate เท่ากับ neg\_rate แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต voltage เท่ากับ very\_dec ซึ่งมีความหมายว่า ถ้าค่ากระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) น้อยกว่าค่ากระแสชดเชย ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) มาก และค่า  $\frac{de_{id}}{dt}, \frac{de_{iq}}{dt}$  มีค่าเป็นลบ (ค่า  $\frac{di_{cd}}{dt}, \frac{di_{cq}}{dt}$  มีค่าเป็นบวก) จะกำหนดให้ลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ( $u_{Ld}, u_{Lq}$ ) ในปริมาณมาก

ความหมายของกฎข้อที่ 4 ถ้าค่าอินพุต error เท่ากับ neg และค่า error rate เท่ากับ neg\_rate แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต voltage เท่ากับ dec มีความหมายว่า ถ้าค่า  $i_{cd}^*, i_{cq}^*$  น้อยกว่าค่า  $i_{cd}, i_{cq}$  และค่า  $\frac{de_{id}}{dt}, \frac{de_{iq}}{dt}$  มีค่าเป็นลบ (ค่า  $\frac{di_{cd}}{dt}, \frac{di_{cq}}{dt}$  มีค่าเป็นบวก) จะกำหนดให้ลดระดับแรงดันไฟฟ้า  $u_{Ld}, u_{Lq}$

ความหมายของกฎข้อที่ 8 ถ้าค่าอินพุต error เท่ากับ zero และค่า error rate เท่ากับ zero\_rate แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต voltage เท่ากับ cons มีความหมายว่า ถ้าค่า  $i_{cd}^*, i_{cq}^*$  เท่ากับค่า  $i_{cd}, i_{cq}$  และค่า  $\frac{de_{id}}{dt}, \frac{de_{iq}}{dt}$  เท่ากับศูนย์ (ค่า  $\frac{di_{cd}}{dt}, \frac{di_{cq}}{dt}$  มีค่าเท่ากับศูนย์) จะกำหนดให้แรงดันไฟฟ้า  $u_{Ld}, u_{Lq}$  คงที่

ความหมายของกฎข้อที่ 12 ถ้าค่าอินพุต error เท่ากับ *dec* และค่า error rate เท่ากับ *pos\_rate* แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต voltage เท่ากับ *inc* มีความหมายว่า ถ้าค่า  $i_{cd}^*, i_{cq}^*$  มากกว่าค่า  $i_{cd}, i_{cq}$  และค่า  $\frac{de_{id}}{dt}, \frac{de_{iq}}{dt}$  เป็นบวก (ค่า  $\frac{di_{cd}}{dt}, \frac{di_{cq}}{dt}$  มีค่าเป็นลบ) จะกำหนดให้เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า  $u_{Ld}, u_{Lq}$

ความหมายของกฎข้อที่ 15 ถ้าค่าอินพุต error เท่ากับ *very\_dec* และค่า error rate เท่ากับ *pos\_rate* แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต voltage เท่ากับ *very\_inc* มีความหมายว่า ถ้าค่า  $i_{cd}^*, i_{cq}^*$  มากกว่าค่า  $i_{cd}, i_{cq}$  มาก และค่า  $\frac{de_{id}}{dt}, \frac{de_{iq}}{dt}$  เป็นบวก (ค่า  $\frac{di_{cd}}{dt}, \frac{di_{cq}}{dt}$  มีค่าเป็นลบ) จะกำหนดให้เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า  $u_{Ld}, u_{Lq}$  ในปริมาณมาก

กฎฟัซซีที่ได้ออกแบบสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยทั้งหมดสามารถแสดงในรูปแบบตารางเมตริกซ์ดังรูปที่ 5.22 ซึ่งตารางเมตริกซ์แสดงกฎดังกล่าว เรียกว่า หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ (fuzzy associative memory: FAM) โดยจากรูปที่ 5.22 จะเห็นได้ว่า จำนวนกฎฟัซซีทั้ง 15 กฎ ถูกบรรจุลงในตารางเมตริกซ์ที่มีขนาดเท่ากับ 3x5

		error				
		<i>very_neg</i>	<i>neg</i>	<i>zero</i>	<i>pos</i>	<i>very_pos</i>
error rate	<i>neg_rate</i>	<i>very_dec</i>	<i>dec</i>	<i>inc</i>	<i>inc</i>	<i>very_inc</i>
	<i>zero_rate</i>	<i>very_dec</i>	<i>dec</i>	<i>cons</i>	<i>inc</i>	<i>very_inc</i>
	<i>pos_rate</i>	<i>very_dec</i>	<i>dec</i>	<i>dec</i>	<i>inc</i>	<i>very_inc</i>

รูปที่ 5.22 กฎฟัซซีสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยแสดงในรูปแบบ FAM

จากกฎฟัซซีสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยทั้ง 15 กฎ เมื่อพิจารณาในแต่ละกฎ จะสังเกตได้ว่า กฎข้อที่ 1 2 และ 3 มีเป้าหมายการควบคุมกระแสชดเชยที่เหมือนกัน คือ เมื่อค่าอินพุต error มีค่าเป็นลบมาก (*very\_neg*) และค่าอินพุต error rate เป็นค่าใด ๆ จะกำหนดให้ค่าเอาต์พุต voltage ต้องลดระดับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในปริมาณมาก (*very\_dec*) ดังนั้น จึงทำให้สามารถยุบรวมกฎทั้งสามข้อดังกล่าวเป็นกฎข้อเดียวกันได้โดยกำหนดให้เป็นกฎข้อที่ 1 ใหม่ ในทำนองเดียวกัน กลุ่มของกฎข้อที่ 4 5 6 กลุ่มกฎข้อที่ 10 11 12 และกลุ่มกฎข้อที่ 13 14 15 สามารถยุบรวมเป็นกฎใหม่ดังข้อที่ 2 ข้อที่ 6 และข้อที่ 7 ตามลำดับกลุ่ม แต่สำหรับกฎข้อที่ 7 8 และ

9 ยังคงแยกไว้เช่นเดิม โดยเรียงลำดับกฎใหม่ให้เป็นกฎข้อที่ 3 4 และ 5 ตามลำดับ ผลจากการพิจารณาขบวนการกฎและเรียงลำดับกฎใหม่จะทำให้สามารถลดจำนวนกฎฟuzzyเหลือเพียง 7 กฎ จากเดิมที่มี 15 กฎ ซึ่งจะช่วยให้โครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzyที่ได้มีความซับซ้อนน้อยลง และจะทำให้เวลาในการประมวลผลของตัวควบคุมมีความเร็วเพิ่มมากขึ้น ดังผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณจำลองสถานการณ์กรณีที่ตัวควบคุมฟuzzyใช้กฎฟuzzyจำนวน 15 กฎ และกรณีที่ใช้กฎฟuzzyจำนวน 7 กฎ ที่ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 5.5 จากตารางดังกล่าว จะเห็นได้ว่า กรณี 7 กฎ ใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ต่อ 5 คาบสัญญาณเท่ากับ 361.46 วินาที ซึ่งน้อยกว่ากรณี 15 กฎ ที่ใช้เวลาเท่ากับ 535.04 วินาที นอกจากนี้ จะพบว่าค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ระบบรูปที่ 5.10 ของทั้งสองกรณีมีค่าเท่ากันเท่ากับ 1.51% จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การขบวนการกฎตามที่ได้อธิบายข้างต้น ตัวควบคุมฟuzzyยังคงรักษาสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีเหมือนเดิม และสามารถลดความซับซ้อนของตัวควบคุมฟuzzyที่จะนำไปใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอคทีฟได้ กฎฟuzzyทั้ง 7 กฎ สามารถแสดงได้ดังนี้

กฎข้อที่ 1 IF error = very\_neg THEN voltage = very\_dec (ขบวนการกฎข้อที่ 1 2 3)

กฎข้อที่ 2 IF error = neg THEN voltage = dec (ขบวนการกฎข้อที่ 4 5 6)

กฎข้อที่ 3 IF error = zero AND error rate = neg\_rate THEN voltage = inc

กฎข้อที่ 4 IF error = zero AND error rate = zero\_rate THEN voltage = cons

กฎข้อที่ 5 IF error = zero AND error rate = pos\_rate THEN voltage = dec

กฎข้อที่ 6 IF error = pos THEN voltage = inc (ขบวนการกฎข้อที่ 10 11 12)

กฎข้อที่ 7 IF error = very\_pos THEN voltage = very\_inc (ขบวนการกฎข้อที่ 13 14 15)

ตารางที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมฟuzzy

กรณี 15 กฎฟuzzyกับกรณี 7 กฎฟuzzy

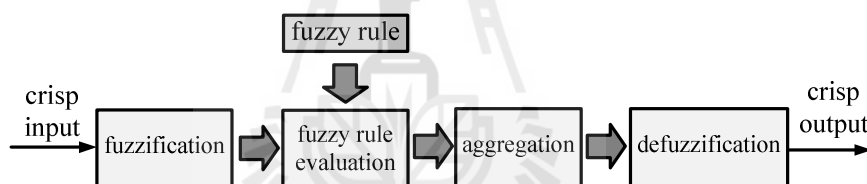
จำนวน กฎฟuzzy	ค่า %THD ของกระแสทางที่แหล่งจ่าย หลังการชดเชย				เวลาจำลองสถานการณ์ ต่อ 5 คาบสัญญาณ (วินาที)
	เฟส a	เฟส b	เฟส c	เฉลี่ย	
15	1.44%	1.54%	1.54%	1.51%	535.04
7	1.44%	1.54%	1.54%	1.51%	361.46

## 5.7 การอนุมานฟัซซี

การอนุมานฟัซซี (fuzzy inference) คือ กระบวนการส่งค่าอินพุตของระบบที่พิจารณาไปเป็นค่าเอาต์พุตโดยใช้ทฤษฎีทางฟัซซี วิธีการอนุมานที่นิยมอย่างแพร่หลายมีอยู่ 2 วิธีการ คือ การอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani และการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno ซึ่งแต่ละวิธีมีรายละเอียดอธิบายได้ดังนี้

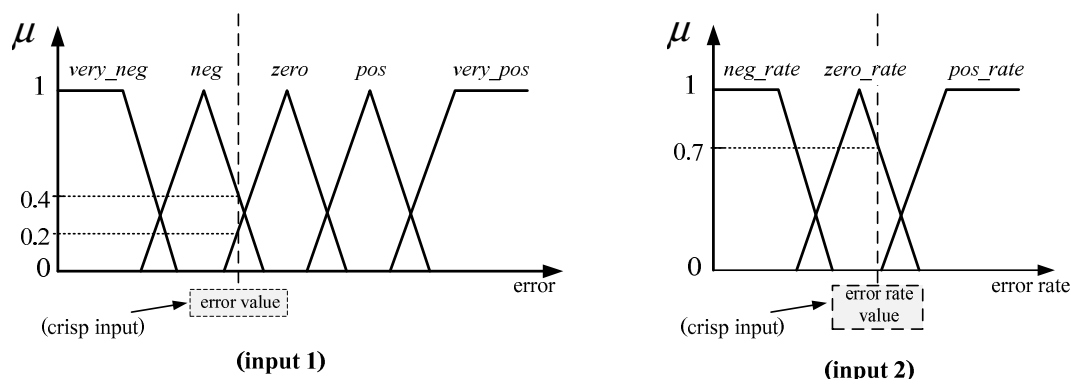
### 5.7.1 การอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani

การอนุมานฟัซซีตามวิธีการของ Mamdani ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง ซึ่งได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี 1974 โดย Ebrahim Mamdani (Mamdani E.H., 1974) กระบวนการอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani ประกอบด้วย 4 กระบวนการ คือ การทำฟัซซี (fuzzification) การประเมินกฎฟัซซี (fuzzy rule evaluation) การรวมกฎ (aggregation) และการทำดีฟัซซี (defuzzification) ดังแสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 5.23 โดยส่วนของการประเมินกฎฟัซซีจะใช้กฎฟัซซีที่ได้จากการออกแบบโดยผู้เชี่ยวชาญของระบบที่พิจารณาในการตัดสินใจ



รูปที่ 5.23 กระบวนการอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani

การทำฟัซซี คือ ขั้นตอนการส่งค่าอินพุตชัดเจน (crisp input) ของระบบที่พิจารณาไปอยู่ในรูปแบบของค่าอินพุตแบบฟัซซีด้วยการระบุค่าเชิงภาษา และการคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของอินพุตดังกล่าว (ค่าความเป็นสมาชิกสามารถคำนวณได้จากรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกที่เลือกใช้) ยกตัวอย่างการทำฟัซซีสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยได้ดังรูปที่ 5.24 โดยทำการสมมุติให้ค่าอินพุต error และค่า error rate มีค่าตามตำแหน่งที่ปรากฏ คือ ค่าอินพุต error ตกอยู่ในฟัซซีเซตค่าเชิงภาษา *neg* และ *zero* ที่ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ และกรณีอินพุต error rate ตกอยู่ในฟัซซีเซตค่าเชิงภาษา *zero\_rate* ด้วยค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.7



รูปที่ 5.24 ตัวอย่างการทำฟัซซีของระบบควบคุมกระแสชดเชย

*การประเมินกฎฟัซซี* คือ ขั้นตอนการตรวจสอบค่าอินพุตการควบคุมที่อยู่ในรูปแบบของค่าเชิงภาษาที่ได้จากการทำฟัซซีว่า อินพุตดังกล่าวเป็นไปตามกฎฟัซซีหรือเงื่อนไขส่วน IF ข้อใดบ้างและด้วยค่าความเป็นสมาชิกเท่าไร จากนั้นจะดำเนินการกำหนดค่าเอาต์พุตที่อยู่ในรูปแบบค่าเชิงภาษาเช่นกันตามส่วนของ THEN เฉพาะกฎข้อที่เป็นจริง วิธีการประเมินกฎฟัซซีแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีการตัดยอด (clipped) และวิธีการปรับขนาด (scaled) ฟัซซีเซตของเอาต์พุตด้วยค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของอินพุต (ค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของอินพุตจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้เชื่อมโยงระหว่างอินพุตแต่ละตัวในส่วน IF เช่น AND (min) หรือ OR (max) หรืออาจไม่พิจารณาตัวดำเนินการเชื่อมต่อใด ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรออกแบบกฎฟัซซี)

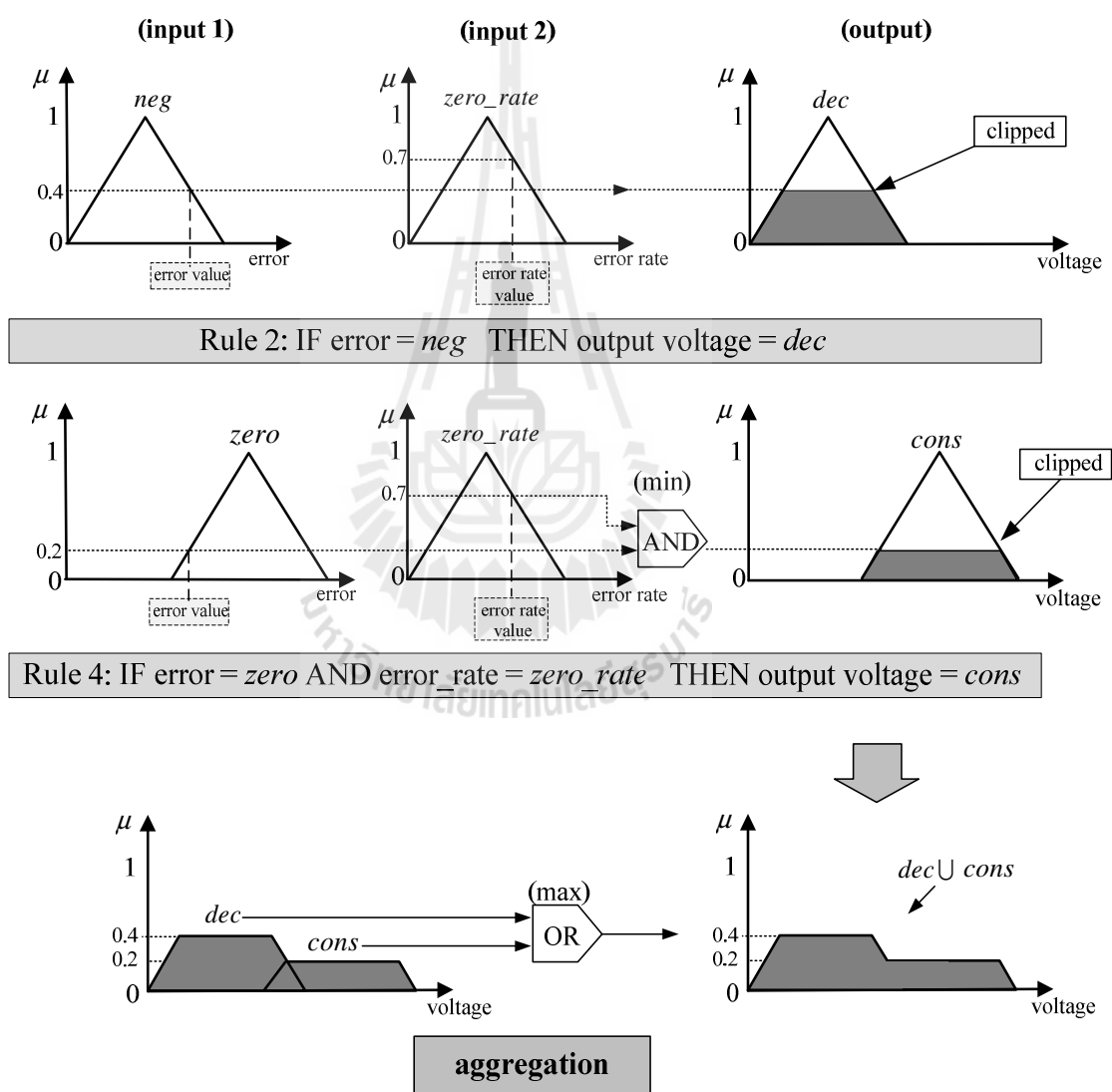
*การรวมกฎ* คือ ขั้นตอนการหาฟัซซีเซตเอาต์พุตสุดท้ายจากกฎที่ได้รับการประเมินแล้ว (กฎข้อที่เป็นจริงทั้งหมด) โดยจะรวมฟัซซีเซตค่าเชิงภาษาของเอาต์พุตของทุกกฎที่เป็นจริงให้เป็นฟัซซีเซตเดียวกันเพียงหนึ่งเซต ซึ่งจะเรียกว่า ผลลัพธ์ฟัซซีเซตเอาต์พุต ทั้งนี้เนื่องจากค่าของอินพุตการควบคุมหนึ่งค่าสามารถตกอยู่ในเงื่อนไขของกฎฟัซซีได้หลายกฎพร้อม ๆ กัน การรวมฟัซซีเซตค่าเชิงภาษาของเอาต์พุตในทุกกฎที่เป็นจริงจะใช้ตัวดำเนินการแบบยูเนียน (OR) ซึ่งหมายถึงการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าสูงสุดของแต่ละฟัซซีเซต การอนุมานฟัซซีที่รวมกฎจากการประเมินฟัซซีแบบตัดยอดจะเรียกว่า การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด (maximum-minimum) ในขณะที่การอนุมานฟัซซีที่รวมกฎจากการประเมินกฎฟัซซีแบบการคูณจะเรียกว่า การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ผลคูณ (maximum-product)

ตัวอย่างการประเมินกฎฟัซซีและการรวมกฎสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย เช่น จากการทำฟัซซี พบว่า ค่าอินพุต error และ error rate เข้าเงื่อนไขของกฎฟัซซีข้อที่ 2 และ 4 คือ

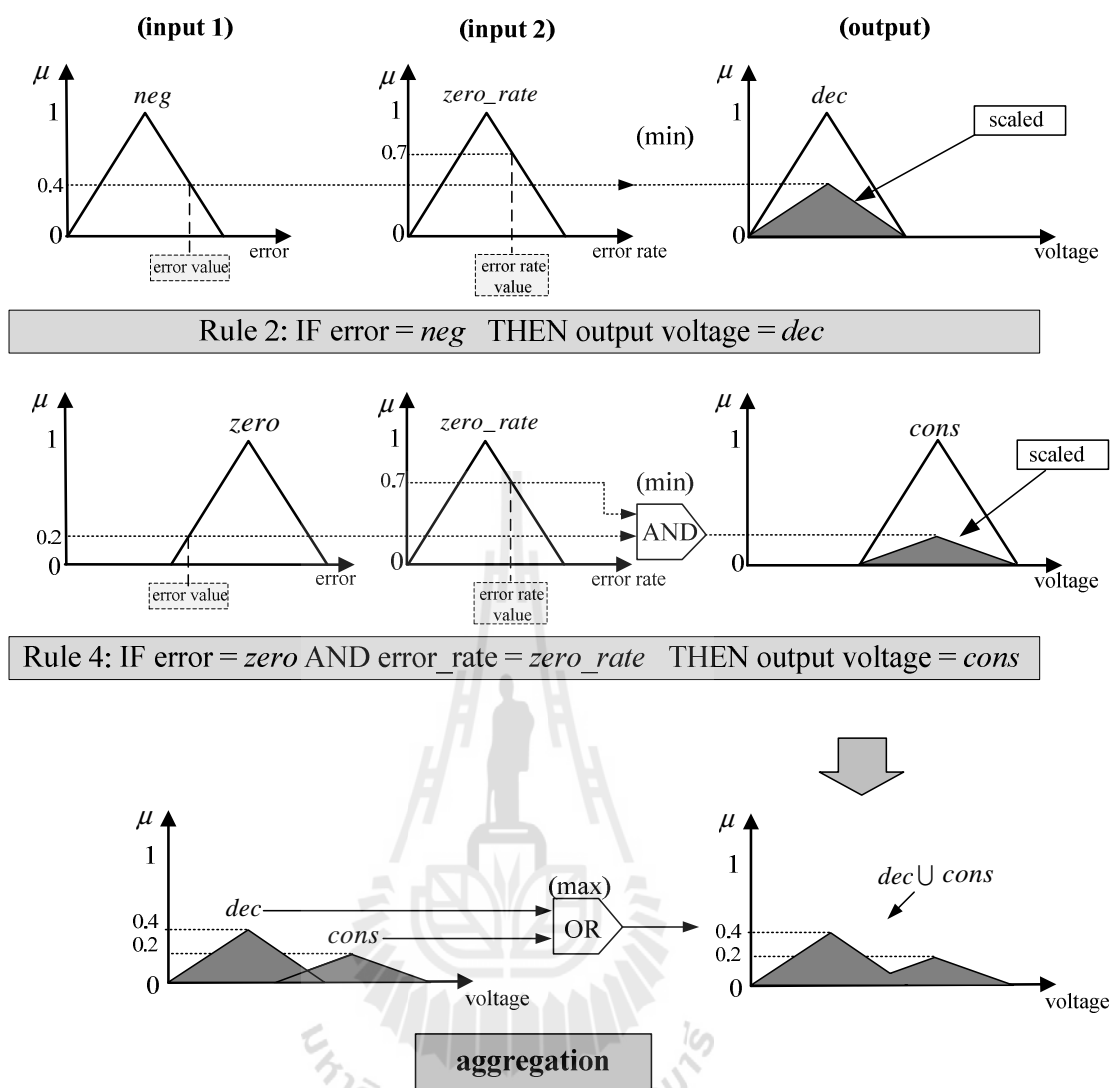
กฎข้อที่ 2 IF error = *neg* THEN voltage = *dec*

กฎข้อที่ 4 IF error = *zero* AND error rate = *zero\_rate* THEN voltage = *cons*

จากกฎที่เป็นจริงข้างต้น การประเมินกฎฟัซซีแบบการตัดยอดและการรวมกฎ (การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด) สามารถอธิบายเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 5.25 และสำหรับการประเมินกฎฟัซซีแบบการคูณและการรวมกฎ (การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ผลคูณ) อธิบายได้ดังแผนภาพรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.25 การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด



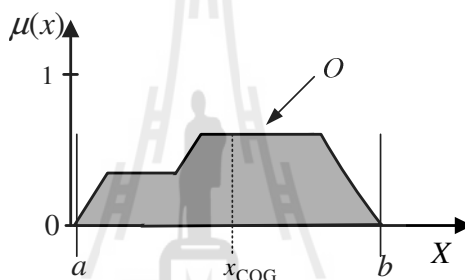
รูปที่ 5.26 การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ผลคูณ

การทำดีฟัซซี่ คือ ขั้นตอนสุดท้ายของการอนุมานฟัซซี่เพื่อแปลงผลลัพธ์ฟัซซี่เซตเอาต์พุตที่ได้จากการรวมกฎกลับไปอยู่ในรูปแบบของค่าเอาต์พุตชัดเจน (crisp output) สำหรับนำไปใช้ควบคุมในระบบที่พิจารณา โดยวิธีการทำดีฟัซซี่ที่นิยมมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง (Center of Gravity: COG) วิธีไบเซกเตอร์ (Bisector of Area: BOA) วิธีหาค่าน้อยสุดของค่าสูงสุด (Smallest of Maximum: SOM) และวิธีหาค่ามากที่สุดของค่าสูงสุด (Largest of Maximum: LOM) และวิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (Mean of Maximum: MOM) เป็นต้น โดยในแต่ละวิธีมีรายละเอียดอธิบายได้ดังนี้



### การทำดีฟัซซีแบบวิธี COG

การทำดีฟัซซีด้วยวิธีการหาจุดศูนย์กลางหรือวิธี COG จากผลลัพธ์ฟัซซีเซตเอาต์พุต (ฟัซซีเซต  $O$ ) สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.27 โดยการหาค่าเอาต์พุตชัดเจนแบบ COG สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.11) อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติการคำนวณหาจุดศูนย์กลางดังกล่าวจะใช้วิธีการประมาณค่าโดยการชักตัวอย่างค่าตัวแปรสมาชิก  $x$  ใด ๆ ดังสมการที่ (5.12) ยกตัวอย่างการทำดีฟัซซีของระบบควบคุมกระแสชดเชยกรณีผลลัพธ์ฟัซซีเซตของเอาต์พุต voltage ที่ได้จากการรวมกฎแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุดตามรูปที่ 5.25 จะได้ดังรูปที่ 5.28 โดยกำหนดการชักตัวอย่างตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ของผลลัพธ์ฟัซซีเซตเอาต์พุต (ซึ่งในที่นี้  $x$  คือ ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำหรือ  $u_{Ld}, u_{Lq}$ ) มีค่าตามที่ปรากฏในผลลัพธ์ฟัซซีเซตเอาต์พุตดังรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.27 การทำดีฟัซซีแบบ COG

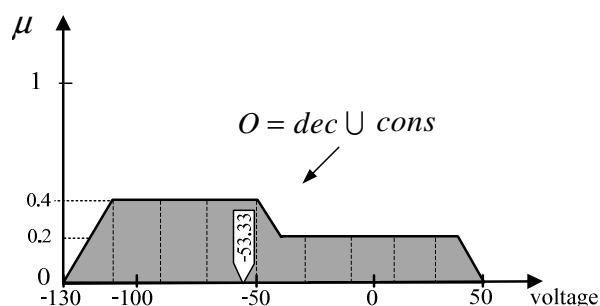
$$\text{COG} = \frac{\int_a^b \mu_O(x) x dx}{\int_a^b \mu_O(x) dx} \quad (5.11)$$

$$\text{COG} = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_O(x) x}{\sum_{x=a}^b \mu_O(x)} \quad (5.12)$$

โดยที่  $\mu_O(x)$  คือ ค่าความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์ฟัซซีเซตเอาต์พุตที่ตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ใด ๆ

จากรูปที่ 5.28 การคำนวณหาค่าเอาต์พุตชัดเจนแบบ COG สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{COG} = \frac{-130 \times 0 + (-110 - 90 - 70 - 50) \times 0.4 + (-30 - 10 + 10 + 30) \times 0.2 + 50 \times 0}{0 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.2 + 0.2 + 0.2 + 0.2 + 0} = -53.33$$



รูปที่ 5.28 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ COG

สำหรับค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ COG ที่มีค่าเท่ากับ  $-53.33$  จะให้ความหมายว่า ระบบควบคุมกระแสชดเชยต้องปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ  $-53.33$  V เพื่อให้กระแสชดเชยมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม การคำนวณแบบ COG แบบการประมาณนี้ จะมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นเมื่อกำหนดให้การชั้ดด้วยมีค่ามากยิ่งขึ้น

การทำดีฟัซซีแบบวิธี BOA

การทำดีฟัซซีเพื่อหาค่าเอาต์พุตชัดเจนโดยใช้วิธี BOA จะกำหนดเงื่อนไขค่าความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์ฟัซซีเซตเอาต์พุต ( $\mu_o(x)^*$ ) ดังสมการที่ (5.13) เป็นตัวกำหนดค่าเอาต์พุตของระบบที่พิจารณาควบคุม ดังนี้

$$\mu_o(x)^* \geq \frac{\sum \mu_o(x)}{2} \quad (5.13)$$

จากสมการที่ (5.13) ผลรวมค่าความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์ฟัซซีเซตเอาต์พุตแต่ละตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  จะถูกนำมาหารด้วยค่า 2 เพื่อจะได้ค่าเงื่อนไขค่า  $\mu_o(x)^*$  สำหรับนำไปใช้ในการตรวจสอบเพื่อหาค่าเอาต์พุตชัดเจนตามสมการที่ (5.14)

$$\mu_o(x)_n^* = \mu_o(x)_{n-1}^* + \mu_o(x)_n \quad (5.14)$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนรอบในการตรวจสอบ  $(0, 1, 2, \dots, n)$

จากสมการที่ (5.14) ค่าความเป็นสมาชิกของรอบการตรวจสอบที่ 0 ( $\mu_o(x)_0^*$ ) จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 และจากนั้นจะทำการตรวจสอบค่าความเป็นสมาชิกที่ตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ค่าแรกโดยถ้าค่าความเป็นสมาชิกไม่เป็นไปตามเงื่อนไข  $\mu_o(x)_n^* \geq \mu_o(x)^*$  จะทำการ

เพิ่มจำนวนรอบการตรวจสอบเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่า  $\mu_o(x)_n^*$  จะขึ้นไปตามเงื่อนไข โดยค่าตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ที่ทำให้เงื่อนไขค่าความเป็นสมาชิกเป็นจริง คือ ค่าเอาต์พุตชุดเงินแบบ BOA สำหรับนำไปใช้ควบคุมในระบบที่พิจารณา ยกตัวอย่างระบบควบคุมกระแสชดเชยที่มีผลลัพธ์ฟัซซีเซตเอาต์พุตตามรูปที่ 5.29 และมีข้อมูลค่าความเป็นสมาชิกที่ตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.6 จากตารางดังกล่าวสามารถกำหนดหาค่าเงื่อนไข  $\mu_o(x)^*$  ได้เท่ากับ 1.2 ดังนี้

$$\mu_o(x)^* \geq \frac{0.4+0.4+0.4+0.4+0.2+0.2+0.2+0.2}{2} \geq 1.2$$

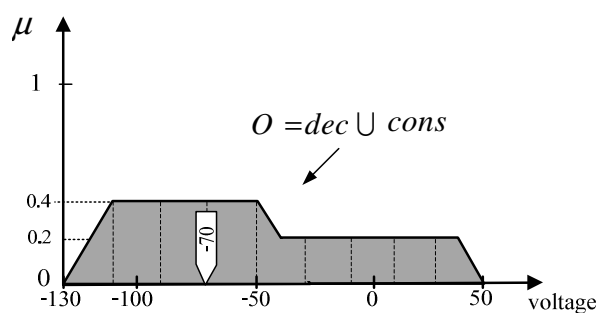
ตารางที่ 5.6 ข้อมูลค่าระดับความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์ฟัซซีเซตเอาต์พุตสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย

$\mu_o(x)_n$	0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0
$x$	-130	-110	-90	-70 (BOA)	-50	-30	-10	10	30	50
$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

จากค่าเงื่อนไข  $\mu_o(x)^*$  ที่ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1.2 เมื่อดำเนินการคำนวณค่า  $\mu_o(x)_n^*$  ตามสมการที่ (5.14) เพื่อตรวจสอบหาค่าเอาต์พุตชุดเงินดังตารางที่ 5.7 ซึ่งสุดท้ายจะพบว่า จำนวนรอบการตรวจสอบที่  $n = 3$  ให้ค่า  $\mu_o(x)_3^* = 1.2$  เป็นไปตามเงื่อนไข ( $\mu_o(x)_n^* \geq \mu_o(x)^*$ ) โดยที่  $n = 3$  ค่าตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  มีค่าเท่ากับ -70 ดังนั้น ค่าเอาต์พุตชุดเงินแบบ BOA จึงมีค่าเท่ากับ -70 ซึ่งหมายถึง ระบบควบคุมกระแสชดเชยต้องปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำให้มีค่าเท่ากับ -70 V ดังรูปที่ 5.29

ตารางที่ 5.7 การตรวจสอบค่าความเป็นสมาชิกภาพ

$n$	$\mu_o(x)_n^* = \mu_o(x)_{n-1}^* + \mu_o(x)_n$
0	0
1	0.4
2	0.8
3	1.2



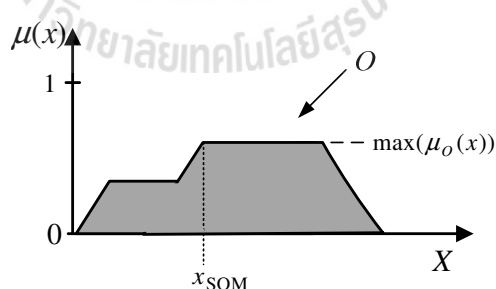
รูปที่ 5.29 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ BOA

การทำดีฟัซซีแบบวิธี SOM

การทำดีฟัซซีแบบ SOM เป็นวิธีการหาค่าเอาต์พุตชัดเจนจากผลลัพธ์ฟัซซีเซตเอาต์พุต ณ ตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  น้อยที่สุดที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุด ซึ่งตำแหน่งค่าเอาต์พุตดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.30 โดยอาศัยการคำนวณจากสมการที่ (5.15) ดังนี้

$$\text{SOM} = \min\{x \mid \mu(x) = \max(\mu_o(x))\} \quad (5.15)$$

โดยที่  $\max(\mu_o(x))$  คือ การเปรียบเทียบหาค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดของผลลัพธ์ฟัซซีเซตเอาต์พุตทุกตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$



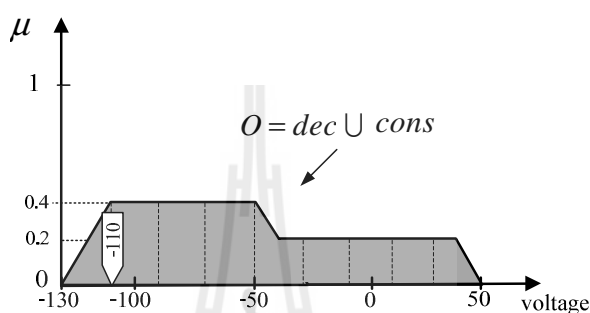
รูปที่ 5.30 การทำดีฟัซซีแบบ SOM

ตัวอย่างการทำดีฟัซซีแบบ SOM สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.31 จากรูปดังกล่าว สามารถคำนวณหาค่าเอาต์พุตชัดเจนแบบ SOM ได้ดังต่อไปนี้

$$\max(\mu_o(x)) = 0.4$$

$$\text{SOM} = \min\{x \mid \mu(x) = \max(\mu_o(x))\} = -110$$

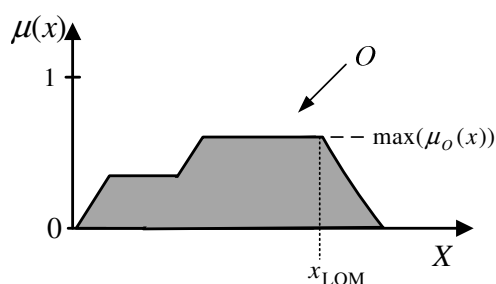
จากค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำฟัซซีแบบ SOM เท่ากับ  $-110$  ดังกล่าวให้  
ความหมาย คือ ระบบควบคุมกระแสชดเชยต้องปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำให้  
มีค่าเท่ากับ  $-110$  V



รูปที่ 5.31 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ SOM

การทำดีฟัซซีด้วยวิธี LOM

การทำฟัซซีแบบ LOM เป็นวิธีการหาค่าเอาต์พุตชัดเจนจากผลลัพธ์ฟัซซีเซต  
เอาต์พุตที่คล้ายกับวิธี SOM แต่จะใช้ค่าตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ที่มากที่สุด ที่มีค่าความเป็น  
สมาชิกสูงสุดแทน ซึ่งตำแหน่งค่าเอาต์พุตดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.32 ซึ่งคำนวณได้  
จากสมการที่ (5.16) ตัวอย่างการทำดีฟัซซีแบบ LOM สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยสามารถ  
แสดงได้ดังรูปที่ 5.33 จากรูปดังกล่าว ผลการคำนวณหาค่าเอาต์พุตชัดเจนสำหรับนำไปใช้ควบคุม  
กระแสชดเชยมีค่าเท่ากับ  $-50$  ซึ่งในกรณีนี้หมายถึง ระบบควบคุมกระแสชดเชยต้องปรับระดับ  
แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำให้มีเท่ากับ  $-50$  V

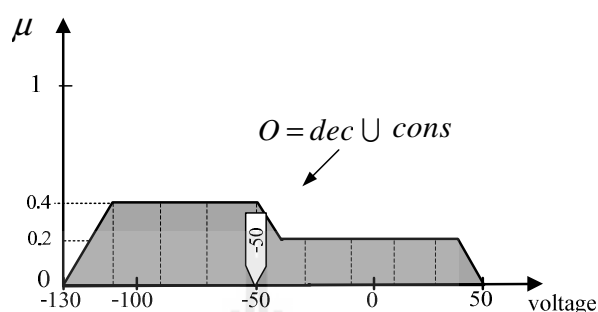


รูปที่ 5.32 การทำดีฟัซซีแบบ LOM

$$\text{LOM} = \max\{x \mid \mu(x) = \max(\mu_o(x))\} \quad (5.16)$$

$$\max(\mu_o(x)) = 0.4$$

$$\text{LOM} = \max\{x \mid \mu(x) = \max(\mu_o(x))\} = -50$$

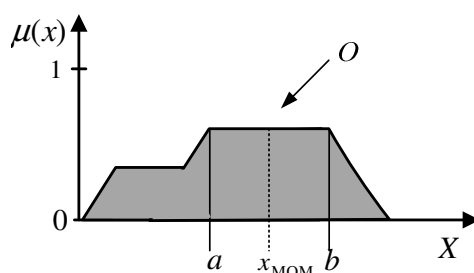


รูปที่ 5.33 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ LOM

#### การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธี MOM

การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธี MOM เป็นวิธีการหาค่าเอาต์พุตชัดเจนจากผลลัพธ์ฟัซซี่เซตเอาต์พุต โดยใช้การคำนวณหาค่าเฉลี่ยของตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ที่มีค่าความเป็นสมาชิกระดับสูงสุดเท่ากัน ดังรูปที่ 5.34 จากรูปดังกล่าวกำหนดให้ค่า  $a$  คือ ค่าตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดลำดับแรก (สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.15)) และ  $b$  คือ ค่าตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  ที่ระดับความเป็นสมาชิกสูงสุดลำดับสุดท้าย (คำนวณได้จากสมการที่ (5.16)) และสำหรับการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของตำแหน่งตัวแปรสมาชิก  $x$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.17) ดังนี้

$$\text{MOM} = \frac{a + b}{2} \quad (5.17)$$

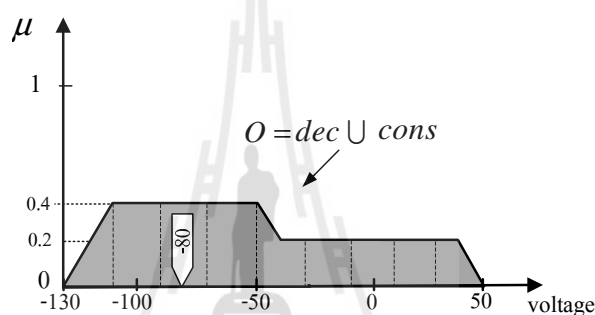


รูปที่ 5.34 การทำดีฟัซซี่แบบ MOM

ตัวอย่างการทำดีฟัซซีแบบ MOM สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.35 จากรูปดังกล่าว จะเห็นว่าค่า  $a$  และ  $b$  มีค่าเท่ากับ -110 และ -50 ตามลำดับ ดังนั้น ค่าเอาต์แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ MOM จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{MOM} = \frac{-110 + (-50)}{2} = -80$$

โดยค่าเอาต์พุตเท่ากับ -80 ดังกล่าวให้ความหมาย คือ ระบบควบคุมกระแสชดเชยต้องลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีเท่ากับ -80 V



รูปที่ 5.35 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีแบบ MOM

### 5.7.2 การอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno

ในปี ค.ศ 1985 Takagi และ Sugeno (Takagi K. and Sugeno M., 1985) ได้นำเสนอวิธีการอนุมานฟัซซีที่แตกต่างจาก Mamdani ในส่วนของรูปแบบของฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต โดย Takagi-Sugeno ได้ใช้ฟังก์ชันเส้นตรงแทนการใช้ฟังก์ชันสมาชิกแบบฟัซซีเซต ดังนั้น ส่วนของกฎฟัซซีจึงสามารถเขียนแสดงได้ดังนี้

IF  $x$  is  $A$  AND  $y$  is  $B$

THEN  $z$  is  $f(x,y)$

โดยที่  $x$   $y$  และ  $z$  คือ ตัวแปรภาษา

$A$  และ  $B$  คือ ค่าเชิงภาษา

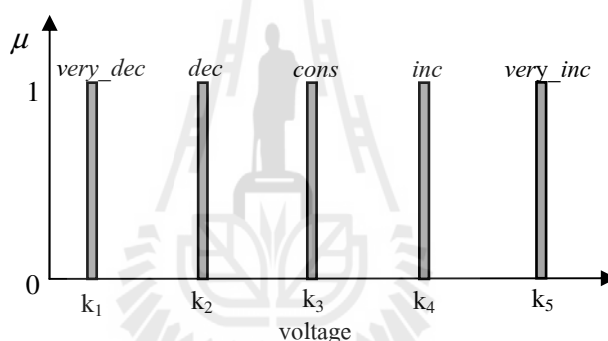
$f(x, y)$  คือ ฟังก์ชันเส้นตรง

สำหรับฟังก์ชัน  $f(x, y)$  ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือ ฟังก์ชันแบบจำลองฟัซซีของ Takagi-Sugeno อันดับศูนย์ (zero order Takagi-Sugeno fuzzy model) ซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวจะเป็นเพียงค่าคงที่เส้นตรงโทน ( $k$ ) เท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่อนข้างสะดวกและง่ายในขั้นตอนการรวมกฎ สำหรับรูปแบบของกฎฟัซซีที่ใช้แบบจำลองฟัซซีของ Takagi-Sugeno จะมีลักษณะดังนี้

IF  $x$  is  $A$  AND  $y$  is  $B$

THEN  $z$  is  $k$

ยกตัวอย่างการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno กับระบบควบคุมกระแสชดเชย โดยรูปแบบฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตที่เป็นเส้นตรงค่าคงที่ 5 ค่าเชิงภาษาแสดงได้ดังรูปที่ 5.36 การประเมินกฎ ฟัซซีและการรวมกฎข้อที่ 2 และ 4 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.36 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage ที่เป็นเส้นตรงโทน

สำหรับการทำดีฟัซซีเพื่อหาค่าเอาต์พุตชัดเจนจากผลลัพธ์เอาต์พุตกลุ่มเส้นตรงโทน ( $O$ ) ของวิธีการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno เรียกว่า คำนวณน้ำหนักเฉลี่ย (weighted average หรือ WA) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5.18) โดยที่  $m$  คือ เลขจำนวนจริง 1, 2, 3 ...,  $m$

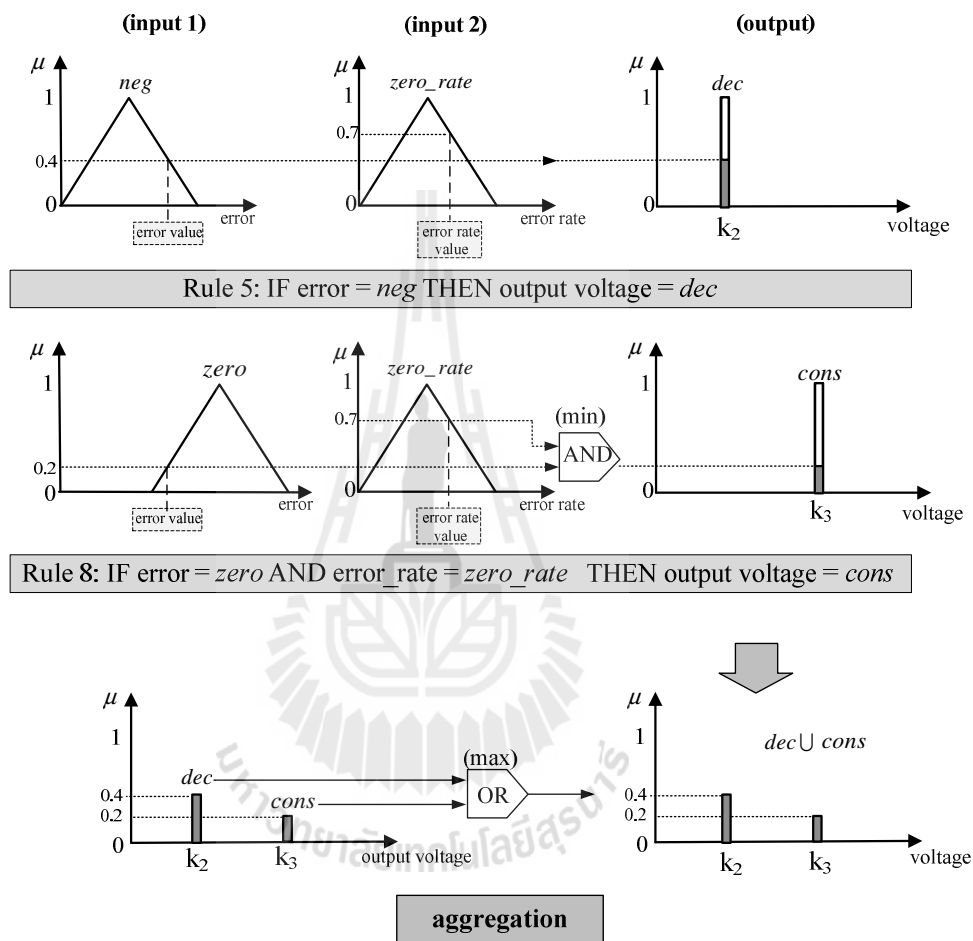
$$WA = \frac{\sum_{m=1}^m \mu(k_m) \times k_m}{\sum_{m=1}^m \mu(k_m)} \quad (5.18)$$

ตัวอย่างการทำดีฟัซซีแบบ WA ของระบบควบคุมกระแสชดเชยแสดงได้ดังรูปที่ 5.38 โดยสมมุติกำหนดให้ค่าตำแหน่ง  $k_2$  และ  $k_3$  เท่ากับ -70 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งการคำนวณเพื่อหาค่าเอาต์พุตชัดเจนแสดงได้ดังนี้

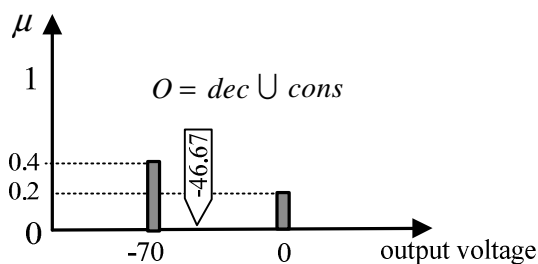


$$WA = \frac{0.4 \times (-70) + 0.2 \times (0)}{0.4 + 0.2} = -46.67$$

จากค่าเอาต์พุตชัดเจนเท่ากับ -46.67 หมายถึงระบบควบคุมกระแสชดเชยจะต้องปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำให้มีเท่ากับ -46.67 V เพื่อลดระดับกระแสชดเชยลง



รูปที่ 5.37 การอนุมานแบบ Takagi-Sugeno



รูปที่ 5.38 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ WA

### 5.7.3 การทดสอบวิธีการอนุมานของตัวควบคุมฟิชชีสำหรับ ระบบควบคุมกระแสชดเชย

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบวิธีการอนุมานฟิชชีแบบ Mamdeni และ Takagi-Sugeno

วิธีการทำ ดีฟิชชี	ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่าย หลังการชดเชย				เวลาจำลองสถานการณ์ ต่อ 5 คาบสัญญาณ (วินาที)
	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>	เฟส <i>c</i>	เฉลี่ย	
การอนุมานของ Mamdeni แบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด					
COA	1.44%	1.54%	1.54%	1.51%	361.46
BOA	1.52%	1.60%	1.45%	1.53%	318.49
MOM	2.03%	1.84%	1.91%	1.93%	310.52
LOM	1.67%	1.49%	1.60%	1.59%	308.13
SOM	1.56%	1.48%	1.66%	1.57%	298.51
การอนุมานของ Mamdeni แบบค่าสูงสุด-ผลคูณ					
COA	1.58%	1.61%	1.61%	1.60%	365.95
BOA	1.51%	1.52%	1.58%	1.53%	312.05
MOM	1.73%	1.93%	1.82%	1.83%	309.53
LOM	1.57%	1.74%	1.76%	1.69%	309.97
SOM	1.61%	1.71%	1.68%	1.67%	308.68
การอนุมานของ Takagi-Sugeno					
WA	1.34%	1.54%	1.59%	1.49%	287.58

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบเปรียบเทียบวิธีการอนุมานแบบ Mamdeni และวิธี Takagi-Sugeno ที่ใช้วิธีการทำดีฟิชชีด้วยวิธีต่าง ๆ ดังที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของระบบรูปที่ 5.10 โดยผลการทดสอบดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 5.8 จากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่า การอนุมานฟิชชีของ Mamdeni แบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด กรณีวิธีการทำดีฟิชชีแบบ COG ให้ผลค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยน้อยที่สุดเท่ากับ 1.51% ส่วนการอนุมานฟิชชีของ Mamdeni แบบค่าสูงสุด-ผลคูณ ด้วยวิธีการทำดีฟิชชีแบบ BOA ให้ผลค่า %THD เฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 1.53% ในขณะที่การอนุมานฟิชชีของ Takagi-Sugeno วิธีการทำดีฟิชชีแบบ WA ให้ผลค่า %THD เฉลี่ย

เท่ากับ 1.49% จากผลค่า  $%THD$  ที่ดีที่สุดทั้งสามกรณีดังกล่าว ถือได้ว่าตัวควบคุมฟuzzyสามารถให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลของเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ต่อ 5 คาบสัญญาณ พบว่า กรณีการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno ใช้เวลาน้อยที่สุดเท่ากับ 287.58 วินาที ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno ที่มีการทำดีฟuzzyแบบ WA เป็นโครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับนำไปใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟต่อไป

## 5.8 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการควบคุมแบบฟuzzy ซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีทางฟuzzyต่าง ๆ ได้แก่ ฟuzzyเซต การดำเนินการทางฟuzzyเซต ฟังก์ชันสมาชิก ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา กฎของฟuzzy และการอนุมานฟuzzy โดยการนำเสนอได้อธิบายไปพร้อมกับการยกตัวอย่างสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอการทดสอบออกแบบโครงสร้างส่วนต่าง ๆ ของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย ได้แก่ การทดสอบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา การออกแบบกฎฟuzzy และวิธีการอนุมานฟuzzy ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่า การใช้ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมที่มีค่าเชิงภาษาของอินพุต error 5 ค่า คือ “very\_neg” “neg” “zero” “pos” “very\_pos” ค่าเชิงภาษาของอินพุต error rate 3 ค่า คือ “neg\_rate” “zero\_rate” “pos\_rate” และค่าเชิงภาษาของเอาต์พุต voltage จำนวน 5 ค่า คือ “very\_dec” “dec” “cons” “inc” “very\_inc” ออกแบบกฎฟuzzyจำนวน 7 กฎ และวิธีการอนุมานฟuzzyใช้แบบ Takagi-Sugeno ที่มีการทำดีฟuzzyแบบการหาค่าน้ำหนักเฉลี่ย ให้ผลการทดสอบการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีที่สุด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวควบคุมฟuzzyที่มีโครงสร้างตามที่ได้จากการทดสอบดังกล่าว สำหรับนำไปควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟต่อไป อย่างไรก็ตาม ในบทนี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงผลของจุดตำแหน่งต่าง ๆ ของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzy ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อสมรรถนะการควบคุม การนำเสนอการออกแบบจุดตำแหน่ง ของฟังก์ชันสมาชิกดังกล่าวจะได้นำเสนอในบทต่อไป

## บทที่ 6

### เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป

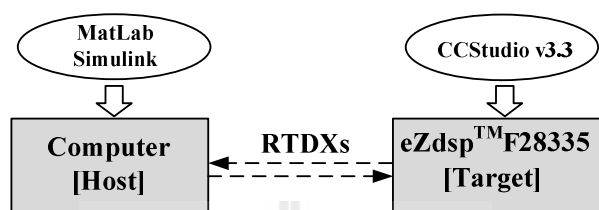
#### 6.1 กล่าวนำ

ระบบควบคุมและตัวควบคุมที่ถูกคิดค้น ออกแบบ หรือพัฒนาขึ้นมาใหม่สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทิฟ จำเป็นจะต้องอาศัยโปรแกรมช่วยจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมก่อนที่จะดำเนินการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมจริง ทั้งนี้เพื่อป้องกันอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์รวมถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบที่พิจารณาที่อาจเสียหายได้เนื่องจากระบบควบคุมหรือตัวควบคุมที่มีสมรรถนะการควบคุมไม่ดี ในบทที่ผ่านมาผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้ใช้โปรแกรม Simulink ในซอฟต์แวร์ MATLAB เป็นเครื่องมือช่วยสำหรับการจำลองสถานการณ์ อย่างไรก็ตาม การจำลองสถานการณ์ดังกล่าวได้ดำเนินการอยู่บนคอมพิวเตอร์ทั้งหมด ซึ่งอาจไม่สมจริงและมีความแตกต่างจากฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมจริง ที่งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้บอร์ด DSP สำหรับการประมวลผล ดังนั้นเพื่อให้ผลการจำลองสถานการณ์มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบฮาร์ดแวร์มากยิ่งขึ้น ในบทนี้จึงได้นำเสนอ เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป (Hardware In the Loop: HIL) ที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 รายละเอียดการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 จะนำเสนอในหัวข้อที่ 6.2 และการทดสอบจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบการทดสอบรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX จะนำเสนอในหัวข้อที่ 6.3 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 6.2 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป

เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP ปัจจุบันบริษัท MathWorks ได้พัฒนาซอฟต์แวร์ MATLAB สามารถเชื่อมโยงใช้งานร่วมกับบอร์ด DSP ผ่านโปรแกรมควบคุมบอร์ดที่ชื่อ Code Composer Studio โดยผู้ใช้งานจะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบอร์ด และพอร์ตที่ต้องการใช้เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับบอร์ด DSP งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้บอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ที่มีโปรแกรมควบคุม คือ Code Composer Studio เวอร์ชัน 3.3 (CCStudio v3.3) ซึ่งบอร์ด eZdsp™ F28335 ดังกล่าว สามารถใช้พอร์ต USB เชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ได้อย่างสะดวก ดังนั้น การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 เพื่อสร้างระบบการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป จึงสามารถ

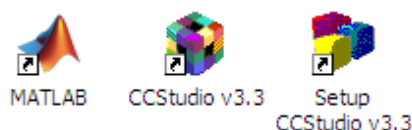
เชื่อมโยงด้วยพอร์ต USB ที่สามารถรับและส่งข้อมูลผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX (Real Time Data eXchange) การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink (Host) กับบอร์ด eZdsp™ F28335 (Target) แสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 6.1 โดยรายละเอียดการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 จะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อที่ 6.2.1



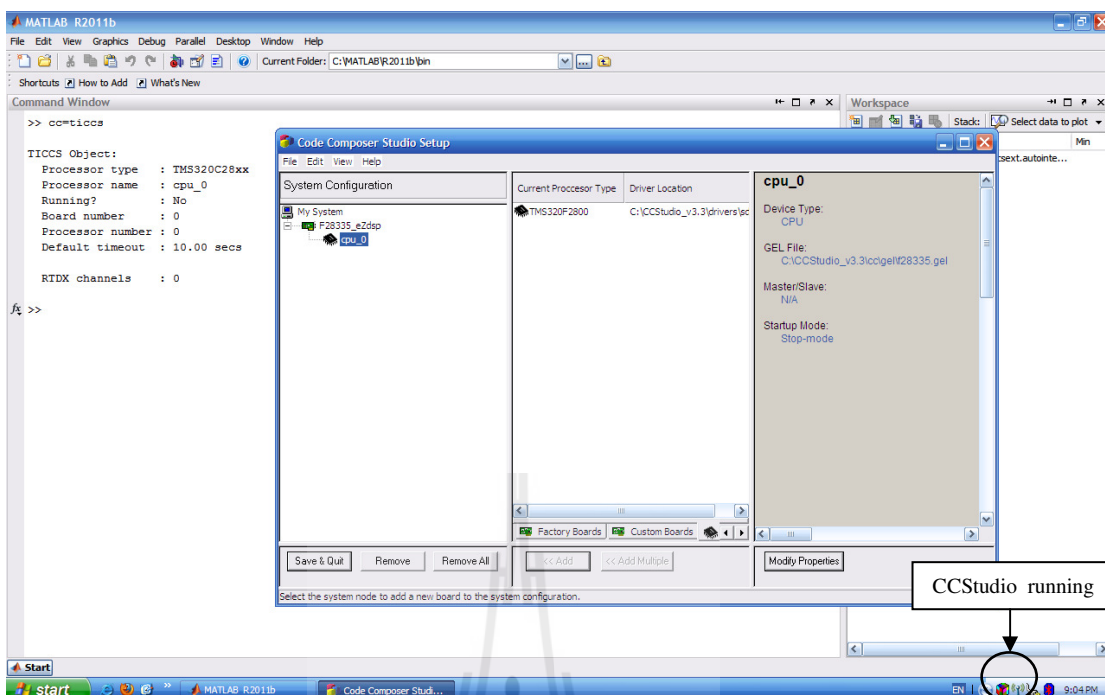
รูปที่ 6.1 แผนภาพการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335

### 6.2.1 การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp™ F28335

การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 จะต้องดำเนินการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ก่อน โดยลำดับแรก คือ การติดตั้งซอฟต์แวร์ MATLAB และโปรแกรม CCStudio v3.3 โดยซอฟต์แวร์ MATLAB ที่สามารถทำงานเชื่อมโยงกับบอร์ด eZdsp™ F28335 คือ ซอฟต์แวร์ MATLAB เวอร์ชันปี 2011 ขึ้นไป เมื่อทำการติดตั้งซอฟต์แวร์ MATLAB และโปรแกรม CCStudio v3.3 จะปรากฏไอคอนการเข้าใช้งานแสดงดังรูปที่ 6.2 โดยโปรแกรม CCStudio v3.3 จะปรากฏไอคอน Setup CCStudio v3.3 สำหรับใช้กำหนดคุณสมบัติของบอร์ด eZdsp™ F28335 (หมายเหตุ: โปรแกรม CCStudio v3.3 รองรับเฉพาะระบบปฏิบัติการ Windows XP และ Windows Vista เท่านั้น)



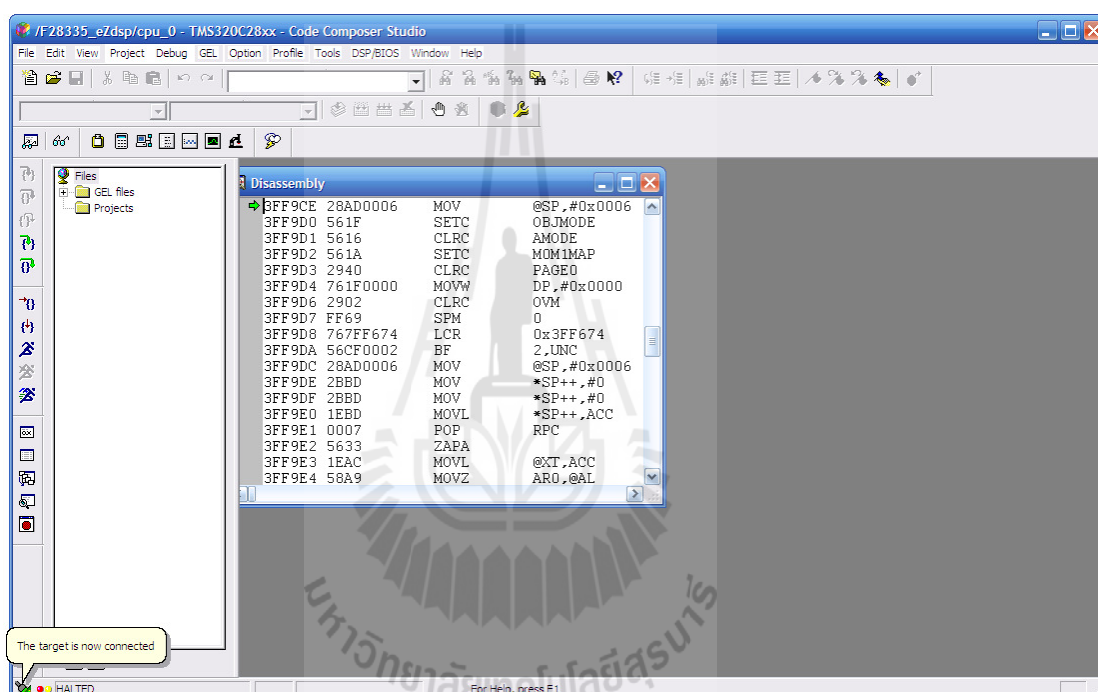
รูปที่ 6.2 ไอคอนการเข้าใช้งานซอฟต์แวร์ MATLAB และโปรแกรม CCStudio v3.3



รูปที่ 6.3 การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp™ F28335

การดำเนินการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp™ F28335 สามารถทำได้โดยการคีย์คำสั่ง `cc = ticcs` บนหน้าต่าง Command Window ของซอฟต์แวร์ MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 6.3 (ก่อนคีย์คำสั่ง `cc = ticcs` จะต้องทำการเชื่อมต่อบอร์ด eZdsp™ F28335 เข้ากับคอมพิวเตอร์ทางพอร์ต USB และต้องปิดหน้าต่างโปรแกรม CCStudio v.3 ด้วยทุกครั้ง) จากรูปที่ 6.3 หลังการคีย์คำสั่ง `cc = ticcs` จะปรากฏไอคอนของโปรแกรม CCStudio v.3 ทำงานอยู่ที่แถบด้านล่างของระบบปฏิบัติการ window (taskbar) ในเวลาเดียวกันที่หน้าต่าง Command Window ของซอฟต์แวร์ MATLAB จะแสดงรายละเอียดของบอร์ด eZdsp™ F28335 ที่เชื่อมต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ ในขณะนั้น ได้แก่ ชนิด-องตัวประมวลผล คือ TMS320C28xx (Processor type: TMS320C28xx) ชื่อของตัวประมวลผล คือ 0 (Processor name: 0) หมายเลขของบอร์ด eZdsp™ F28335 คือ cpu\_0 (Board number: cpu\_0) และหมายเลขของตัวประมวลผล คือ 0 (Processor number: 0) เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดที่แสดงดังกล่าวได้ถูกกำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต โดยสามารถตรวจสอบและปรับแก้ไขได้จากโปรแกรม Setup CCStudio v.3 ดังแสดงหน้าต่างโปรแกรมในรูปที่ 6.3 นอกจากนี้ หน้าต่าง Command Window ยังแสดงรายละเอียดค่าเริ่มต้นการใช้งานเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ได้แก่ สถานะการทำงานของโปรแกรม Simulink ในขณะนั้น คือ โปรแกรมไม่ได้ทำงาน (Running?: No) เวลาสำหรับการจำลองสถานการณ์ โดยปกติจะเท่ากับ 10 s (default

timeout: 10.00 secs) และจำนวนช่องสื่อสารแบบ RTDX ที่ใช้รับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ในขณะนั้น เท่ากับ 0 ช่อง (RTDX channels: 0) จากการอธิบายข้างต้น ขณะนี้ซอฟต์แวร์ MATLAB ได้เชื่อมโยงกับบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางโปรแกรม CCStudio v3.3 เป็นผลสำเร็จแล้ว และสามารถเปิดใช้งาน โปรแกรม CCStudio v3.3 สำหรับใช้สร้างไฟล์โปรเจกต์งานต่อไป หน้าต่างของโปรแกรม CCStudio v3.3 แสดงได้ดังรูปที่ 6.4 หลังจากเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp™ F28335 แล้ว ลำดับต่อไป คือ การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ซึ่งมีรายละเอียดดังหัวข้อ 6.6.2



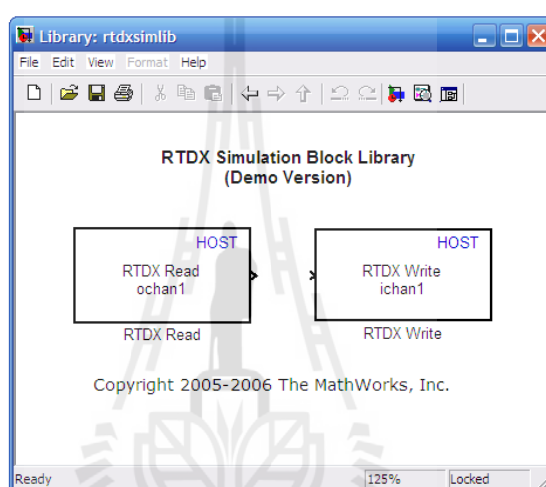
รูปที่ 6.4 หน้าต่าง โปรแกรม CCStudio v3.3

## 6.2.2 การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335

การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 สำหรับสร้างระบบจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX และการกำหนดค่าพารามิเตอร์โปรแกรม Simulink สำหรับการเชื่อมโยงกับบอร์ด eZdsp™ F28335 ดังนี้

### การรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX

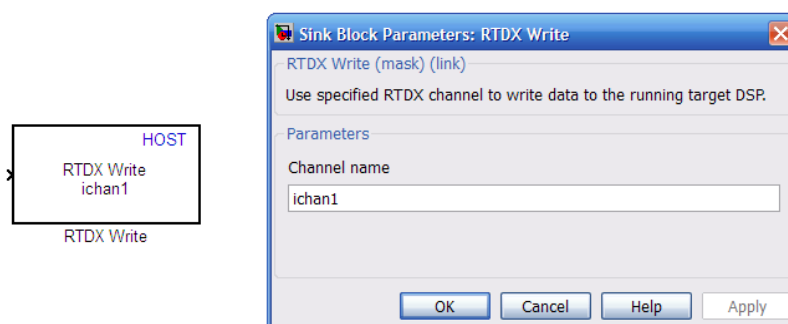
การสื่อสารรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 สามารถแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ การส่งข้อมูลจากโปรแกรม Simulink ไปยังบอร์ด eZdsp™ F28335 การรับข้อมูลของโปรแกรม Simulink จากบอร์ด eZdsp™ F28335 การส่งข้อมูลจากบอร์ด eZdsp™ F28335 มายังโปรแกรม Simulink และการรับข้อมูลของบอร์ด eZdsp™ F28335 จากโปรแกรม Simulink ซึ่งในแต่ละกรณีสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 6.5 บล็อก RTDX Read และ RTDX Write ภายในไลบรารี RTDX simulation block

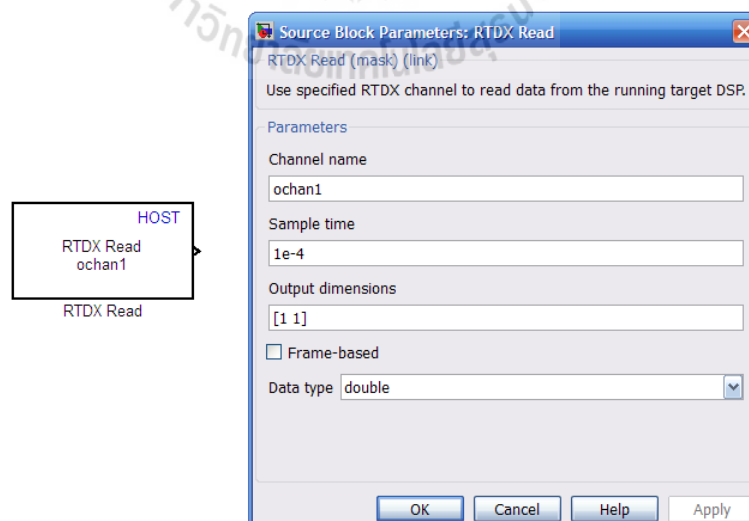
กรณีที่ 1 การส่งข้อมูลจากโปรแกรม Simulink ไปยังบอร์ด eZdsp™ F28335 สามารถทำได้โดยใช้บล็อกอินพุต RTDX Write ที่สามารถเรียกใช้ได้จากไลบรารี RTDX simulation block ดังรูปที่ 6.5 ซึ่งเป็นไลบรารีแบบทดลองใช้งาน (demo version) และยังไม่ได้ถูกบรรจุในไลบรารีของ Simulink แต่จะพบอยู่ในบล็อกเครื่องมือภายในซอฟต์แวร์ MATLAB (MATLAB\R2011b\toolbox\idmlink\extensions\ticcs\ccslinkblks\rtdxsimblks) การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกอินพุต RTDX Write มีเพียงชื่อของช่องอินพุต (Channel name) ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างการกำหนดชื่อของช่องอินพุตสำหรับระบบการทดสอบรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX (ระบบ RTDXTest) คือ Channel name: ichan1 แสดงได้ดังรูปที่ 6.6 (รายละเอียดของระบบ RTDXTest สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 6.3)





รูปที่ 6.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกอินพุต RTDX Write

กรณีที่ 2 การรับข้อมูลของโปรแกรม Simulink จากบอร์ด eZdsp™F28335 สามารถทำได้โดยการใส่บล็อกเอาต์พุต RTDX Read ซึ่งอยู่ในไลบรารี RTDX simulation block เช่นเดียวกับบล็อกอินพุต RTDX Write ดังแสดงในรูปที่ 6.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกเอาต์พุต RTDX Read ได้แก่ ชื่อของช่องเอาต์พุต (Channel name) ช่วงเวลาในการชักตัวอย่างสำหรับการรับข้อมูล (Sample time) ขนาดของข้อมูลที่ส่งมาจากบอร์ด eZdsp™F28335 (Output dimensions) และชนิดของข้อมูล (Data type) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.7 ที่เป็นการยกตัวอย่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าว สำหรับระบบ RTDXTest คือ Channel name: ochan1 Sample time: 1e-4 (100µs) Output dimensions: [1 1] และ Data type: double (double คือ ชนิดข้อมูลแบบตัวเลขทศนิยมละเอียด (float))



รูปที่ 6.7 การกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกเอาต์พุต RTDX Read

กรณีที่ 3 การส่งข้อมูลจากบอร์ด eZdsp™F28335 มายังโปรแกรม Simulink สามารถทำได้โดยการใช้ฟังก์ชันชุดคำสั่งภาษาซีบนโปรแกรม CCStudio v3.3 ดังนี้

1. RTDX\_CreateOutputChannel(ochan1);
2. RTDX\_enableOutput(&ochan1);
3. RTDX\_write( &ochan1, dout1, nbuf\* sizeof(long) );

โดยบรรทัดที่ 1 คือ ฟังก์ชันคำสั่งการกำหนดสร้างช่องเอาต์พุต RTDX สำหรับใช้ส่งข้อมูลมายังโปรแกรม Simulink โดยชื่อของช่องเอาต์พุตที่อยู่ในวงเล็บของฟังก์ชันคำสั่งดังกล่าวจะต้องกำหนดให้เหมือนกับชื่อของช่องการรับข้อมูลของโปรแกรม Simulink ในกรณีที่ 2 คือ ochan1 ส่วนบรรทัดที่ 2 คือ ฟังก์ชันคำสั่งเปิดใช้งานช่องเอาต์พุต RTDX ที่ชื่อ ochan1 สำหรับใช้ส่งข้อมูลมายังโปรแกรม Simulink และบรรทัดที่ 3 คือ ฟังก์ชันคำสั่งเขียนส่งข้อมูลมายังโปรแกรม Simulink ผ่านทางช่องเอาต์พุต RTDX ที่ชื่อ ochan1 โดยจะต้องกำหนดค่าข้อมูล ขนาดของข้อมูล และชนิดของข้อมูลในวงเล็บของฟังก์ชันคำสั่งดังกล่าว ยกตัวอย่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบ RTDXTest คือ ค่าข้อมูลเท่ากับตัวแปร dout1 ที่มีขนาดของข้อมูลเท่ากับ nbuf (ค่า nbuf สำหรับระบบ RTDXTest มีค่าเท่ากับ 1) และชนิดของข้อมูลแบบ long  
หมายเหตุ: ชนิดของข้อมูลแบบ long สำหรับข้อมูลที่มีขนาด 32 และ 64 บิต เช่น int32 single และ double ส่วนชนิดของข้อมูลแบบ short สำหรับข้อมูลที่มีขนาด 8 และ 16 บิต เช่น int8 และ int16

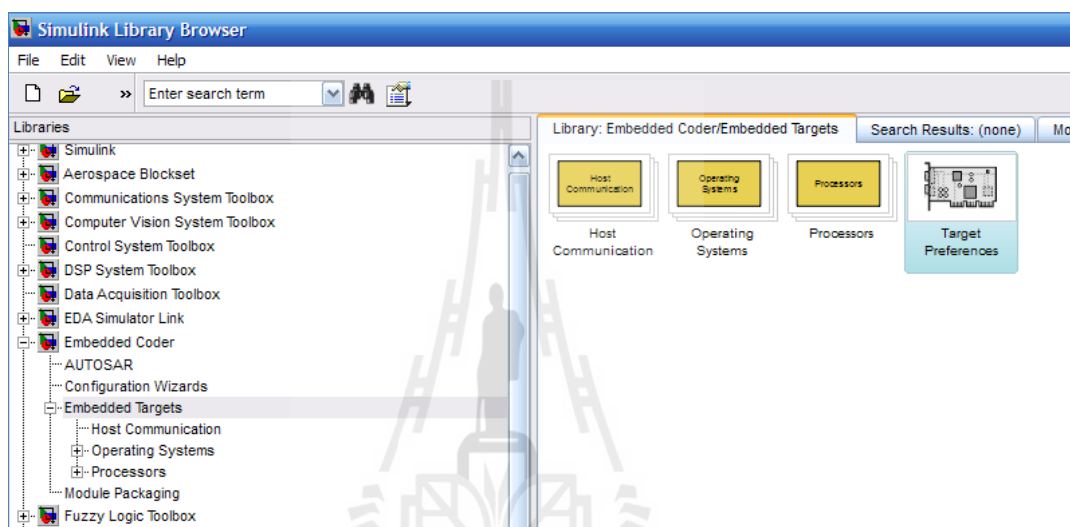
กรณีที่ 4 การรับข้อมูลของบอร์ด eZdsp™F28335 จากโปรแกรม Simulink ทำได้โดยการใช้ฟังก์ชันชุดคำสั่งภาษาซีบนโปรแกรม CCStudio v3.3 ดังนี้

1. RTDX\_CreateInputChannel (ichan1);
2. RTDX\_enableInput (&ichan1);
3. RTDX\_read( &ichan1, din1, nbuf\* sizeof(long) );

บรรทัดที่ 1 คือ ฟังก์ชันคำสั่งการกำหนดสร้างช่องอินพุต RTDX สำหรับใช้รับข้อมูลจากโปรแกรม Simulink โดยจะต้องกำหนดชื่อของช่องอินพุตให้เหมือนกับชื่อของช่องการส่งข้อมูลของโปรแกรม Simulink ซึ่งได้กำหนดไว้แล้วในกรณีที่ 1 คือ ichan1 บรรทัดที่ 2 คือ ฟังก์ชันคำสั่งเปิดใช้งานช่องอินพุต RTDX ที่ชื่อ ichan1 สำหรับใช้รับข้อมูลจากโปรแกรม Simulink และบรรทัดที่ 3 คือ ฟังก์ชันคำสั่งอ่านข้อมูลที่รับมาจากช่องอินพุต RTDX ที่ชื่อ ichan1 ยกตัวอย่างสำหรับระบบ RTDXTest การรับข้อมูลจากโปรแกรม Simulink กำหนดให้เก็บไว้ที่ตัวแปร din1 ที่มีขนาดของข้อมูลเท่ากับ nbuf (ค่า nbuf ในกรณีนี้จะต้องกำหนดให้มีค่าเท่ากับขนาดของข้อมูลที่ส่งมาโดยโปรแกรม Simulink ซึ่งสำหรับระบบ RTDXTest ค่า nbuf มีค่าเท่ากับ 1) และชนิดของข้อมูลแบบ long

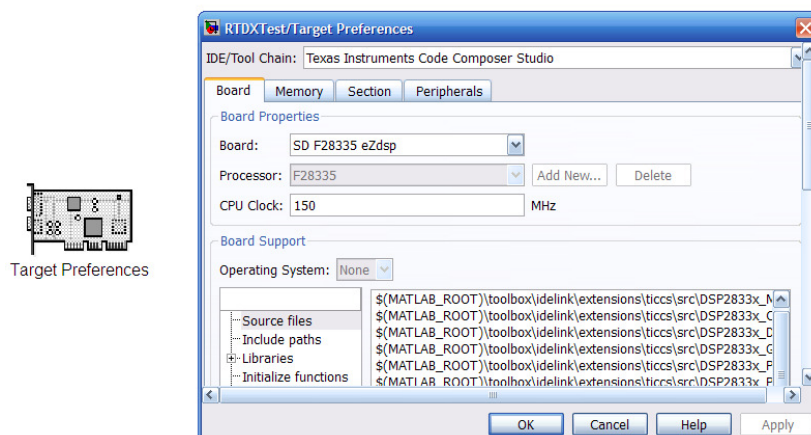
## การกำหนดค่าพารามิเตอร์โปรแกรม Simulink สำหรับการเชื่อมโยง กับบอร์ด eZdsp™ F28335

การกำหนดค่าพารามิเตอร์โปรแกรม Simulink เพื่อให้สามารถเชื่อมโยงกับบอร์ด eZdsp™ F28335 จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของบอร์ด eZdsp™ F28335 (target preference) และกลุ่มค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (simulation configuration parameters) ดังนี้



รูปที่ 6.8 บล็อก Target Preferences ในไลบรารี Simulink

กลุ่มพารามิเตอร์ที่ 1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของบอร์ด eZdsp™ F28335 ในโปรแกรม Simulink สามารถทำได้โดยการใช้บล็อก Target Preference ที่อยู่ใน Embedded Targets ของไลบรารี Simulink ดังแสดงในรูปที่ 6.8 โดยเมื่อทำการเปิดหน้าต่างของบล็อก Target Preference จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.9 จากรูปดังกล่าว ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของบอร์ด (Board properties) ที่ต้องทำการกำหนด คือ รุ่นของบอร์ด DSP ที่ใช้เชื่อมโยงกับโปรแกรม Simulink ดังนั้น จึงกำหนดให้ Broad: SD F28335 eZdsp (สำหรับบอร์ด eZdsp™ F28335) โดยหลังจากกำหนดรุ่นของบอร์ดแล้ว หน้าต่างของบล็อก Target Preference จะปรากฏคุณสมบัติต่าง ๆ ของบอร์ด eZdsp™ F28335 แบบอัตโนมัติ ได้แก่ Processer: F28335 และ CPU clock: 150 MHz เป็นต้น

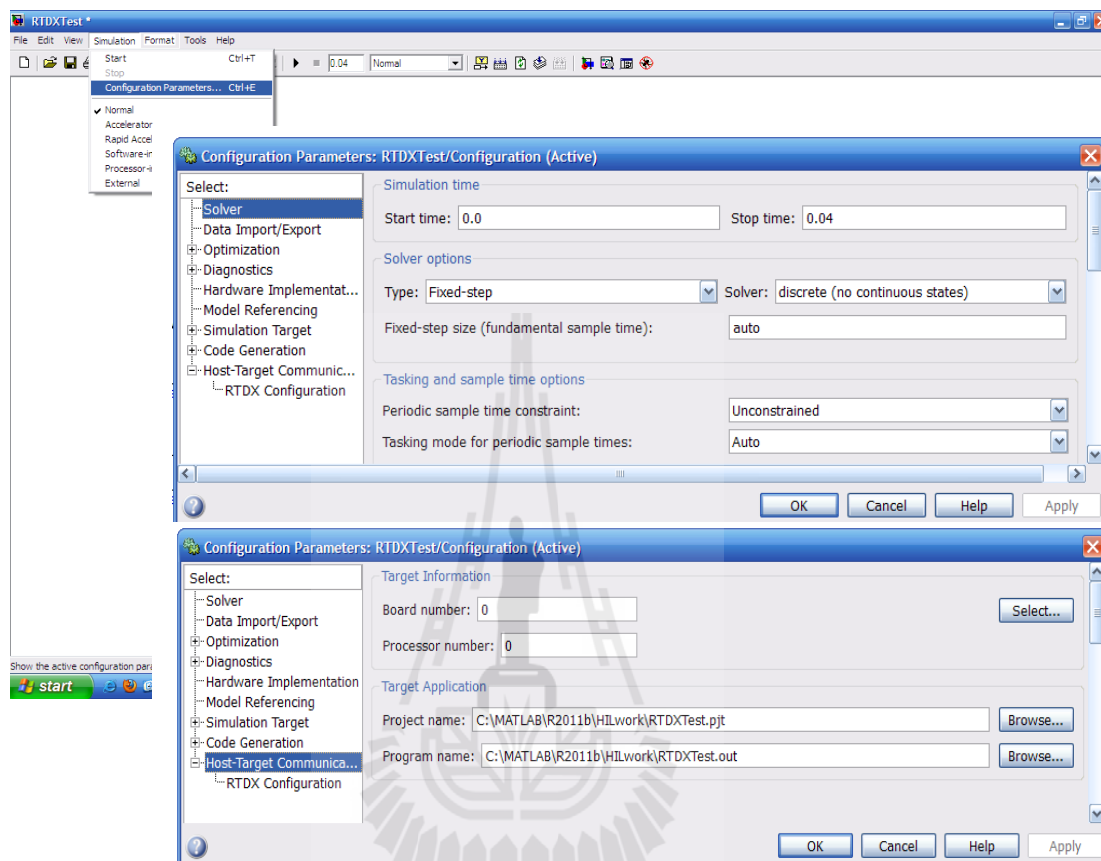


รูปที่ 6.9 การกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อก Target Preferences

กลุ่มพารามิเตอร์ที่ 2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของโปรแกรม Simulink สามารถกำหนดได้จากหน้าต่าง Configuration Parameters ของระบบจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปบนโปรแกรม Simulink ตัวอย่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบ RTDXTest แสดงได้ดังรูปที่ 6.10 จากรูปดังกล่าว ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหาผลเฉลยของการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป (Solver) ได้แก่ เวลาในการจำลองสถานการณ์ (Simulation time) และรูปแบบการหาค่าผลเฉลย (Solver option) โดยสำหรับระบบ RTDXTest จะกำหนดให้เวลาในการจำลองสถานการณ์ คือ start time: 0 (0 s) และ stop time: 0.04 (0.04 s) ส่วนรูปแบบการหาค่าผลเฉลย คือ Solver: discrete และ Type: Fixed-step นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมโยงระหว่างโปรแกรม Simulink ของบอร์ด eZdsp™ F28335 (Host-Target Communication) ได้แก่ ข้อมูลของบอร์ด (Target information) และการประยุกต์ใช้งานร่วมกับบอร์ด (Target application) โดยการกำหนดข้อมูลของบอร์ดจะต้องกำหนดให้เหมือนกับข้อมูลของบอร์ด eZdsp™ F28335 ตามรูปที่ 3.3 คือ Board number: cpu\_0 และ Processer number: 0 ส่วนการกำหนดข้อมูลการประยุกต์ใช้งานร่วมกับบอร์ด จะต้องกำหนดชื่อที่อยู่ของไฟล์โปรเจกต์ และชื่อที่อยู่ไฟล์โปรแกรมที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม CCStudio v3.3 ตัวอย่างสำหรับระบบ RTDXTest การกำหนดชื่อที่อยู่ไฟล์โปรเจกต์ คือ Project name: C:\MATLAB\2011b\HILwork\RTDXTest.pjt และชื่อที่อยู่ไฟล์โปรแกรม คือ Program name: C:\MATLAB\2011b\HILwork\RTDXTest.out ดังแสดงในรูปที่ 6.10

จากการอธิบายเทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้โปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ทั้งหมดข้างต้น ลำดับต่อไป คือ การทดสอบการจำลองสถานการณ์แบบ

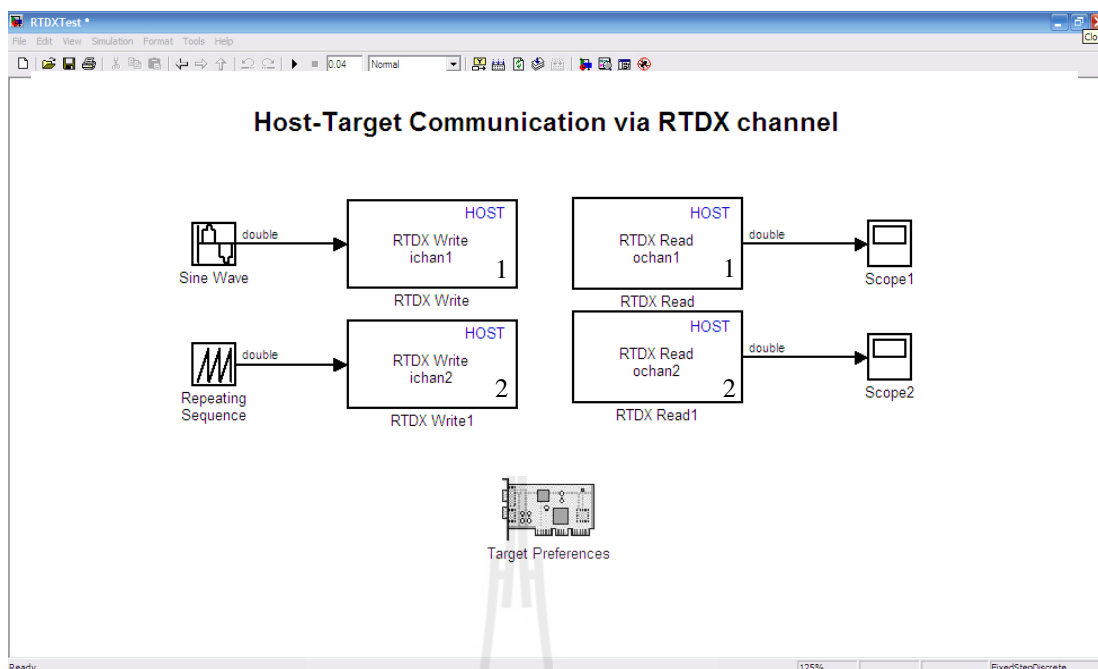
ฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบ RTDXTest รายละเอียดการทดสอบจำลองสถานการณ์ดังกล่าวสามารถดูได้จากหัวข้อถัดไป



รูปที่ 6.10 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของโปรแกรม Simulink

### 6.3 การทดสอบจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป

จากการอธิบายเทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปในหัวข้อที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการทดสอบจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบการทดสอบรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX หรือระบบ RTDXTest ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.11 ระบบดังกล่าวผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้กำหนดให้โปรแกรม Simulink ส่งข้อมูลรูปสัญญาณไซน์ (sine wave) และข้อมูลรูปสัญญาณสามเหลี่ยม (sawtooth wave) ไปยังบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องอินพุต RTDX ที่ชื่อ ichan1 (บล็อกรับอินพุต RTDX Write ที่ 1) และ ichan2 (บล็อกรับอินพุต RTDX Write ที่ 2) ตามลำดับ จากนั้น



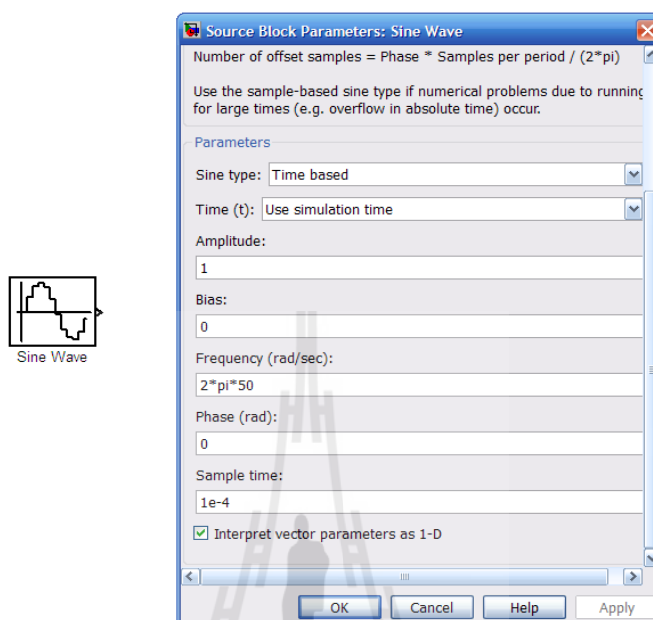
รูปที่ 6.11 ระบบ RTDXTest

จะกำหนดให้บอร์ด eZdsp™ F28335 รับข้อมูลดังกล่าว และส่งกลับไปที่โปรแกรม Simulink ผ่านทางช่องเอาต์พุต RTDX ชื่อ ochan1 (บล็อกเอาต์พุต RTDX Read ที่ 1) และ ochan2 (บล็อกเอาต์พุต RTDX Read ที่ 2) โดยไม่มีการปรับเปลี่ยนข้อมูล การตรวจสอบผลการรับส่งข้อมูลดังกล่าวจะใช้บล็อกสโคปตรวจวัดรูปสัญญาณในโปรแกรม Simulink โดยถ้าการรับส่งข้อมูลของระบบ RTDXTest มีความถูกต้อง บล็อกสโคปจะต้องแสดงผลการตรวจวัดได้รูปสัญญาณไซน์ และรูปสัญญาณสามเหลี่ยม ที่มีขนาดและค่าความถี่ตามที่กำหนด ดังนี้

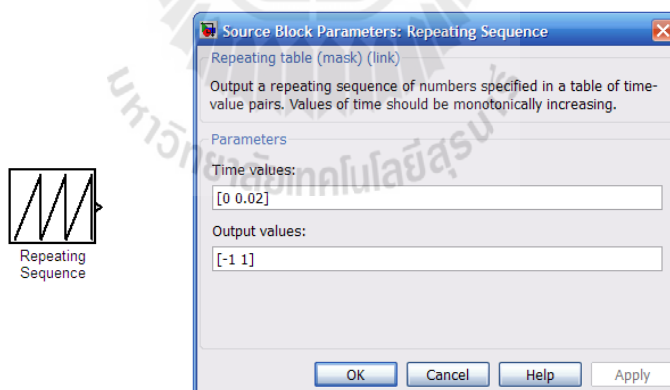
การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอินพุตรูปสัญญาณไซน์ และรูปสัญญาณสามเหลี่ยม แสดงได้ดังรูปที่ 6.12 และ 6.13 ตามลำดับ จากรูปที่ 6.12 กำหนดให้รูปสัญญาณไซน์มีขนาดแอมพิจูดเท่ากับ 1 A (amplitude: 1) ค่าความถี่เท่ากับ 50 Hz (frequency:  $2\pi \cdot 50$ ) และกำหนดการชักตัวอย่างข้อมูลเท่ากับ 100  $\mu$ s (sample time:  $1e-4$ ) และจากรูปที่ 6.13 กำหนดให้รูปสัญญาณสามเหลี่ยมมีขนาดเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 1 และต่ำสุดเท่ากับ -1 (output value: [-1 1]) และกำหนดให้เวลาหนึ่งคาบของรูปสัญญาณเท่ากับ 0.02 s (time value: 0.02) หรือค่าความถี่เท่ากับ 50 Hz

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกอินพุต RTDX Write ที่ 1 จะกำหนดตามรูปที่ 6.6 คือ Channel name: ichan1 ส่วนบล็อกเอาต์พุต RTDX Read ที่ 1 กำหนดให้มีค่าตามรูปที่ 6.7 คือ Channel name: ochan1 Sample time:  $1e-4$  Output dimensions: [1 1] และ Data type: double สำหรับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกอินพุต RTDX Write ที่ 2 คือ Channel name: ichan2

และบล็อกเอาต์พุต RTDX Read ที่ 2 จะกำหนดเหมือนกับบล็อกเอาต์พุต RTDX Read ที่ 1 ทุกประการ ยกเว้นชื่อของช่องเอาต์พุตที่กำหนดใช้ชื่อ ochan2 (Channel name: ochan2)



รูปที่ 6.12 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกแหล่งจ่ายรูปสัญญาณไซน์



รูปที่ 6.13 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกแหล่งจ่ายรูปสัญญาณสามเหลี่ยม

การกำหนดค่าพารามิเตอร์โปรแกรม Simulink สำหรับการเชื่อมโยงกับบอร์ด eZdsp™ F28335 จะกำหนดตามรูปที่ 6.10 โดยไฟล์โปรเจกต์ RTDXTest.pjt คือ ไฟล์ที่บรรจุโปรแกรมภาษาซีการรับและส่งข้อมูลผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX (RTDXTest.C) ซึ่งสร้างจากโปรแกรม CCSstudio v3.3 แสดงได้ดังรูปที่ 6.14 (การอธิบายโค้ดโปรแกรมภาษาซีของ RTDXTest.C สามารถ



ดูได้จากภาคผนวก ข.) นอกจากนี้ ไฟล์โปรแกรม RTDXTest.out ในรูปที่ 6.10 เกิดจากการสร้างโปรแกรมเอาต์พุต (compile and build) ของไฟล์โปรเจกต์ RTDXTest.pjt ด้วยโปรแกรม CCStudio v3.3 เช่นกัน

```

/* Copyright 2000-2008 The MathWorks, Inc. */
#include "target.h" /* TARGET_INITIALIZE */
#include <stdio.h>
#include <rtdx.h>

void RTDXTest(float*in1, float*in2, float*out1, float*out2);

#define MAX_BUFSIZE 16 /*-- Upper limit on data buffer --*/
/*-- define buffers, leave uninitialized, to be supplied by MATLAB --*/

float din1[MAX_BUFSIZE];
float din2[MAX_BUFSIZE];
float dout1[MAX_BUFSIZE];
float dout2[MAX_BUFSIZE];

/*-- defines actual size, must be less than limit --*/

int nbuf = 1;

/*-- defines RTDX channels --*/

RTDX_CreateInputChannel (ichan1); /* Channel from which to receive filter input */

```

```

[RTDXTest.c] "C:\CCStudio_v3.3\C2000\egtools\bin\cl2000" -g -q -fr"Debug" -i"C:\MATLAB\R2011b\toolbox\idmlink\extensions\ticcs/ccsdemos/sha
[Linking...] "C:\CCStudio_v3.3\C2000\egtools\bin\cl2000" -@"Debug.lkf"
<Linking>
Build Complete,
0 Errors, 0 Warnings, 0 Remarks.

```

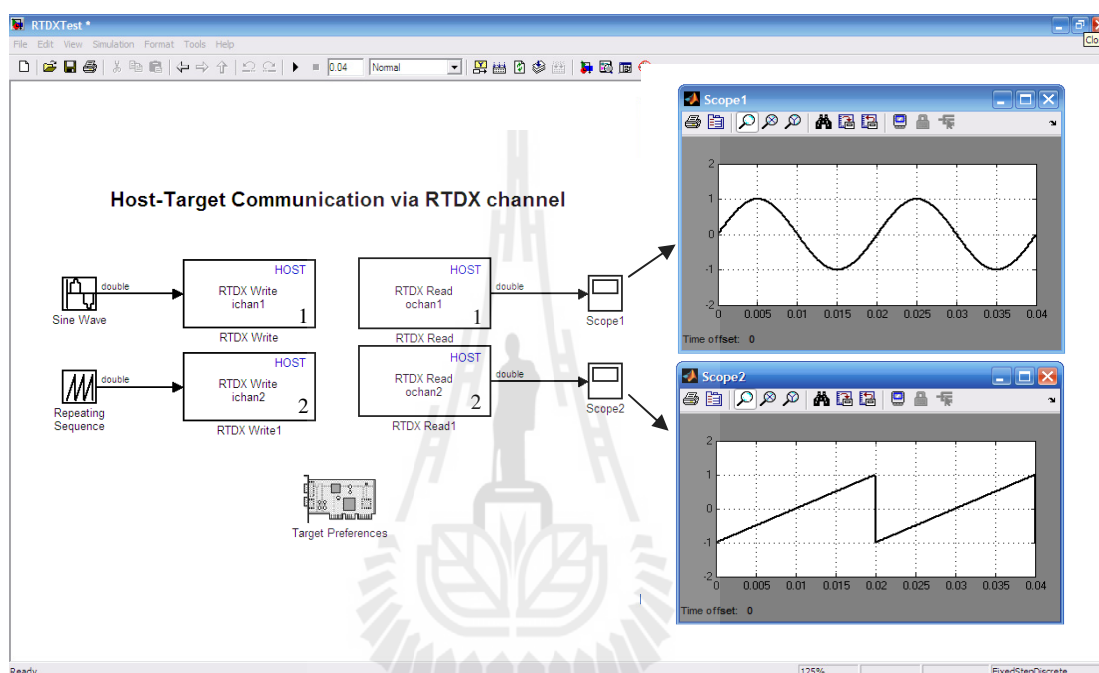
รูปที่ 6.14 โปรเจกต์ RTDXTest ที่สร้างจากโปรแกรม CCStudio v3.3



รูปที่ 6.15 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ระหว่างคอมพิวเตอร์โปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335



จากการอธิบายระบบ RTDXTTest ข้างต้น การทดสอบการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบดังกล่าว สามารถแสดงการเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ระหว่างคอมพิวเตอร์โปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ได้ดังรูปที่ 6.15 และผลการจำลองสถานการณ์ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.04 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบ RTDXTTest

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.16 สังเกตได้ว่า บล็อกสโคปตัวที่ 1 (Scope1) แสดงผลข้อมูลที่ได้จากบล็อกเอาต์พุต RTDX Read ที่ 1 คือ รูปสัญญาณไซน์ที่มีขนาดแอมพลิจูดเท่ากับ 1 และมีค่าความถี่เท่ากับ 50 Hz ส่วนบล็อกสโคปตัวที่ 2 (Scope2) แสดงผลข้อมูลที่ได้จากบล็อกเอาต์พุต RTDX Read ที่ 2 คือ รูปสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1 และต่ำสุดเท่ากับ -1 และมีค่าความถี่เท่ากับ 50 Hz ซึ่งตรงตามการกำหนดค่าพารามิเตอร์อินพุตการทดสอบทั้งสองรูปสัญญาณ จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว หมายความว่า การรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX ของระบบ RTDXTTest มีความถูกต้อง ซึ่งเทคนิคการรับส่งข้อมูลในระบบทดสอบดังกล่าว ถือเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับนำไปใช้สร้างระบบการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้เทคนิคการรับส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม

Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX สำหรับการสร้างระบบการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบฮาร์ดแวร์ในลูป ซึ่งสามารถดูได้ในบทต่อไป

#### 6.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอ เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด eZdsp™ F28335 เทคนิคการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว จะให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบฮาร์ดแวร์จริงมากกว่าการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งหมด นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบสมรรถนะของระบบควบคุมและตัวควบคุมที่ออกแบบหรือพัฒนาขึ้นใหม่ก่อนการดำเนินการสร้างฮาร์ดแวร์จริง ซึ่งจะช่วยป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบที่พิจารณาได้ การทดสอบจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปของระบบการทดสอบรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX ให้ผลการจำลองสถานการณ์ คือ ระบบการทดสอบสามารถรับและส่งข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ซึ่งเทคนิคการรับและส่งข้อมูลในระบบทดสอบดังกล่าวจะถูกใช้สำหรับการสร้างระบบการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบฮาร์ดแวร์ในลูปในบทต่อไป



## บทที่ 7

### การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyโดยใช้วิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด แบบตามูเชิงปรับตัว

#### 7.1 กล่าวนำ

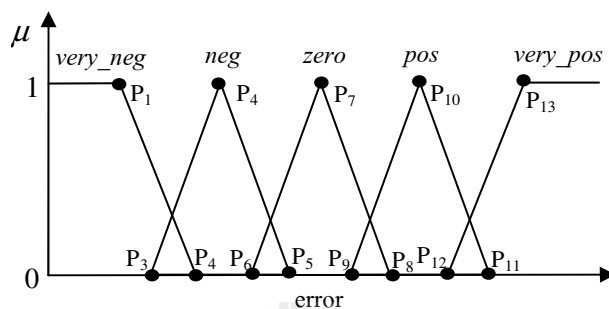
การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว ในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy รวมถึงการพิจารณาออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟใหม่ โดยใช้วิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว โดยมีวัตถุประสงค์การค้นหา คือ ค่าความผิดพลาดระหว่างกระแสชดเชยกับกระแสอ้างอิงจะต้องมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งค่าดังกล่าวจะส่งผลทำให้ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าน้อย รายละเอียดของการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyด้วยวิธีการลองผิดลองถูกจะอธิบายในหัวข้อ 7.2 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว จะนำเสนอในหัวข้อที่ 7.3 และ 7.4 นอกจากนี้การพัฒนาการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยจะนำเสนอในหัวข้อที่ 7.5 และ 7.6 ตามลำดับ

#### 7.2 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyด้วย

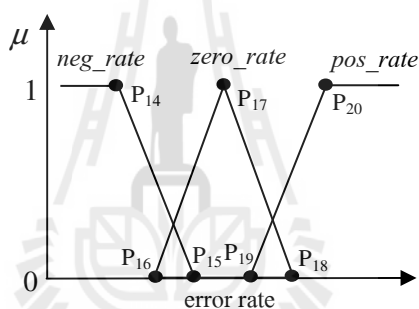
##### วิธีการลองผิดลองถูก

ในบทที่ผ่านมา ผู้วิจัยได้ออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ คือ ตัวควบคุมฟuzzyที่ใช้การอนุมานฟuzzyแบบ Sugeno ที่มีรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกอินพุต error และ error rate แบบฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ส่วนฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต voltage ใช้ฟังก์ชันเส้นตรงโทน นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบใช้ค่าเชิงภาษาของอินพุต error จำนวน 5 ค่าเชิงภาษา คือ “very\_neg” “neg” “zero” “pos” และ “very\_pos” อินพุต error rate ใช้ 3 ค่าเชิงภาษา คือ “neg\_rate” “zero\_rate” และ “pos\_rate” และเอาต์พุต voltage ใช้ 5 ค่าเชิงภาษา คือ “very\_dec” “dec” “cons” “inc” และ “very\_inc” จากโครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzyที่ได้

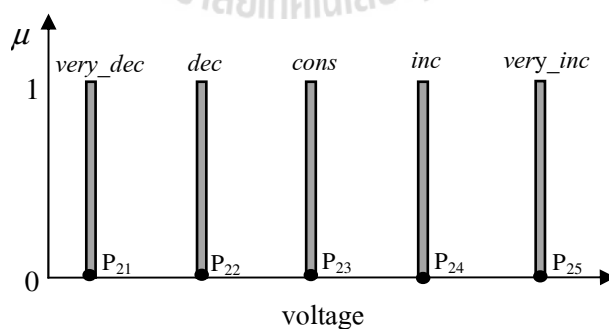
กล่าวข้างต้น สามารถกำหนดตำแหน่ง (Position: P) ฟังก์ชันสมาชิกต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 7.1 ถึง 7.3 ดังนี้



รูปที่ 7.1 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error



รูปที่ 7.2 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate



รูปที่ 7.3 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage

จากรูปที่ 7.1 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error มีจำนวน 13 ตำแหน่ง คือ P<sub>1</sub> ถึง P<sub>13</sub> และในรูปที่ 7.2 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate มีจำนวน 7 ตำแหน่ง คือ P<sub>14</sub> ถึง P<sub>20</sub>

นอกจากนี้ ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage มีจำนวน 5 ตำแหน่ง คือ  $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$  ดังรูปที่ 7.3 โดยทั้ง 25 ตำแหน่งดังกล่าว ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบการออกแบบด้วยวิธีการลองผิดลองถูก ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบผลของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีที่มีต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ การออกแบบด้วยวิธีการลองผิดลองถูกดังกล่าว จะกำหนดให้ชุดข้อมูลตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกจำนวน 5 ชุดข้อมูล ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.1 ถึง 7.3 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟ (ระบบพิจารณาดังรูปที่ 5.10 ในบทที่ 5) ที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีจากการออกแบบด้วยวิธีการลองผิดลองถูก สามารถแสดงผลค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยได้ดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.1 ชุดข้อมูลตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error จากวิธีการลองผิดลองถูก

ชุดข้อมูล	อินพุต error												
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$
1	-0.27	-0.20	-0.26	-0.12	-0.05	-0.10	0.00	0.15	0.14	0.31	0.79	0.47	0.80
2	-0.33	-0.25	-0.30	-0.19	-0.07	-0.15	0.03	0.05	0.04	0.29	0.32	0.30	0.37
3	-0.22	-0.15	-0.17	-0.12	-0.08	-0.10	-0.02	0.08	0.06	0.10	0.15	0.13	0.20
4	-0.18	-0.10	-0.12	-0.07	-0.03	-0.04	0.01	0.03	0.01	0.13	0.15	0.14	0.19
5	-0.17	-0.10	-0.14	-0.08	-0.03	-0.05	0.00	0.05	0.03	0.08	0.14	0.10	0.17

ตารางที่ 7.2 ชุดข้อมูลตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate จากวิธีการลองผิดลองถูก

ชุดข้อมูล	อินพุต error rate						
	$P_{14}$	$P_{15}$	$P_{16}$	$P_{17}$	$P_{18}$	$P_{19}$	$P_{20}$
1	-2.00	-0.07	-0.13	0.00	1.21	1.19	1.78
2	-1.87	-0.46	-1.17	-0.01	0.45	0.09	0.98
3	-0.10	-0.03	-0.08	0.01	0.09	0.04	0.11
4	-10.52	-2.16	-3.23	0.09	1.23	1.20	3.76
5	-0.55	-0.05	-0.10	0.00	0.10	0.05	0.55

ตารางที่ 7.3 ชุดข้อมูลตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage จากวิธีการลองผิดลองถูก

ชุดข้อมูล	เอาต์พุต voltage				
	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{23}$	$P_{24}$	$P_{25}$
1	-350.00	-250.00	100.00	170.00	450.00
2	-500.00	-95.65	-10.37	78.15	270.50
3	-250.00	-10.00	75.00	200.00	550.00
4	-150.00	-80.00	-40.00	50.00	300.00
5	-190.00	-60.00	0.00	60.00	190.00

ตารางที่ 7.4 ผลการทดสอบการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyด้วยวิธี  
การลองผิดลองถูก

ชุดข้อมูล	ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย			
	เฟส a	เฟส b	เฟส c	ค่าเฉลี่ย
1	3.53%	3.61%	3.57%	3.67%
2	3.00%	2.81%	2.70%	2.84%
3	2.78%	2.67%	2.90%	2.79%
4	2.52%	2.79%	2.46%	2.59%
5	2.45%	2.28%	2.58%	2.44%

จากตารางที่ 7.4 สังเกตได้ว่า ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกทั้ง 5 ชุดข้อมูล มีผลต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ โดยพบว่า ชุดข้อมูลที่ 5 ให้ผลค่า %THD เฉลี่ย (คำนวณ โดยใช้สมการที่ (3.23) ในบทที่ 3) ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 2.44% ซึ่งหมายความว่า ตัวควบคุมฟuzzyที่ใช้ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ตามชุดข้อมูลที่ 5 ให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยดีที่สุดเมื่อเทียบกับ 4 ชุดข้อมูลที่เหลือ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyทั้ง 25 ตำแหน่งมีผลต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชย ดังนั้น จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกดังกล่าวให้มีค่าเหมาะสมที่สุด ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงนำเสนอการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy โดยใช้วิธีการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว รายละเอียดของวิธีการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว และการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy รวมถึงค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว สามารถดูรายละเอียดได้จากหัวข้อที่ 7.3 และ 7.4 ตามลำดับ ดังนี้

### 7.3 การค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว

การค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) คือ วิธีการค้นหาค่าพารามิเตอร์ทางปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligent) ที่พัฒนาจากวิธีการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบตามู (Tabu Search: TS) ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มสมรรถนะการค้นหาค่าพารามิเตอร์ให้ดียิ่งขึ้น แต่ขั้นตอนพื้นฐานของการค้นหาค่าพารามิเตอร์ยังคงใช้ตามวิธี TS เช่นเดิม รายละเอียดของวิธี TS และวิธี ATS สามารถอธิบายได้ดังนี้

#### การค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบตามู

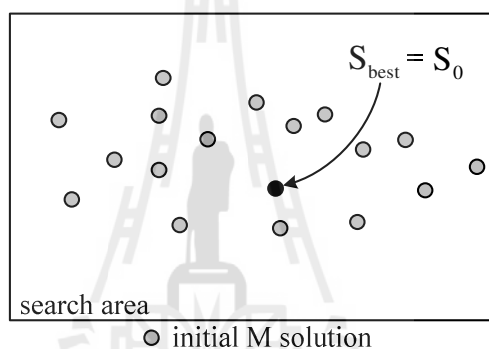
วิธีการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบตามู หรือวิธี TS ถูกคิดค้นโดย Glover ในปี ค.ศ. 1989 (Glover F, 1989, อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) และเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายทางด้านงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ หรือการระบุค่าพารามิเตอร์ของระบบต่าง ๆ วิธี TS สามารถค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (global solution) ได้ โดยอาศัยขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดให้  $count$  คือ จำนวนรอบการค้นหา และ  $count_{max}$  คือ จำนวนรอบการค้นหาสูงสุด

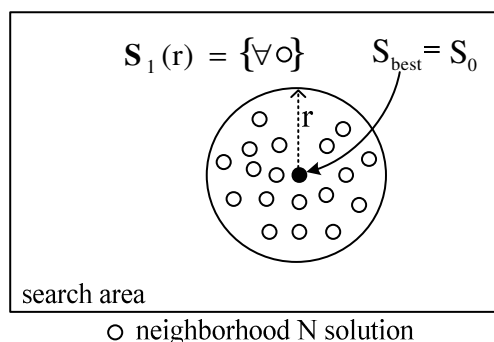
ขั้นที่ 2 ทำการสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหาเริ่มต้นภายในขอบเขตหรือพื้นที่การค้นหา (search area) จำนวน  $M$  คำตอบ และเลือกคำตอบเริ่มต้นที่ดีที่สุด ( $S_0$ ) ในจำนวน  $M$  คำตอบดังกล่าวเพื่อกำหนดให้เป็นค่าคำตอบที่ดีที่สุด ( $S_{best}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 7.4

หมายเหตุ: ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสุ่มจะถูกเปลี่ยนเป็นค่าคำตอบหรือค่าวัตถุประสงค์ ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์การค้นหาค่าพารามิเตอร์



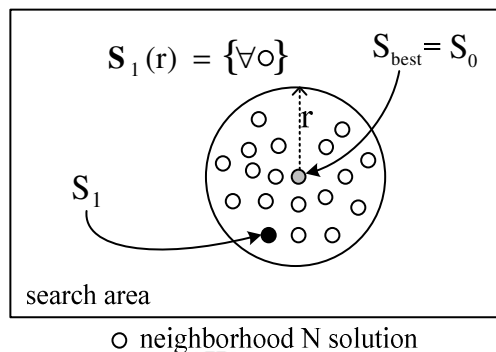
รูปที่ 7.4 การเลือกคำตอบ  $S_0$  และการกำหนดค่า  $S_{best}$

ขั้นที่ 3 ทำการสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหารอบข้างคำตอบ  $S_0$  ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา ( $r$ ) จำนวน  $N$  คำตอบ โดยกำหนดให้  $S_1(r)$  คือ เซตคำตอบรอบข้างจำนวน  $N$  คำตอบ (neighborhood  $N$  solutions) แสดงได้ดังรูปที่ 7.5



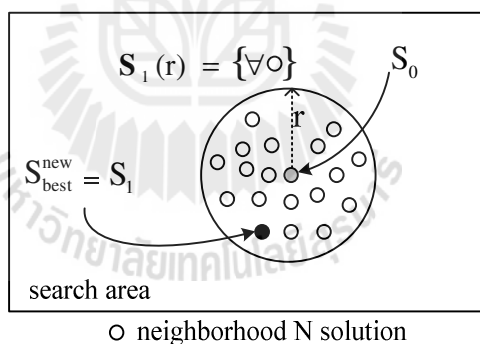
รูปที่ 7.5 คำตอบรอบข้างภายในรัศมีการค้นหา

ขั้นที่ 4 เลือกคำตอบที่ดีที่สุด ( $S_1$ ) ในจำนวนรอบข้าง  $N$  คำตอบ ดังแสดงในรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 การเลือกคำตอบ  $S_1$

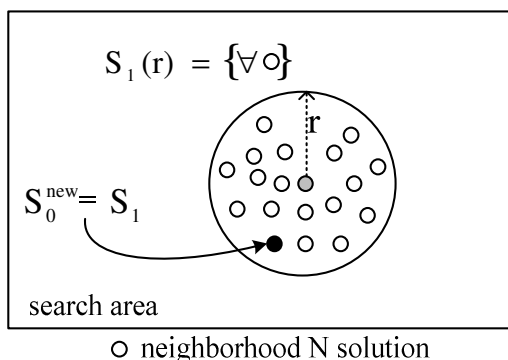
ขั้นที่ 5 ถ้าคำตอบ  $S_1$  ดีกว่าค่า  $S_{best}$  จะกำหนดให้ค่า  $S_{best}$  ค่าใหม่ ( $S_{best}^{new}$ ) เท่ากับค่าคำตอบ  $S_1$  ดังรูปที่ 7.7 (แต่ถ้าคำตอบ  $S_1$  ไม่ดีกว่าค่า  $S_{best}$  จะกำหนดให้ใช้ค่า  $S_{best}$  ค่าเดิม)



รูปที่ 7.7 การกำหนดค่า  $S_{best}^{new}$

ขั้นที่ 6 กำหนดให้คำตอบ  $S_1$  คือ คำตอบ  $S_0$  ค่าใหม่ ( $S_0^{new}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 7.8 (แต่ถ้าในขั้นตอนที่ 5 พบว่า คำคำตอบ  $S_1$  ไม่ดีกว่าค่า  $S_{best}$  จะกำหนดใช้คำตอบ  $S_0$  ค่าเดิม)



รูปที่ 7.8 การกำหนดคำตอบ  $S_0^{new}$ 

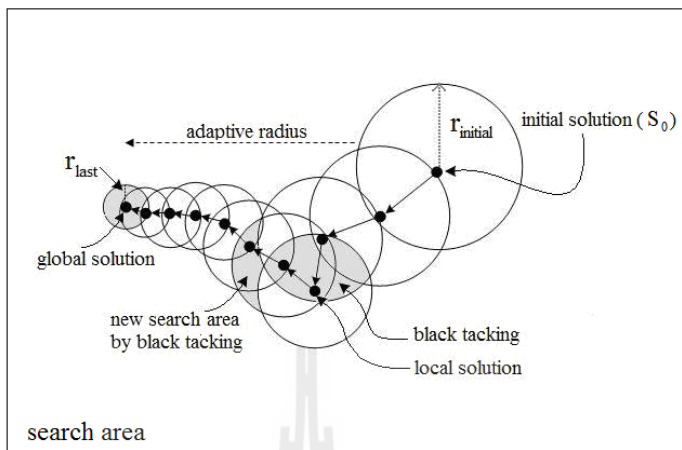
ขั้นที่ 7 ถ้า  $count$  น้อยกว่า  $count_{max}$  ให้กลับไปเริ่มขั้นที่ 3 ใหม่ (โดยกำหนดให้คำตอบ  $S_0$  คือ คำตอบ  $S_0^{new}$  และค่า  $S_{best}$  มีค่าเท่ากับ  $S_{best}^{new}$ ) และทำการค้นหาจนกระทั่งได้คำตอบที่ดีที่สุดแบบใกล้เคียงวงกว้างตามต้องการ แต่ถ้า  $count$  มากกว่า  $count_{max}$  ให้หยุดการค้นหา และใช้คำตอบที่ดีที่สุด ( $S_{best}$ ) ที่ได้จากการค้นหาจำนวน  $count_{max}$  รอบ เป็นคำตอบในการค้นหาครั้งนี้ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่คำตอบที่ดีที่สุดดังกล่าว คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาครั้งนี้ เช่นกัน

#### การค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบตามเชิงปรับตัว

ในปี พ.ศ. 2545 กองพัน อารีรักษ์ และ สรวุฒิ สุจิตจร (กองพัน อารีรักษ์ และ สรวุฒิ สุจิตจร, 2545) ได้นำเสนอวิธีการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบตามเชิงปรับตัว หรือวิธี ATS ที่พัฒนาจากวิธี TS โดยการเพิ่มสองกลไกพิเศษเข้าไปในขั้นตอนการค้นหาของวิธี TS ได้แก่ การเดินย้อนรอย (black tacking) และการปรับค่ารัศมีการค้นหา (adaptive radius) สำหรับกลไกการเดินย้อนรอยคือ ขั้นตอนที่อนุญาตให้การค้นหาสามารถย้อนกลับไปค้นหาบริเวณพื้นที่เดิมที่เคยถูกค้นหามาก่อน ซึ่งอาจจะส่งผลให้มีโอกาสค้นพบคำตอบใหม่ที่ดีกว่าเดิมและหลุดออกจากคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) ได้ ส่วนกลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา คือ ขั้นตอนการปรับลดค่ารัศมี ( $r$ ) ในระหว่างการค้นหาตามสมการที่ (7.1) ทั้งนี้เพื่อกระชับพื้นที่การค้นหาให้แคบลงเมื่อเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง ซึ่งจะส่งผลให้การค้นหาสามารถพบคำตอบได้เร็วขึ้น สำหรับแผนภาพการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี ATS สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.9

$$r_{new} = \frac{r_{old}}{DF} \quad (7.1)$$

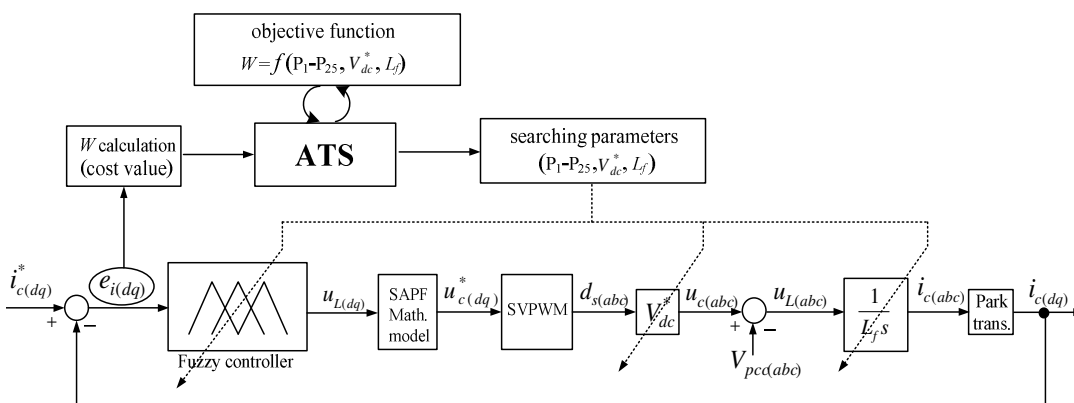
โดยที่ DF คือ ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมี (Decreasing Factor)



รูปที่ 7.9 การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

#### 7.4 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS (เวอร์ชันที่ 1)

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี (25 พารามิเตอร์) รวมถึงการพิจารณาออกแบบค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (2 พารามิเตอร์) ค่าใหม่ที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณาโดยใช้วิธี ATS สามารถแสดงแผนภาพไดอะแกรมการออกแบบค่าพารามิเตอร์ทั้ง 27 พารามิเตอร์ได้ดังรูปที่ 7.10 ดังนี้



รูปที่ 7.10 ไดอะแกรมการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS

จากรูปที่ 7.10 แสดงการนำวิธี ATS ค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี่และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (แสดงเป็นเส้นประ) บนไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยมีวัตถุประสงค์การค้นหา คือ ค่าความผิดพลาด ( $M$ ) ที่น้อยที่สุด รายละเอียดฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับใช้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ทั้ง 27 พารามิเตอร์โดยใช้วิธี ATS ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ดังนี้

#### 7.4.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่และค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) สำหรับใช้ออกแบบหรือค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี่ และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จะอาศัยการคำนวณตามไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิวและแกนสามเฟสร่วมกับเทคนิค SVPWM ตามรูปที่ 7.10 โดยการคำนวณดังกล่าว จะดำเนินการใช้โปรแกรม M-file ของซอฟต์แวร์ MATLAB แทนการใช้โปรแกรม Simulink ทั้งนี้เพื่อลดความซับซ้อนและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ การคำนวณของฟังก์ชันวัตถุประสงค์บนโปรแกรม M-file ดังกล่าว สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

**ขั้นที่ 1** รับอินพุตค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหาทั้ง 27 พารามิเตอร์ คือ ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี่ และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

**ขั้นที่ 2** โหลดข้อมูลค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ จุด PCC ( $V_{pcc,a}, V_{pcc,b}, V_{pcc,c}$ ) ค่ามุมสำหรับการแปลงแกนดีคิว ( $\theta_{pcc}$ ) และรูปสัญญาณสามเหลี่ยม ( $V_{tr}$ ) โดยข้อมูลดังกล่าว ได้จากการจำลองสถานการณ์ระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 5.10 ในบทที่ 5 โดยใช้โปรแกรม Simulink และทำการบันทึกจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบตารางสำหรับการเรียกใช้ข้อมูล

**ขั้นที่ 3** กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในโปรแกรมการคำนวณเท่ากับศูนย์ (สำหรับรอบการคำนวณ  $k=0$ )

**ขั้นที่ 4** คำนวณค่าแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว ( $u_{cd}^*, u_{cq}^*$ ) โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว ตามสมการที่ (4.49) และ (4.50) (ในบทที่ 4) ซึ่งจากสมการดังกล่าว นำมาเขียนใหม่แสดงได้ดังนี้

$$u_{cd}^* = u_{Ld} - \omega i_{cq} + \sqrt{\frac{3}{2}} V_m$$

$$u_{cd}^* = u_{Lq} + \omega i_{cd}$$

โดยที่ค่า  $u_{Ld}$  และ  $u_{Lq}$  คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชี

ขั้นที่ 5 คำนวณค่าฟังก์ชันการสวิตช์บนแกนสามเฟส ( $d_{sa}, d_{sb}, d_{sc}$ ) จากสมการที่ (4.18) (ในบทที่ 4) ร่วมกับผลสถานะการสวิตช์ ( $c_a, c_b, c_c$ ) ที่ได้จากการคำนวณตามเทคนิควิธี SVPWM (รายละเอียดของเทคนิควิธี SVPWM สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 4.5 ในบทที่ 4) สำหรับสมการที่ (4.18) ดังกล่าว สามารถเขียนแสดงใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} d_{sa} \\ d_{sb} \\ d_{sc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_a \\ c_b \\ c_c \end{bmatrix}$$

ขั้นที่ 6 คำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรกรองกำลังแอททิฟบนแกนสามเฟส ( $u_{ca}, u_{cb}, u_{cc}$ ) โดยใช้สมการที่ (7.2)

$$\begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} = V_{dc}^* \begin{bmatrix} d_{sa} \\ d_{sb} \\ d_{sc} \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

ขั้นที่ 7 คำนวณค่ากระแสชดเชยบนแกนสามเฟส ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ ) โดยอาศัยสมการที่ (4.17) (ในบทที่ 4) จากสมการดังกล่าว เมื่อนำมาเขียนแสดงใหม่โดยการกำหนดให้  $R_f$  มีค่าเท่ากับ ศูนย์ จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (7.3) ดังนี้

$$\frac{di_{ck}}{dt} = \frac{1}{L_f} d_{sk} V_{dc}^* - \frac{1}{L_f} V_{pcc,k} \quad ; k = a, b, c \quad (7.3)$$

จากสมการที่ (7.3) สามารถประมาณการคำนวณหาค่า  $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$  และ  $i_{cc}$  ด้วยวิธีการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference) แบบถอยหลัง (backward) แสดงได้ดังสมการที่ (7.4)

$$i_{ck}(x) = \Delta t \times \left( \frac{d_{sk}(x) V_{dc}^* - V_{pcc,k}(x)}{L_f} \right) + i_{ck}(x-1) \quad ; k = a, b, c \quad (7.4)$$

โดยที่  $\Delta t$  คือ ช่วงเวลาในการชักตัวอย่าง (sampling time) ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้ค่า  $\Delta t$  เท่ากับ  $1e-5$  วินาที ดังนั้น การคำนวณค่ากระแสชดเชยในหนึ่งคาบจะต้องใช้จำนวนข้อมูลเท่ากับ 2000 ค่า ( $k_{max} = 2000$ )

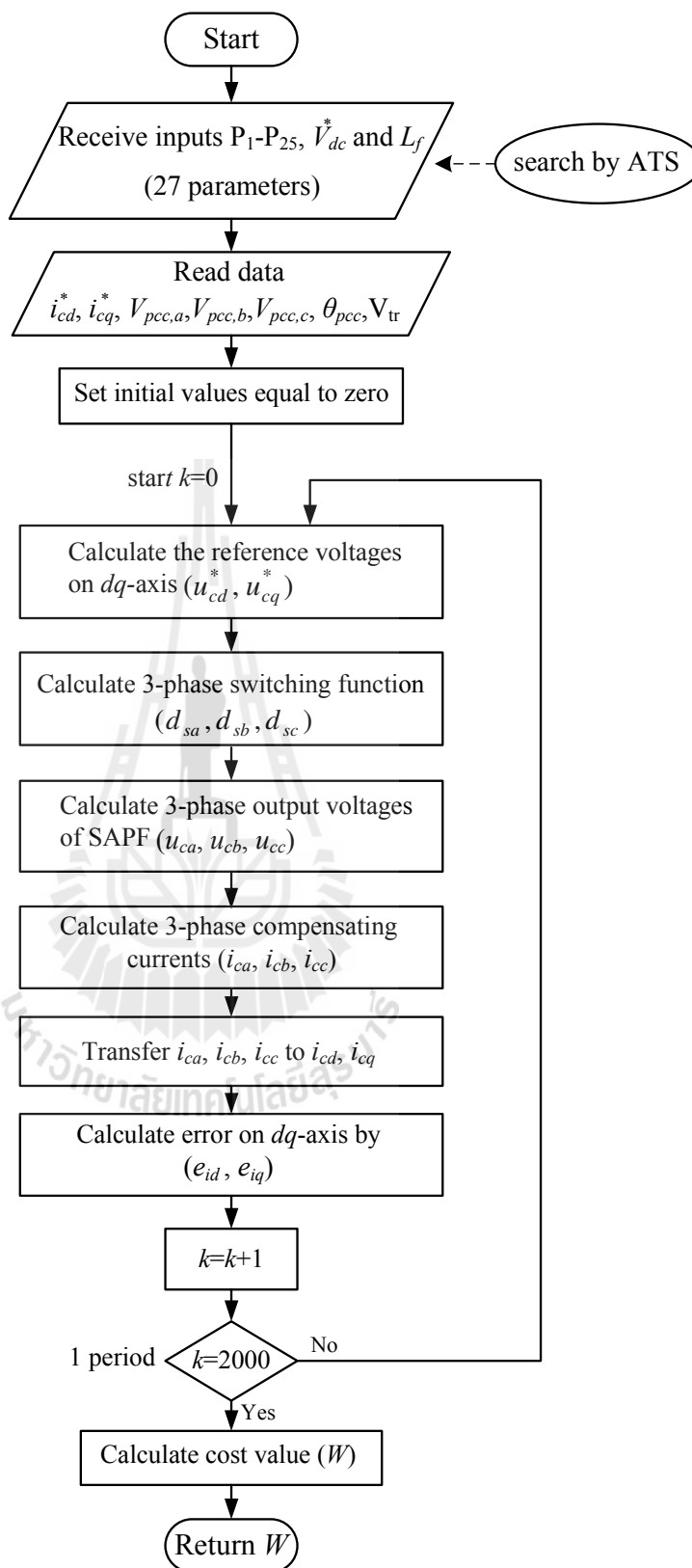
ขั้นที่ 8 จำนวนแปลงแกนค่ากระแสชดเชยบนแกนสามเฟสกลับไปอยู่บนแกนดีควิ ( $i_{cd}, i_{cd}$ ) โดยใช้สมการที่ (4.25) (ในบทที่ 4)

ขั้นที่ 9 จำนวนค่าวัตถุประสงค้การค้นหาค่า  $W$  โดยใช้สมการที่ (7.5) ดังนี้

$$W = \sqrt{\frac{e_{id}^2 + e_{iq}^2}{2}} \quad (7.5)$$

$$\text{โดยที่ค่า } e_{id} = \frac{\sum_{k=0}^{2000} (e_{id}(k))^2}{2001} \quad \text{และ } e_{iq} = \frac{\sum_{k=0}^{2000} (e_{iq}(k))^2}{2001}$$

จากขั้นตอนการคำนวณของฟังก์ชันวัตถุประสงค้ทั้งหมดข้างต้น สามารถเขียนเป็นแผนภาพการโปรแกรมได้ดังรูปที่ 7.11 โดยการโปรแกรมดังกล่าวบน M-file สามารถดูได้จากภาคผนวก ค.



รูปที่ 7.11 แผนภาพการโปรแกรมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (เวอร์ชันที่ 1)

การทดสอบฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $W$  กับค่า  $\%THD$  ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย จะกำหนดให้ชุดข้อมูลตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี่ จำนวน 5 ชุดข้อมูลจากการออกแบบโดยใช้วิธีการลองผิดลองถูกตามตารางที่ 7.1 ถึง 7.3 นอกจากนี้ การทดสอบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งห้ากรณีชุดข้อมูลดังกล่าว จะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ มีค่าเท่ากับ 360 V และ 18 mH ตามลำดับ โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ได้จากการออกแบบโดยวิธีการตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ผลการทดสอบฟังก์ชันวัตถุประสงค์แสดงค่า  $W$  และค่า  $\%THD$  ทั้งห้ากรณีชุดข้อมูลได้ดังตารางที่ 7.5 จากตารางดังกล่าว จะสังเกตได้ว่า เมื่อค่า  $W$  ที่ได้จากการคำนวณด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าลดลง พบว่า ค่า  $\%THD$  เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายจะมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน (ค่า  $\%THD$  ดังกล่าว ได้จากผลการจำลองสถานการณ์ตามตารางที่ 7.4) ซึ่งหมายความว่า ถ้าการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่และค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS ให้ค่า  $W$  ที่น้อยลง จะส่งผลให้ค่า  $\%THD$  ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าน้อยลงด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 7.5 ผลการทดสอบฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ชุดข้อมูล	ค่า $\%THD$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย				ค่า $W$
	เฟส $a$	เฟส $b$	เฟส $c$	ค่าเฉลี่ย	
1	3.53%	3.61%	3.57%	3.67%	0.1159
2	3.00%	2.81%	2.70%	2.84%	0.1089
3	2.78%	2.67%	2.90%	2.79%	0.0935
4	2.52%	2.79%	2.46%	2.59%	0.0855
5	2.45%	2.28%	2.58%	2.44%	0.0765

#### 7.4.2 ขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่ และค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

การกำหนดขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี่ และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ มีความสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งนี้เนื่องจากขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว จะส่งผลต่อการค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้างของวิธี ATS ได้ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้กำหนดขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  แสดงได้ดังตารางที่ 7.6

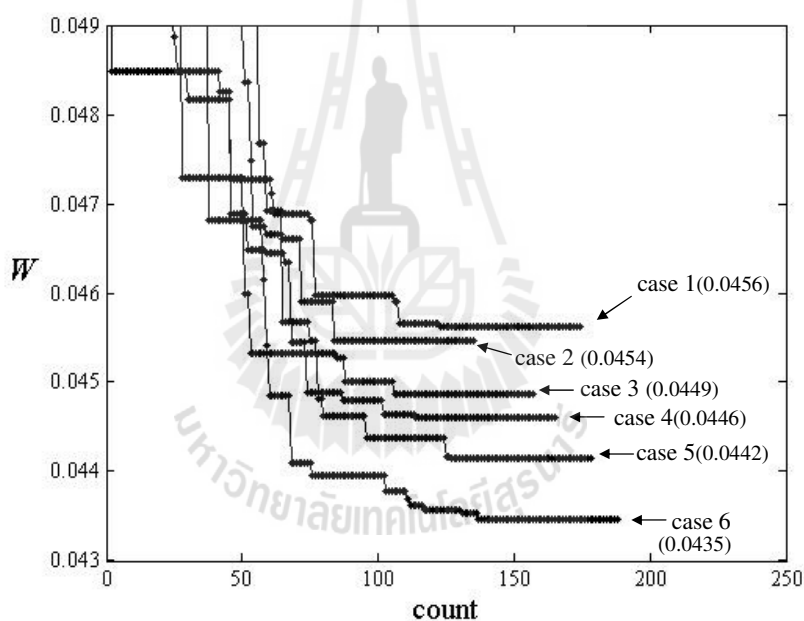
ตารางที่ 7.6 ขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  และพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$

พารามิเตอร์	ขอบเขต ต่ำสุด สูงสุด	พารามิเตอร์	ขอบเขต ต่ำสุด สูงสุด	พารามิเตอร์	ขอบเขต ต่ำสุด สูงสุด
$P_1$	[-0.25, -0.14]	$P_{10}$	[0.06, 0.11]	$P_{19}$	[0.02, 0.07]
$P_2$	[-0.12, -0.09]	$P_{11}$	[0.10, 0.17]	$P_{20}$	[0.45, 0.70]
$P_3$	[-0.17, -0.10]	$P_{12}$	[0.09, 0.12]	$P_{21}$	[-500, -130]
$P_4$	[-0.11, -0.06]	$P_{13}$	[0.14, 0.25]	$P_{22}$	[-120, -30]
$P_5$	[-0.05, -0.01]	$P_{14}$	[-0.70, -0.45]	$P_{23}$	[-20, 20]
$P_6$	[-0.07, -0.01,]	$P_{15}$	[-0.07, -0.02]	$P_{24}$	[30, 120]
$P_7$	[-0.02, 0.02]	$P_{16}$	[-0.11, -0.07]	$P_{25}$	[130, 500]
$P_8$	[0.01, 0.07]	$P_{17}$	[-0.03, 0.03]	$V_{dc}^*$	[213, 400 ]
$P_9$	[0.01, 0.05]	$P_{18}$	[0.07, 0.11]	$L_f$	[0, 0.22]

จากตารางที่ 7.6 การกำหนดขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟ คือ  $V_{dc}^*$  เท่ากับ [213 V, 400 V] และ  $L_f$  เท่ากับ [0 H, 0.22 H] โดยค่าแรงดันต่ำสุดเท่ากับ 213 V กำหนดตามเงื่อนไขการออกแบบค่า  $V_{dc}^*$  คือ  $1.5V_{pcc}$  (โดยค่า  $V_{pcc}$  มีค่าเท่ากับ 142 V) ส่วนค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ 400 V กำหนดโดยการพิจารณาถึงค่าพิคของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่จะเลือกใช้ สำหรับการสร้างวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟในทางปฏิบัติ สำหรับค่าตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดเท่ากับ 0 H และสูงสุดเท่ากับ 0.22 H กำหนดโดยใช้เงื่อนไขตามการออกแบบค่า  $L_f$  ซึ่งมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.22 H (เงื่อนไขการออกแบบค่า  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 4.6 ในบทที่ 4) นอกจากนี้ การกำหนดขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี่ ได้จากการทดสอบการปรับขยายขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ให้ครอบคลุมชุดข้อมูลที่ 5 ตามตารางที่ 7.1 ถึง 7.3 ทั้งนี้เนื่องจากชุดข้อมูลดังกล่าวให้ผลสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยดีที่สุด (ค่า  $W$  น้อยที่สุด) การทดสอบปรับขยายขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว จะกำหนดให้ขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดเริ่มต้นของพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  มีค่าขยายครอบคลุมค่าพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของชุดข้อมูลที่ 5 ขนาด 10% ( $[-10\%P_x + P_x, 10\%P_x + P_x]$  โดยที่  $x = 1, 2, 3, \dots, 25$ ) โดยผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ด้วยวิธี ATS กรณีใช้ขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นดังกล่าว สามารถแสดงผลการลู่เข้าของค่า  $W$  ได้ดังกรณีที่ 1 (case 1) ในรูปที่ 7.13 โดยค่า  $W$  น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.0456 หลังจากการทดสอบในกรณีที่ 1 ลำดับต่อมา จะทำการปรับขยายขอบเขตต่ำสุดหรือขอบเขตสูงสุดของพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ที่ให้ค่าตอบเข้าใกล้ค่าขอบเขตต่ำสุดหรือขอบเขตสูงสุดเดิม การปรับขยายขอบเขตดังกล่าว จะปรับขยายค่าขอบเขตเดิมครั้งละ 10% เช่นกัน ทั้งนี้เพื่อเปิดโอกาสให้วิธี ATS สามารถค้นพบคำตอบที่ดีขึ้น (ค่า  $W$  ลดน้อยลง) ส่วนพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ที่ไม่



เข้าใกล้ค่าขอบเขตต่ำสุดหรือขอบเขตสูงสุดเดิม ผู้วิจัยจะกำหนดใช้ขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเช่นเดิม การปรับขยายขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  จะสิ้นสุดเมื่อพบว่า ผลการการค้นหาค่าพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ด้วยวิธี ATS ไม่เข้าใกล้ค่าขอบเขตเดิมทุกพารามิเตอร์ ซึ่งผลการทดสอบการปรับขยายขอบเขตดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังกรณีที่ 2 ถึง 6 ในรูปที่ 7.12 (case 2 – case 6) โดยการทดสอบปรับขยายขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เข้าใกล้ขอบเขตเดิม จากกรณีที่ 2 ถึงกรณีที่ 6 จะพบว่าวิธี ATS สามารถค้นพบคำตอบที่ดีขึ้นตามลำดับ (ค่า  $W$  ลดน้อยลง) โดยในกรณีที่ 6 คือ กรณีสุดท้ายที่พบว่าค่าพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ไม่เข้าใกล้ขอบเขตเดิม และให้ค่า  $W$  น้อยที่สุดเท่ากับ 0.0435 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี จากผลการทดสอบในกรณีที่ 6 ซึ่งมีค่าขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.6



รูปที่ 7.12 ผลการทดสอบปรับขยายขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี

#### 7.4.3 การทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ ATS สำหรับการใช้ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในขั้นตอนการค้นหาของวิธี ATS ซึ่งประกอบด้วย 4 พารามิเตอร์ คือ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบ

ข้าง ค่ารัศมีเริ่มต้น และค่าตัวประกอบปรับลดรัศมี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดดังกล่าว ผู้วิจัยจะทำการทดสอบการกำหนดใช้ค่าต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ โดยกำหนดใช้ค่า  $W$  น้อยที่สุด คือ ธรรมชาติี่วัดการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ อย่างไรก็ตาม ถ้าพบว่ามีกรณีที่ค่า  $W$  น้อยที่สุดเท่ากัน ผู้วิจัยจะใช้จำนวนรอบการค้นหา (*count*) ที่ค้นพบคำตอบน้อยที่สุดดังกล่าว ในการตัดสินใจเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ สำหรับการทดสอบจะกำหนดเงื่อนไขให้ ATS สามารถเดินย้อนรอยได้เมื่อไม่สามารถค้นพบคำตอบที่ดีกว่าเดิมภายในจำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 30 รอบ และกำหนดให้ ATS หยุดการค้นหาเมื่อไม่สามารถค้นหาพบคำตอบที่ดีกว่าเดิมภายในจำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 50 รอบ ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ ATS ทั้ง 4 พารามิเตอร์ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ดังนี้

#### การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นของ ATS สำหรับใช้ค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ จะทดสอบใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 20 30 40 50 และ 60 คำตอบ ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 7.7 จากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่า จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 และ 50 คำตอบให้ผลค่า  $W$  น้อยที่สุดเท่ากัน โดยเท่ากับ 0.0430 แต่เมื่อพิจารณาค่า *count* น้อยที่ค้นพบคำตอบพบว่า กรณีจำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 มีค่า *count* น้อยกว่าเท่ากับ 127.70 รอบ ในขณะที่กรณีจำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 มีค่าเท่ากับ 222.40 รอบ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ

หมายเหตุ: ค่า  $W$  น้อย และค่า *count* น้อย สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (7.6) และ (7.7) ตามลำดับ ดังนี้

$$W \text{ น้อย} = \frac{\sum_{n=1}^5 W_n}{5} \quad (7.6)$$

$$\text{count น้อย} = \frac{\sum_{n=1}^5 \text{count}_n}{5} \quad (7.7)$$

ตารางที่ 7.7 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ						
<i>W</i>	0.0436	0.0437	0.0500	0.0441	0.0425	0.0448
<i>count</i>	162	140	20	136	186	128.80
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ						
<i>W</i>	0.0500	0.0419	0.0447	0.0501	0.0437	0.0461
<i>count</i>	41	91	86	11	51	56.00
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ						
<i>W</i>	0.0432	0.0426	0.0494	0.0473	0.0441	0.0453
<i>count</i>	152	163	54	20	159	108.60
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 คำตอบ						
<i>W</i>	0.0430	0.0424	0.0435	0.0426	0.0437	0.0430
<i>count</i>	255	166	235	234	222	222.40
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ						
<i>W</i>	0.0425	0.0420	0.0445	0.0430	0.0430	0.0430
<i>count</i>	125	122	153	129	107	127.20
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 60 คำตอบ						
<i>W</i>	0.0440	0.0441	0.0433	0.0430	0.0442	0.0437
<i>count</i>	127	112	104	55	187	117.00

หมายเหตุ: กำหนดให้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำรัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 และค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1

#### การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างของ ATS สำหรับใช้ค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีซีซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรถองกำลังแอกทีฟ จะทดสอบใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 20 30 40 50 และ 60 คำตอบ ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 7.8 จากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่า การใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ ให้ค่า *W* เฉลี่ยน้อยที่สุด เท่ากับ 0.0428 ส่วนค่า *count* เฉลี่ยที่ค้นพบคำตอบ พบว่า ทุกกรณีจำนวนคำตอบรอบข้างให้ผลใกล้เคียงกัน (แตกต่างกันน้อยกว่า 100 รอบ) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ

ตารางที่ 7.8 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ						
<i>W</i>	0.0464	0.0436	0.0450	0.0433	0.0429	0.0442
<i>count</i>	13	156	192	148	113	124.4
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ						
<i>W</i>	0.0444	0.0414	0.0418	0.0443	0.0438	0.0431
<i>count</i>	169	144	122	57	113	121
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ						
<i>W</i>	0.0469	0.0435	0.0430	0.0441	0.0439	0.0443
<i>count</i>	40	134	97	41	124	87.2
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ						
<i>W</i>	0.0419	0.0433	0.0424	0.0434	0.0431	0.0428
<i>count</i>	123	121	153	144	118	131.8
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ						
<i>W</i>	0.0420	0.0437	0.0424	0.0429	0.0438	0.0430
<i>count</i>	111	120	145	143	101	124
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 60 คำตอบ						
<i>W</i>	0.0441	0.0421	0.0436	0.0427	0.0436	0.0432
<i>count</i>	80	157	212	174	177	160

หมายเหตุ: กำหนดให้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำรัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 และค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1

#### การทดสอบคำรัศมีเริ่มต้น

การทดสอบคำรัศมี ( $r$ ) เริ่มต้นของ ATS สำหรับใช้ค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ได้ทำการทดสอบใช้คำรัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 โดยผลการทดสอบ พบว่า กรณีคำรัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 ให้ผลค่า  $W$  เล็กลงน้อยที่สุด เท่ากับ 0.0423 ในขณะที่ค่า  $count$  เฉลี่ยที่ค้นพบคำตอบ พบว่า ทุกกรณีคำรัศมีเริ่มต้นให้ผลใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 7.9 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้คำรัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1

ตารางที่ 7.9 ผลการทดสอบค่าร้อยละเริ่มต้น

ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 0.5						
<i>W</i>	0.0417	0.0433	0.0419	0.0438	0.0435	0.0428
<i>count</i>	81	176	111	172	62	120.4
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 1						
<i>W</i>	0.0426	0.0430	0.0428	0.0420	0.0412	0.0423
<i>count</i>	142	34	93	133	99	100.2
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 1.5						
<i>W</i>	0.0429	0.0431	0.0418	0.0429	0.0427	0.0427
<i>count</i>	128	103	67	71	124	98.6
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 2						
<i>W</i>	0.0418	0.0436	0.0436	0.0435	0.0421	0.0429
<i>count</i>	78	61	117	118	96	94
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 2.5						
<i>W</i>	0.0425	0.0426	0.0431	0.0433	0.0430	0.0429
<i>count</i>	135	50	129	81	168	112.6
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 3						
<i>W</i>	0.0430	0.0430	0.0432	0.0422	0.0470	0.0437
<i>count</i>	146	122	98	135	28	105.8

หมายเหตุ: กำหนดให้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 และค่าตัวประกอบปรับลดร้อยละเท่ากับ 1.1

#### การทดสอบค่าตัวประกอบปรับลดร้อยละ

การทดสอบค่าตัวประกอบปรับลดร้อยละ (DF) ของ ATS สำหรับใช้ค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทิฟ ได้ทำการทดสอบใช้ค่าตัวประกอบปรับลดร้อยละเท่ากับ 1.01 1.025 1.05 1.075 1.1 และ 1.2 ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า การใช้ค่าตัวประกอบปรับลดร้อยละเท่ากับ 1.075 ให้ผลการทดสอบค่า *W* น้อยที่สุด เท่ากับ 0.0422 ส่วนค่า *count* น้อยที่สุดเท่าที่ค้นพบคำตอบของทุกกรณีค่าตัวประกอบปรับ

ลครีสมิให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 7.10 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าตัวประกอบปรับลครีสมิเท่ากับ 1.1

ตารางที่ 7.10 ผลการทดสอบค่าตัวประกอบปรับลครีสมิ

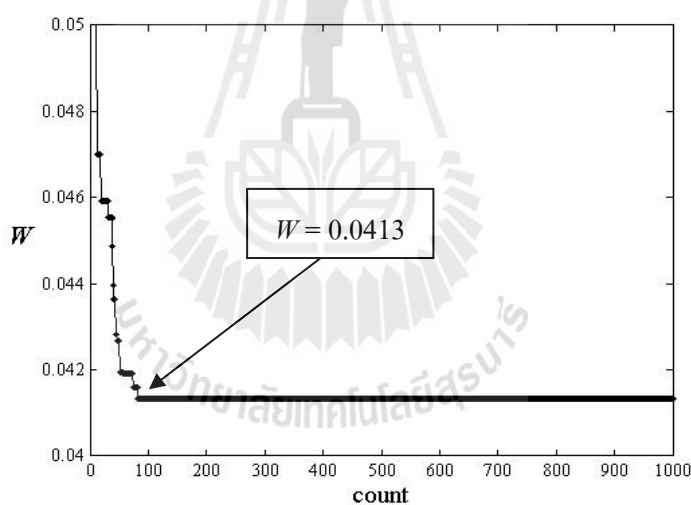
ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าตัวประกอบปรับลครีสมิเท่ากับ 1.01						
<i>W</i>	0.0439	0.0454	0.0465	0.0486	0.0447	0.0458
<i>count</i>	77	22	67	64	33	52.6
ค่าตัวประกอบปรับลครีสมิเท่ากับ 1.025						
<i>W</i>	0.0436	0.0420	0.0456	0.0430	0.0424	0.0433
<i>count</i>	145	156	79	41	61	96.4
ค่าตัวประกอบปรับลครีสมิเท่ากับ 1.05						
<i>W</i>	0.0428	0.0431	0.0431	0.0426	0.0418	0.0427
<i>count</i>	63	61	106	65	122	83.4
ค่าตัวประกอบปรับลครีสมิเท่ากับ 1.075						
<i>W</i>	0.0424	0.0416	0.0424	0.0419	0.0425	0.0422
<i>count</i>	100	84	119	60	50	82.6
ค่าตัวประกอบปรับลครีสมิเท่ากับ 1.1						
<i>W</i>	0.0421	0.0425	0.0440	0.0429	0.0423	0.0428
<i>count</i>	68	63	47	83	90	74.2
ค่าตัวประกอบปรับลครีสมิเท่ากับ 1.2						
<i>W</i>	0.0424	0.0429	0.0434	0.0437	0.0442	0.0433
<i>count</i>	42	93	39	30	89	58.60

หมายเหตุ: กำหนดให้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 และค่ารัสมิเริ่มต้นเท่ากับ 1

จากผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ ATS ข้างต้น ผู้วิจัยจึงกำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ ค่ารัสมิเริ่มต้นเท่ากับ 1 และค่าตัวประกอบปรับลครีสมิเท่ากับ 1.075 สำหรับนำไปใช้ค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีซีซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟต่อไป

#### 7.4.4 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS

จากการกำหนดขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในหัวข้อที่ 7.4.2 รวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ ATS ในหัวข้อที่ 7.4.3 ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS เพื่อค้นหาค่าเหมาะที่สุดของพารามิเตอร์ดังกล่าว โดยการค้นหาจะกำหนดเงื่อนไขให้ ATS สามารถเดินย้อนรอยเมื่อไม่สามารถค้นพบคำตอบที่ดีกว่าเดิมภายในจำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 100 รอบ และกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาสูงสุด ( $count_{max}$ ) เท่ากับ 1000 รอบ ซึ่งผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ สามารถแสดงการลู่เข้าของค่า  $W$  ได้ดังรูปที่ 7.13



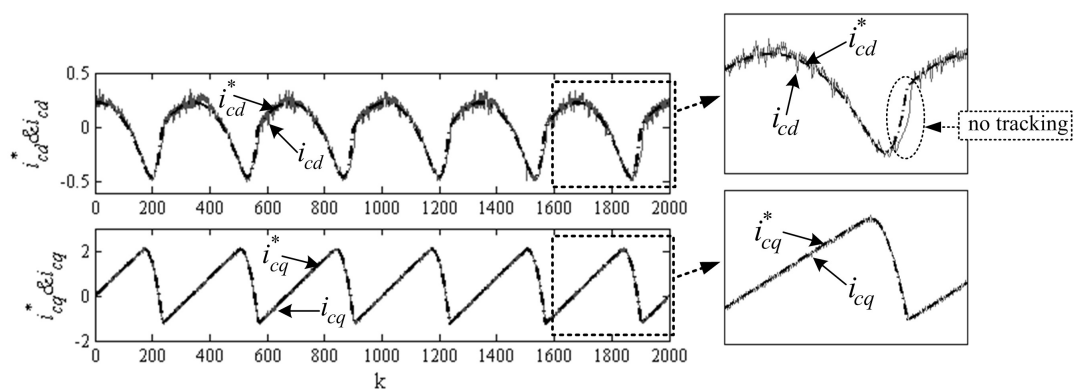
รูปที่ 7.13 การลู่เข้าของค่า  $W$  สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

จากรูปที่ 7.13 สังเกตได้ว่า การลู่เข้าของค่า  $W$  ที่ดีที่สุดในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 1000 รอบ มีค่าเท่ากับ 0.0413 โดยในช่วงรอบการค้นหาที่ 74 ถึง 81 ค่า  $W$  มีค่าเท่ากับ 0.0415 ซึ่งค่า  $W$  ดังกล่าว ถือเป็นคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น อย่างไรก็ตาม ATS สามารถค้นพบคำตอบที่ดีกว่าเดิมได้ ที่ค่าเท่ากับ 0.0413 ในรอบการค้นหาที่ 82 จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นถึงการหลุดออกจากคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (escape local solution) สำหรับผลค่าพารามิเตอร์  $P_1$

ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมพีชชี และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ที่ค่า  $W$  เท่ากับ 0.0413 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.11 ซึ่งจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว เมื่อนำไปทดสอบจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว แสดงผลได้ดังรูปที่ 7.14 โดยการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว จะดำเนินการจำลองสถานการณ์โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์บน โปรแกรม M-file ทั้งนี้เพื่อพิจารณาผลของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีต่อการค้นพบค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

ตารางที่ 7.11 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยวิธี ATS

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error												
P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>13</sub>
-0.1416	-0.0918	-0.1175	-0.0782	-0.0125	-0.0151	-0.0096	0.0248	0.0107	0.0942	0.1198	0.0951	0.1665
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate												
P <sub>14</sub>		P <sub>15</sub>		P <sub>16</sub>		P <sub>17</sub>		P <sub>18</sub>		P <sub>19</sub>		P <sub>20</sub>
-0.5085		-0.0628		-0.0826		-0.0169		0.0931		0.0354		0.4780
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage												
P <sub>21</sub>		P <sub>22</sub>		P <sub>23</sub>		P <sub>24</sub>		P <sub>25</sub>				
-308.06		-119.03		10.407		92.922		541.26				
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ												
$V_{dc}^*$						$L_f$						
369.69						0.0270						



รูปที่ 7.14 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว



จากรูปที่ 7.14 สังเกตได้ว่า กระแสชดเชยบนแกนคิกิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) มีลักษณะรูปสัญญาณคล้ายตามกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) แต่เมื่อพิจารณาขยายรูปในช่วงรูปสัญญาณที่มีค่าอัตรา การเปลี่ยนแปลงสูงสุด พบว่า กระแสชดเชยบนแกนคิกิวไม่สามารถเกาะกระแสอ้างอิงในช่วงรูป สัญญาณดังกล่าวได้ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีชซีที่ได้จากการออกแบบมี สมรรถนะการควบคุมไม่ดีตลอดทุกช่วงรูปสัญญาณ ซึ่งหมายความว่า ค่าพารามิเตอร์ตำแหน่ง ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซี และอาจรวมถึงค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ที่ได้ จากการออกแบบด้วยวิธี ATS ตามตารางที่ 7.11 ยังคงมีค่าไม่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา ถึงแม้ว่า ATS จะสามารถค้นพบคำตอบค่า  $W$  ที่มีค่าน้อยเท่ากับ 0.413 ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะ ปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับใช้ในออกแบบค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัว ควบคุมพีชซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟใหม่ เพื่อให้ ATS สามารถค้นหา ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณามากยิ่งขึ้น การปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ดังนี้

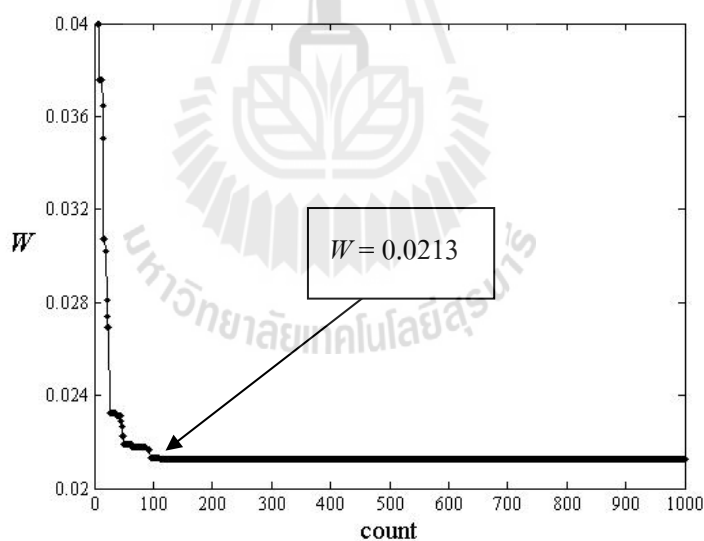
#### 7.4.5 การปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก ของตัวควบคุมพีชซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

การปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในหัวข้อนี้ จะยังคงใช้โครงสร้างหลักของ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดิมตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 7.4.1 เพียงแต่จะทำการพิจารณาการคำนวณค่า  $W$  ใหม่ โดยกำหนดให้มีการปรับน้ำหนักความสำคัญของค่า  $e_{id}$  และ  $e_{iq}$  ให้มีความเหมาะสมมาก ยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกระแสอ้างอิงบนแกนคิกิวมีขนาดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ กระแสอ้างอิงบนแกน คิกิว ( $i_{cd}^*$ ) มีค่าเท่ากับ  $0.2239 A_{rms}$  ซึ่งน้อยกว่ากระแสอ้างอิงบนแกนคิกิว ( $i_{cq}^*$ ) ที่มีค่าเท่ากับ  $1.1410 V_{rms}$  ดังนั้น เมื่อคำนวณค่า  $e_{id}$  และ  $e_{iq}$  จะทำให้ค่า  $e_{iq}$  จะมีค่ามากกว่าค่า  $e_{id}$  ดังผลการออกแบบ ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟใน หัวข้อที่ผ่านมา ที่พบว่า ค่าคำตอบ  $W$  น้อยที่สุดเท่ากับ 0.0413 ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (7.5) โดยค่า  $e_{iq}$  และ  $e_{id}$  ในสมการดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 0.0504 และ 0.0326 ตามลำดับ ( $e_{iq} > e_{id}$ ) ด้วยเหตุนี้ จึงส่งผลให้ ATS ค้นพบคำตอบค่า  $W$  น้อยที่สุดที่เกิดจากผลของค่า  $e_{iq}$  ที่ลดน้อยลงเพียง ค่าเดียว และส่งผลให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมพีชซีที่ได้จากการออกแบบ มีสมรรถนะการควบคุมที่ดีเฉพาะบนแกนคิกิว ดังรูปที่ 7.14

การปรับน้ำหนักความสำคัญของค่า  $e_{id}$  และ  $e_{iq}$  ในการคำนวณหาค่า  $W$  ตาม สมการที่ (7.5) จะใช้วิธีการปรับคูณด้วยค่าตัวประกอบ  $a$  และ  $b$  ดังสมการที่ (7.8) โดยกำหนดให้ ค่าตัวประกอบ  $a$  มีค่าเท่ากับ 1 และค่าตัวประกอบ  $b$  มีเท่ากับ 0.1962 ซึ่งค่าตัวประกอบ  $b$  ดังกล่าว คือ ค่าอัตราส่วนของกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนคิกิว ( $b = i_{cd}^* / i_{cq}^*$ )

$$W = \sqrt{\frac{ae_{id}^2 + be_{iq}^2}{2}} \quad (7.4)$$

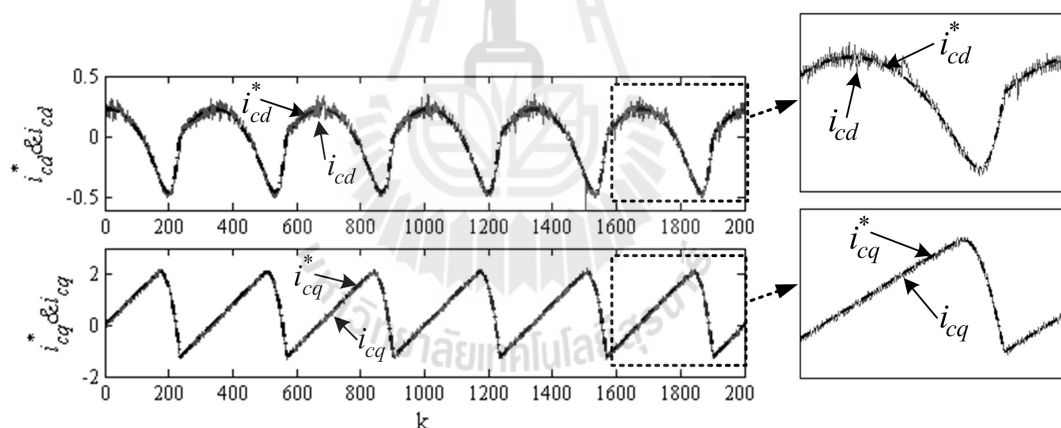
จากการปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ข้างต้น เมื่อนำไปใช้สำหรับการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 1000 รอบ สามารถแสดงผลการค้นพบค่าตอบค่า  $W$  น้อยที่สุดค่าใหม่ ได้ดังรูปที่ 7.15 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ค่า  $W$  มีการลู่เข้าสู่ค่าที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.0213 ที่รอบการค้นหาเท่ากับ 111 ซึ่งค่า  $W$  ดังกล่าวถือเป็นคำตอบที่ดีที่สุดในการค้นหาครั้งนี้ ผลค่าพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  ของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ค่า  $W$  เท่ากับ 0.0213 แสดงได้ดังตารางที่ 7.12 ซึ่งเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ชุดดังกล่าวไปดำเนินการจำลองสถานการณ์โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ปรับปรุงใหม่บนโปรแกรม M-file สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟบนแกนคิควได้ดังรูปที่ 7.16



รูปที่ 7.15 การลู่เข้าสู่ของค่า  $W$  สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟกรณีปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่

ตารางที่ 7.12 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าพารามิเตอร์ของ  
วงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS กรณีปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error														
P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>13</sub>		
-0.2290	-0.1160	-0.1644	-0.0623	-0.0106	-0.0111	-0.0016	0.0320	0.0134	0.0904	0.1593	0.0980	0.1898		
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate														
P <sub>14</sub>			P <sub>15</sub>			P <sub>16</sub>			P <sub>17</sub>			P <sub>18</sub>		
-0.5359			-0.0600			-0.0952			-0.0083			0.0887		
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage														
P <sub>21</sub>			P <sub>22</sub>			P <sub>23</sub>			P <sub>24</sub>			P <sub>25</sub>		
-217.11			-114.37			-2.1958x10 <sup>-5</sup> (0)			113.91			142.66		
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ														
V <sub>dc</sub> <sup>*</sup>						L <sub>f</sub>								
362.17						0.02049								



รูปที่ 7.16 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว  
กรณีปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ (เวอร์ชันที่ 1)

จากรูปที่ 7.16 สังเกตได้ว่า กระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ตลอดรูปสัญญาณ โดยเมื่อพิจารณาขยายรูปในช่วงรูปสัญญาณที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด พบว่า กระแสชดเชยบนแกนดีคิวสามารถเกาะกระแสอ้างอิงได้ดีทั้งสองแกน จากผลดังกล่าวหมายความว่า ตัวควบคุมฟัซซีที่ได้จากการออกแบบโดยใช้วิธี ATS กรณีปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมการชดเชย นอกจากนี้ ค่า

พารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS ตามตารางที่ 7.12 สามารถส่งเสริมให้กระแสชดเชยบนแกนคิกมีลักษณะตามกระแสอ้างอิงได้ดียิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดิม

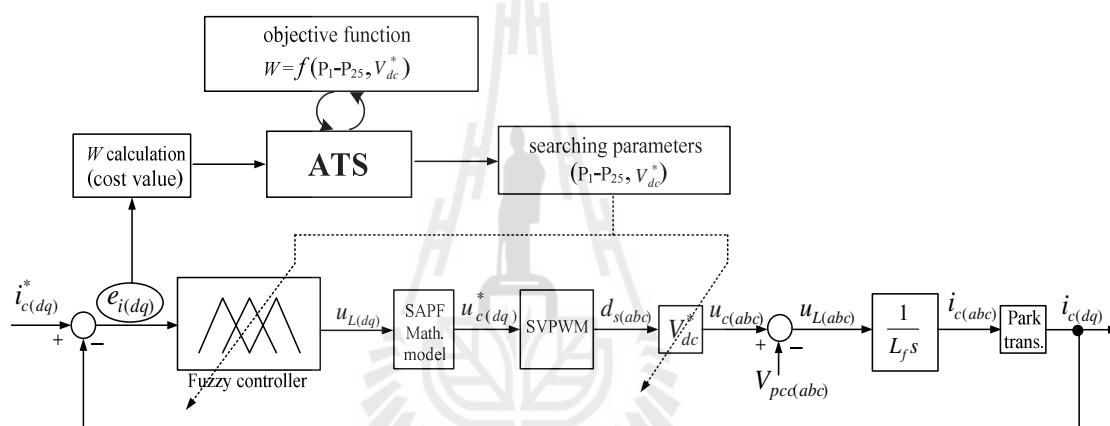
## 7.5 การพัฒนาการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้นำเสนอการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS (เวอร์ชันที่ 1) ซึ่งการออกแบบดังกล่าว ได้นำวิธี ATS มาช่วยค้นหาพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟuzzy และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  และ  $L_f$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ รวมทั้งหมด 27 พารามิเตอร์ อย่างไรก็ตาม ถ้าโหลดกระแสฮาร์มอนิกของระบบที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ATS จะต้องทำการค้นหา 27 ค่าพารามิเตอร์ชุดใหม่ทุกครั้ง เพื่อให้ได้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีในทุกกรณี โหลด ซึ่งในทางปฏิบัติการออกแบบด้วยวิธี ATS ดังกล่าว จำเป็นต้องใช้หน่วยความจำของ ATS จำนวนมากสำหรับการใช้เก็บข้อมูล ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการพัฒนาการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS แนวทางใหม่ โดยการพิจารณาลดจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องทำการค้นหาลง แต่ผลค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะต้องให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยดีใกล้เคียงผลที่ได้จากการออกแบบในเวอร์ชันที่ 1 เช่นเดิม การพัฒนาการออกแบบได้แบ่งเป็น 4 เวอร์ชัน คือ การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (เวอร์ชันที่ 2) การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyแบบสมมาตรและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (เวอร์ชันที่ 3) การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyเฉพาะเอาต์พุตและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (เวอร์ชันที่ 4) และการออกแบบค่าตัวประกอบตัวปรับคูลเอาต์พุตของตัวควบคุม ฟuzzyและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (เวอร์ชันที่ 5) โดยรายละเอียดการออกแบบของแต่ละเวอร์ชันสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 7.5.1 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS (เวอร์ชันที่ 2)

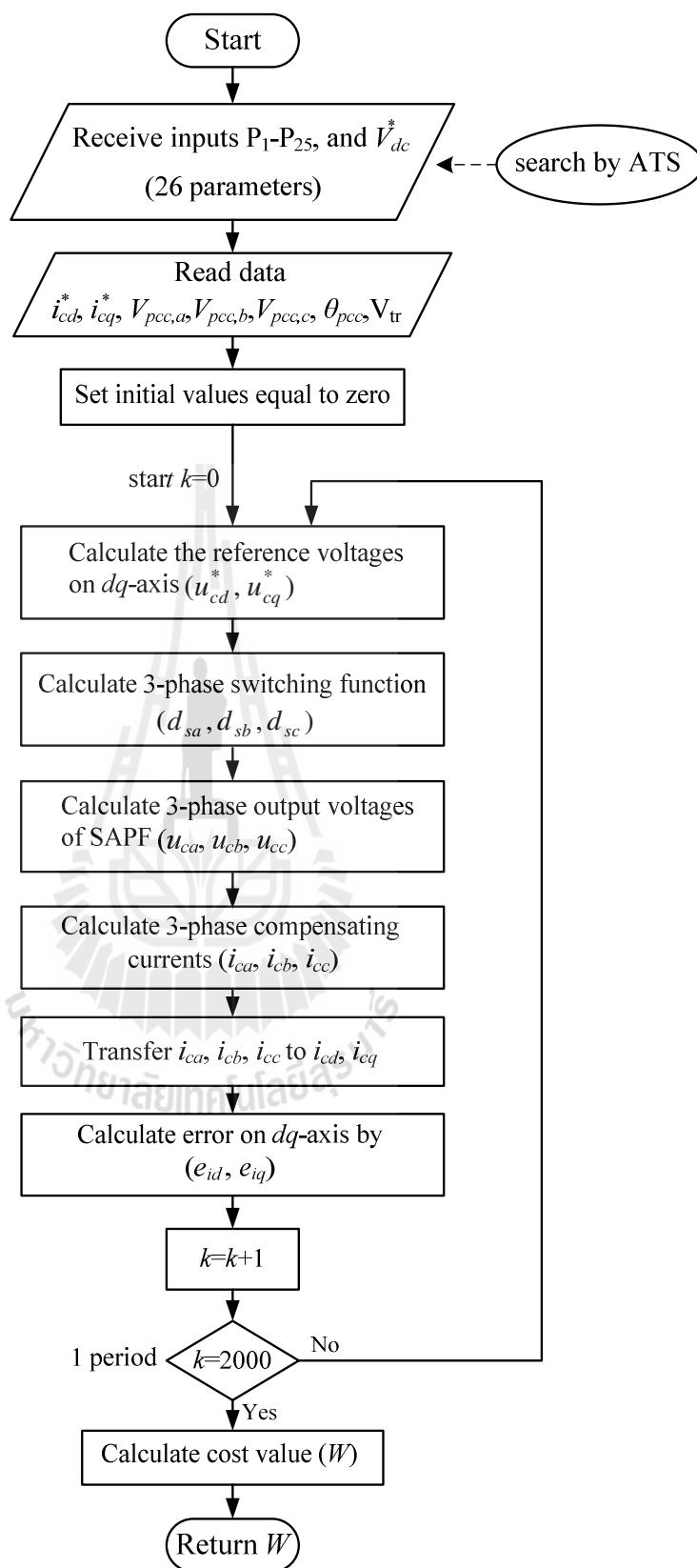
การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 2 จะกำหนดให้ ATS ค้นหาพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟuzzy และค่าพารามิเตอร์แรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง

หรือค่า  $V_{dc}^*$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ รวมทั้งหมด 26 พารามิเตอร์ โดยพิจารณาการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_f$ ) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ทั้งนี้เนื่องจากในทางปฏิบัติเมื่อโหลดกระแสฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลง ค่าตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตามการออกแบบใหม่ทุกครั้ง ดังนั้น การออกแบบค่า  $L_f$  จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.018 H ซึ่งค่าดังกล่าวได้จากการออกแบบโดยวิธีการของ Ingram and Round ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 แผนภาพไดอะแกรมการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยใช้วิธี ATS สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.17 โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในไดอะแกรมดังกล่าว สามารถแสดงรายละเอียดแผนภาพการโปรแกรมได้ดังรูปที่ 7.18

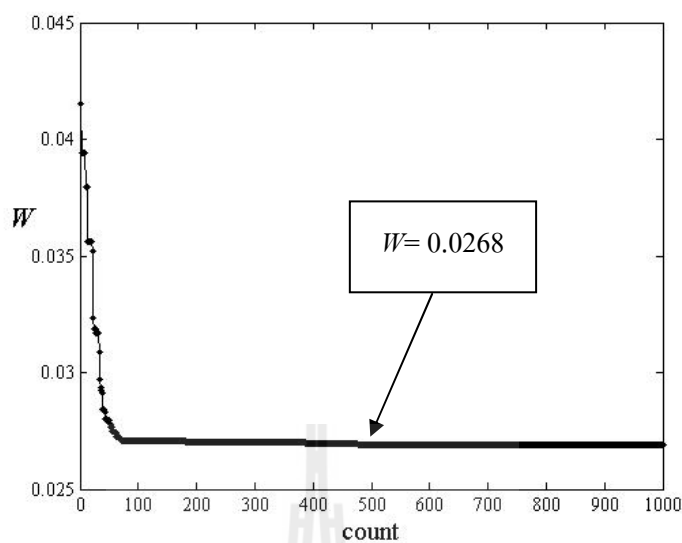


รูปที่ 7.17 ไดอะแกรมการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟัซซี และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS ดำเนินการค้นหาในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 1000 รอบ (ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ ATS ใช้เหมือนกับการออกแบบในเวอร์ชันที่ 1 ในหัวข้อ 7.4) สามารถแสดงผลการค้นหาพารามิเตอร์ได้ดังรูปที่ 7.19 จากรูปดังกล่าว แสดงการลู่เข้าของค่า  $W$  ที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.0268 ที่รอบการค้นหาเท่ากับ 476 ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการค้นหาในครั้งนี้ โดยผลค่าพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  และค่า  $V_{dc}^*$  ที่คำตอบ  $W$  ดังกล่าว ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.13 (ส่วนที่แรก) ซึ่งเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ชุดดังกล่าวไปจำลองสถานการณ์โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เวอร์ชันที่ 2 บนโปรแกรม M-file สามารถแสดงผลการควบคุมกระแสฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนคิกวได้ดังรูปที่ 7.20



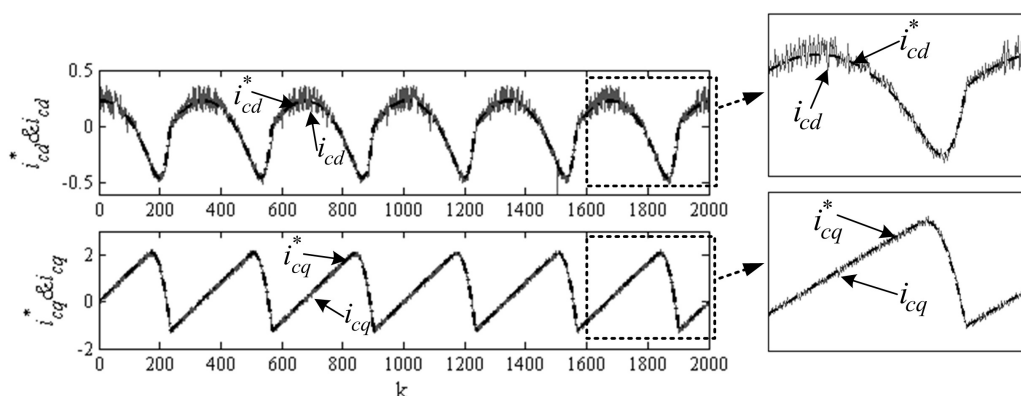
รูปที่ 7.18 แผนภาพการ โปรแกรมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เวอร์ชันที่ 2



รูปที่ 7.19 การลู่เข้าของค่า  $W$  สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

ตารางที่ 7.13 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error														
P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>13</sub>		
-0.1982	-0.0933	-0.1557	-0.0770	-0.0107	-0.0118	0.0058	0.0187	0.0165	0.0689	0.1492	0.1102	0.2336		
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate														
P <sub>14</sub>			P <sub>15</sub>			P <sub>16</sub>			P <sub>17</sub>			P <sub>18</sub>		
-0.6777			-0.0399			-0.0842			0.0087			0.0750		
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage														
P <sub>21</sub>			P <sub>22</sub>			P <sub>23</sub>			P <sub>24</sub>			P <sub>25</sub>		
-263.27			-99.89			-7.3			98.79			285.92		
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ														
$V_{dc}^*$						$L_f$								
356.31						0.018								



รูปที่ 7.20 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว  
สำหรับการออกแบบในเวอร์ชันที่ 2

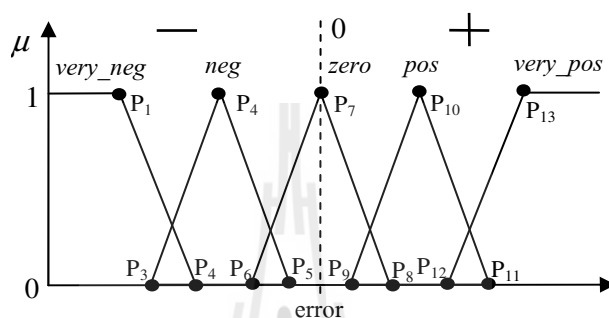
จากรูปที่ 7.20 สังเกตได้ว่า กระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ตลอดรูปสัญญาณ ซึ่งเมื่อพิจารณาช่วงรูปสัญญาณที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด พบว่า กระแสชดเชยบนแกนดีคิวสามารถเกาะกระแสอ้างอิงได้ดีดังรูปขยายของทั้งสองแกน จากผลดังกล่าว หมายความว่า ค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมฟuzzy ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 2 ตามตารางที่ 7.13 สามารถส่งผลให้ตัวควบคุมฟuzzy มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชย นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS มีค่าเท่ากับ 356.31 V สามารถส่งเสริมให้กระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิวมีลักษณะตามกระแสอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 7.5.2 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy แบบสมมาตรและค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS (เวอร์ชันที่ 3)

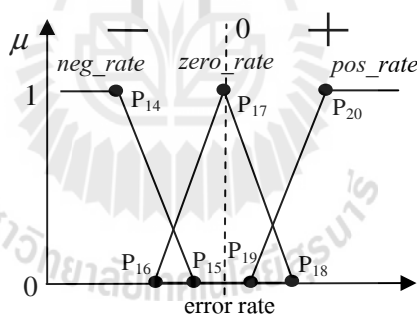
การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy และค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 3 จะกำหนดให้ ATS ค้นหาพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy แบบสมมาตร และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (กำหนดให้ค่า  $L_f = 0.018$  H) โดยตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error อินพุต error rate และเอาต์พุต voltage ของตัวควบคุมฟuzzy แบบสมมาตรฝั่งลบและบวกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.21 ถึง 7.23 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว การสมมาตรฝั่งลบและบวกของฟังก์ชันสมาชิกจะทำให้สามารถพิจารณาออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเพียงฝั่งลบด้านเดียวได้ และกำหนดให้ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกฝั่งบวกมีขนาดเท่ากับฝั่งลบ ซึ่งจะช่วยลดจำนวนพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกที่ต้องทำการค้นหาเหลือเพียง 11 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์  $P_1$  ถึง  $P_6$  ของ



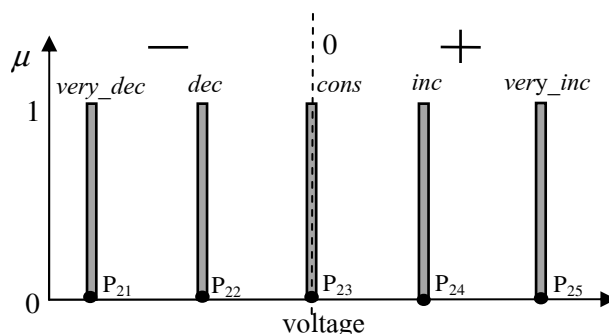
อินพุต error ค่าพารามิเตอร์  $P_{14}$  ถึง  $P_{16}$  ของอินพุต error rate และพารามิเตอร์  $P_{21}$  ถึง  $P_{22}$  ของเอาต์พุต voltage ซึ่งถ้ารวมพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ จะพบว่า การออกแบบในเวอร์ชันที่ 3 นี้ จะดำเนินการให้ ATS ค้นหาพารามิเตอร์จำนวนทั้งหมด 12 พารามิเตอร์ ซึ่งแผนภาพไดอะแกรมการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.24 โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในไดอะแกรมดังกล่าว สามารถแสดงรายละเอียดแผนภาพการโปรแกรมได้ดังรูปที่ 7.25



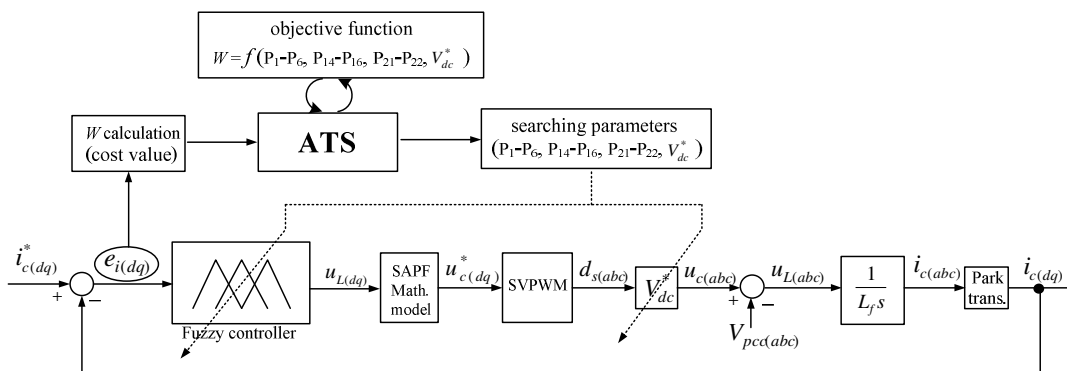
รูปที่ 7.21 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error แบบสมมาตร



รูปที่ 7.22 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate แบบสมมาตร



รูปที่ 7.23 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage แบบสมมาตร

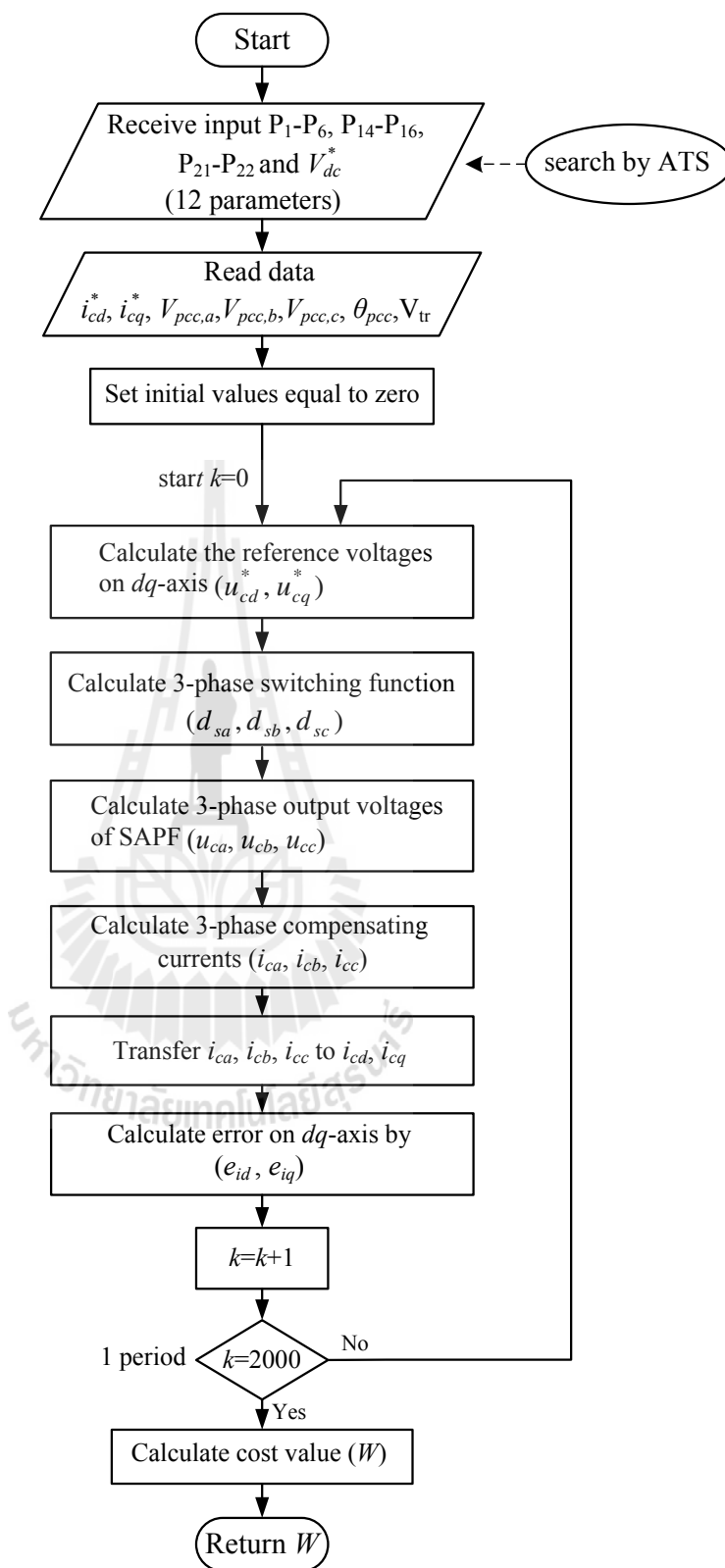


รูปที่ 7.24 ไลอะแกรมการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีแบบสมมาตร และค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS

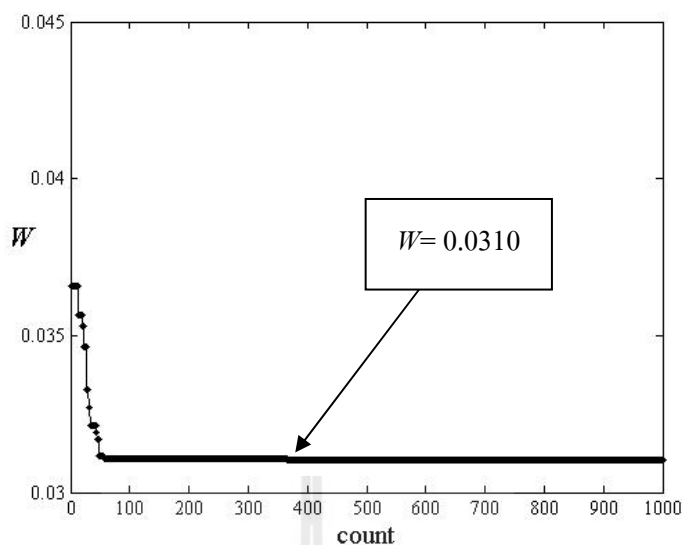
ตารางที่ 7.14 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีแบบสมมาตรและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error												
P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>13</sub>
-0.1575	-0.0904	-0.1199	-0.0836	-0.0113	-0.0129	0	0.0129	0.0113	0.0836	0.1199	0.0904	0.1575
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate												
P <sub>14</sub>	P <sub>15</sub>	P <sub>16</sub>		P <sub>17</sub>		P <sub>18</sub>		P <sub>19</sub>		P <sub>20</sub>		
-0.6316	-0.0356	-0.0838		0		0.0838		0.0356		0.6316		
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage												
P <sub>21</sub>		P <sub>22</sub>		P <sub>23</sub>		P <sub>24</sub>		P <sub>25</sub>				
-268.02		-89.99		0		89.99		268.02				
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ												
V <sub>dc</sub> *						L <sub>f</sub>						
351.32						0.018						

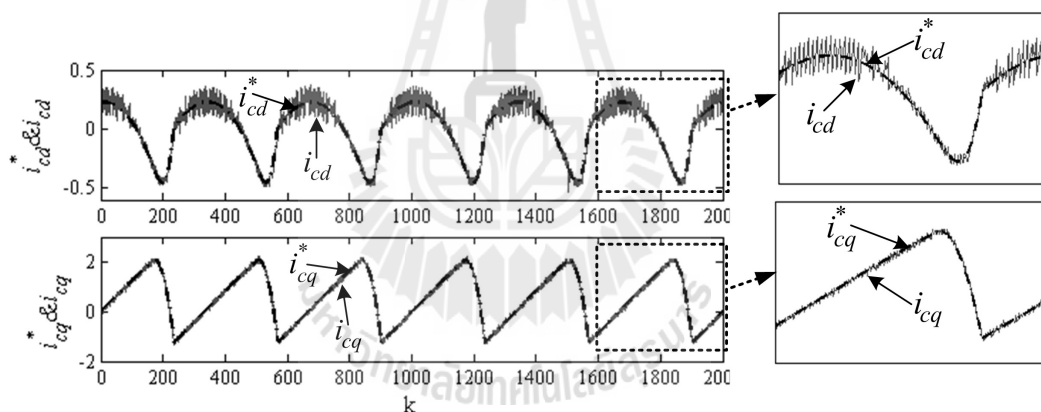
การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก P<sub>1</sub> ถึง P<sub>6</sub> ของอินพุต error ค่าพารามิเตอร์ P<sub>14</sub> ถึง P<sub>16</sub> ของอินพุต error rate และพารามิเตอร์ P<sub>21</sub> ถึง P<sub>22</sub> ของเอาต์พุต voltage ของตัวควบคุมฟัซซี รวมถึงค่าพารามิเตอร์ V<sub>dc</sub>\* ของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS ในจำนวนรอบการค้นหาล่าสุดเท่ากับ 1000 รอบ (ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ ATS ใช้เหมือนกับการออกแบบในเวอร์ชันที่ 1 ในหัวข้อ 7.4) สามารถแสดงผลการลู่เข้าของค่า W ดีที่สุดได้ดังรูปที่ 7.26 จากรูปดังกล่าว พบว่า ค่า W น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.0310 ที่รอบการค้นหาเท่ากับ 371 โดยผลค่า



รูปที่ 7.25 แผนภาพการโปรแกรมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เวอร์ชันที่ 3



รูปที่ 7.26 การลู่เข้าของค่า  $W$  สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีแบบสมมาตรและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

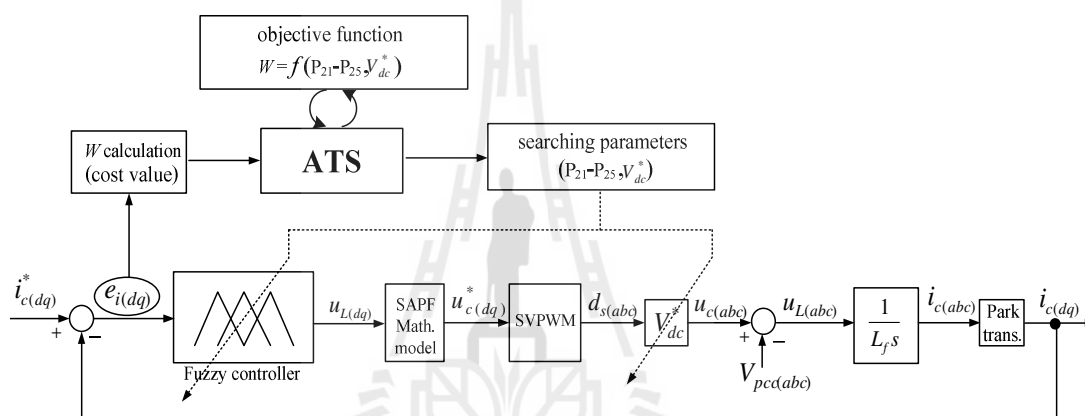


รูปที่ 7.27 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว สำหรับการออกแบบในเวอร์ชันที่ 3

พารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีแบบสมมาตร ( $P_1$  ถึง  $P_6$  ของอินพุต error  $P_{14}$  ถึง  $P_{16}$  ของอินพุต error rate และ  $P_{21}$  ถึง  $P_{22}$  ของเอาต์พุต voltage) และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ ที่ค่าตอบ  $W$  เท่ากับ 0.0310 ดังกล่าว ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.14 (ส่วนที่แรงา) จากค่าพารามิเตอร์ในตารางดังกล่าว เมื่อนำไปจำลองสถานการณ์กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์เวอร์ชันที่ 3 บน โปรแกรม M-file สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวได้ดังรูปที่ 7.27 ซึ่งสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมฟัซซีที่ได้จากการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชัน

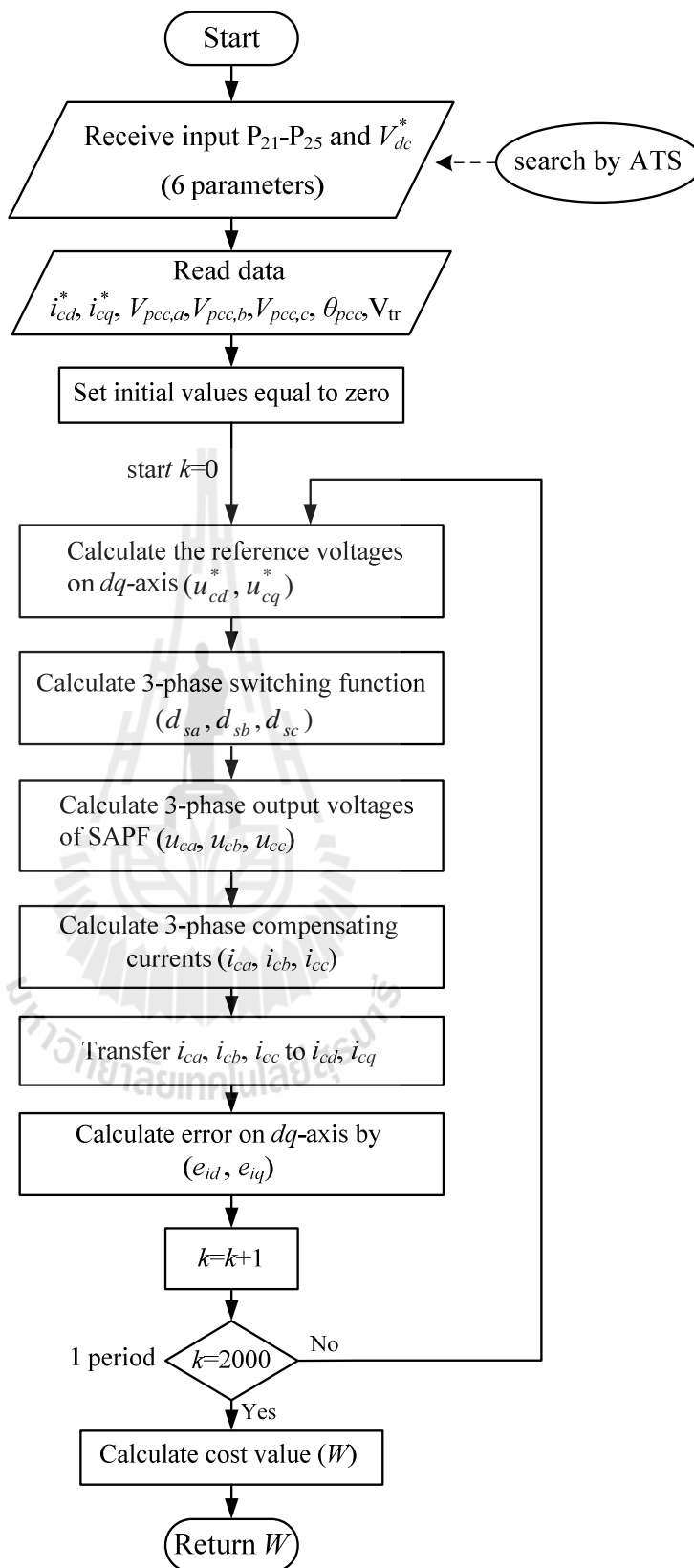
สมาชิกแบบสมมาตร โดยใช้วิธี ATS ตามตารางที่ 7.14 สามารถควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ได้ตลอดรูปสัญญาณ และกระแสชดเชยบนแกนดีคิวดังกล่าว สามารถเกาะกระแสอ้างอิงในช่วงรูปสัญญาณที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดได้ดี ดังรูปขยายของทั้งสองแกน นอกจากนี้ ค่า  $V_{dc}^*$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 3 มีค่าเท่ากับ 351.32 V สามารถส่งเสริมให้กระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีลักษณะตามกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิวได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน

### 7.5.3 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyเฉพาะเอาต์พุตและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (เวอร์ชันที่ 4)



รูปที่ 7.28 โดอะแกรมการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyเฉพาะเอาต์พุตและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS

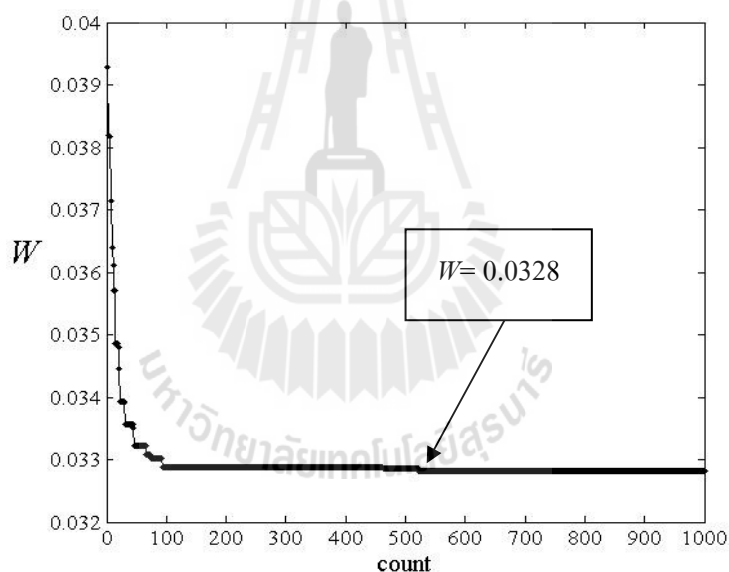
การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 4 จะกำหนดให้ ATS ค้นหาพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเฉพาะเอาต์พุต voltage ในรูปที่ 7.3 ( $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$ ) และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}^*$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (กำหนดให้ค่า  $L_f = 0.018$  H) ซึ่งจะทำให้ลดจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องทำการค้นหาสำหรับการออกแบบในเวอร์ชันที่ 4 เหลือเพียง 6 พารามิเตอร์ ( $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$  และ  $V_{dc}^*$ ) โดยสำหรับค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error และอินพุต error rate จะกำหนดใช้ผลค่าพารามิเตอร์จากการออกแบบด้วยวิธีการลองผิดลองถูกตามชุดข้อมูลที่ 5 ในตารางที่ 7.1 และ 7.2 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากชุดข้อมูลดังกล่าวให้ผลสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยดีที่สุดในเมื่อเทียบกับ 4 ชุดข้อมูลที่เหลือ แผนภาพโดอะแกรมการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyเฉพาะเอาต์พุตและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถ



รูปที่ 7.29 แผนภาพการโปรแกรมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เวนร์ชันที่ 4

แสดงได้ดังรูปที่ 7.28 โดยแผนภาพการ โปรแกรมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในไดอะแกรมการ ออกแบบดังกล่าว สามารถดูได้จากรูปที่ 7.29

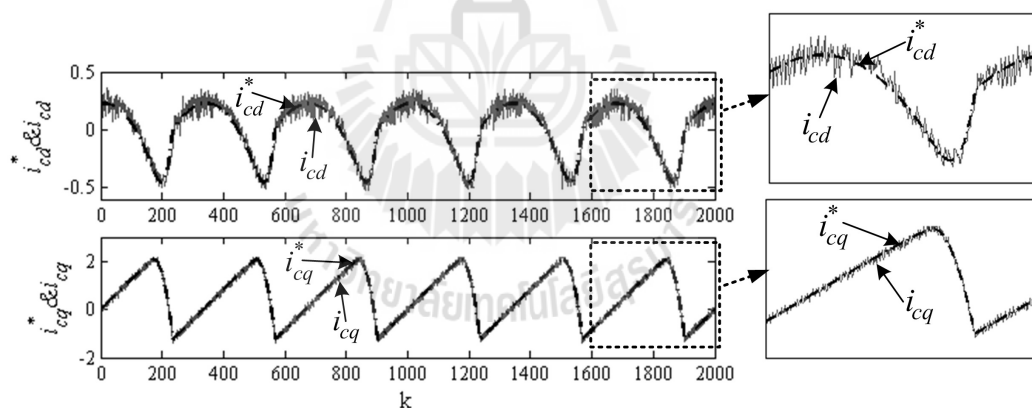
จากการอธิบายการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีเฉพาะ เอาต์พุตและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS ข้างต้น เมื่อ กำหนดให้ ATS ดำเนินการค้นหาค่าพารามิเตอร์  $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$  และ  $V_{dc}^*$  ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด เท่ากับ 1000 รอบ สามารถแสดงผลการลู่เข้าค่า  $W$  ดีที่สุด ได้ดังรูปที่ 7.30 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ ว่า ATS สามารถค้นพบคำตอบค่า  $W$  ที่น้อยที่สุด ซึ่งมีเท่ากับ 0.0328 ที่รอบการค้นหาเท่ากับ 522 โดยที่ค่า  $W$  ดังกล่าว ได้ผลค่าพารามิเตอร์  $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$  และ  $V_{dc}^*$  แสดงได้ดังตารางที่ 7.15 (ส่วนที่แ เรง) และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ในตารางดังกล่าวไปดำเนินการจำลองสถานการณ์โดยใช้ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์เวอร์ชันที่ 4 บนโปรแกรม M-file ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชย บนแกนดีคิวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.31



รูปที่ 7.30 ผลการลู่เข้าของ  $W$  สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัว ควบคุมพีชชีเฉพาะเอาต์พุตและค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

ตารางที่ 7.15 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyเฉพาะเอาต์พุตและค่าแรงดันไฟฟ้าตรงอ้างอิงของวงจรรอกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error												
P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>13</sub>
-0.17	-0.10	-0.14	-0.08	-0.03	-0.05	0.00	0.05	0.03	0.08	0.14	0.10	0.17
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate												
P <sub>14</sub>	P <sub>15</sub>	P <sub>16</sub>	P <sub>17</sub>	P <sub>18</sub>	P <sub>19</sub>	P <sub>20</sub>						
-0.55	-0.05	-0.10	0.00	0.10	0.05	0.55						
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage												
P <sub>21</sub>	P <sub>22</sub>	P <sub>23</sub>	P <sub>24</sub>	P <sub>25</sub>								
-199.41	-116.21	3.547	119.59	159.17								
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ												
$V_{dc}^*$			$L_f$									
351.83			0.018									



รูปที่ 7.31 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวสำหรับการออกแบบในเวอร์ชันที่ 4

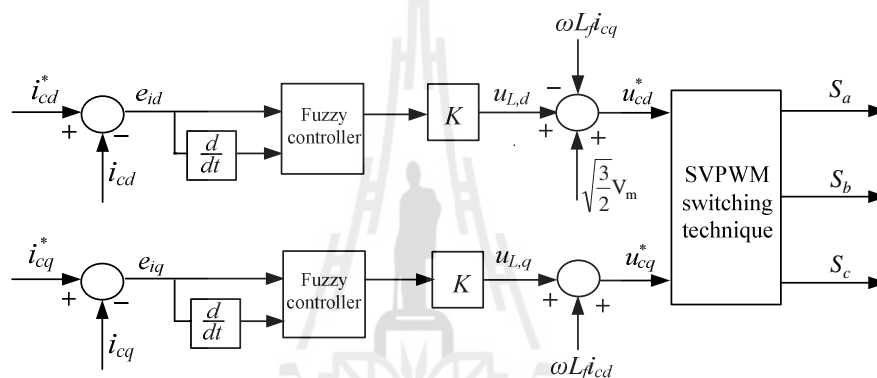
จากรูปที่ 7.31 สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมฟuzzyที่ได้ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกโดยใช้วิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 4 สามารถควบคุมกระแสชดเชย ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ตลอดรูปสัญญาณ โดยเมื่อขยายรูปของทั้งสองแกน พบว่า กระแสชดเชยบนแกนดีคิวสามารถเกาะกระแสอ้างอิงในช่วงรูปสัญญาณที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดได้ดี นอกจากนี้ ค่า  $V_{dc}^*$  ของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 4



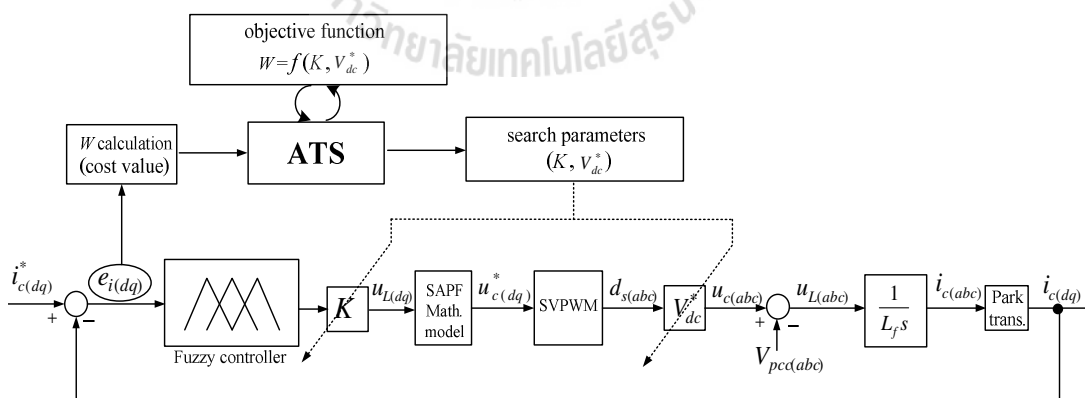
เท่ากับ 351.83 V สามารถส่งเสริมให้กระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิวมีลักษณะตามกระแสอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน

### 7.5.4 การออกแบบค่าตัวประกอบปรับเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzyและค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS (เวอร์ชันที่ 5)

การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyในเวอร์ชันที่ 5 จะใช้วิธีการออกแบบค่าตัวประกอบปรับเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzyแทนการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก โดยโครงสร้างของระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวร่วมกับการใช้ตัวควบคุมฟuzzyและค่าตัวประกอบ  $K$  สำหรับใช้ปรับเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzy สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.32 ดังนี้



รูปที่ 7.32 ระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyและตัวประกอบ  $K$



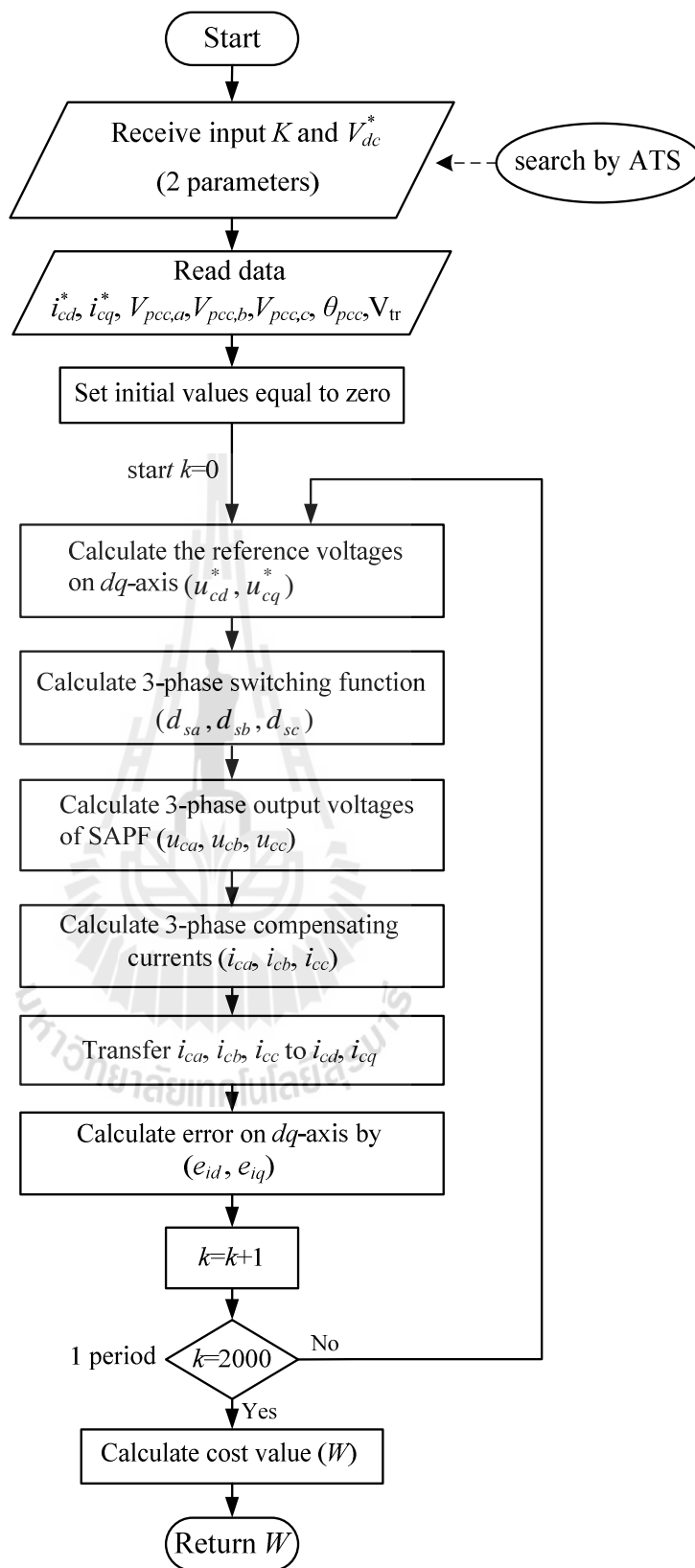
รูปที่ 7.33 ไคอะแกรมการออกแบบค่าตัวประกอบปรับเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzyและค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS

การออกแบบค่าตัวประกอบ  $K$  สำหรับใช้ปรับเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชี และค่า  $V_{dc}^*$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS สามารถแสดงไดอะแกรมการออกแบบได้ดังรูปที่ 7.33 โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{25}$  ของตัวควบคุมพีชชี มีค่าตามชุดข้อมูลที่ 5 ในตารางที่ 7.1 ถึง 7.3 ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการลองผิดลองถูกที่ดีที่สุด และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์  $L_f$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 0.018 H จากรูปที่ 7.33 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับใช้ออกแบบค่าพารามิเตอร์  $K$  และ  $V_{dc}^*$  (2 พารามิเตอร์) สามารถแสดงรายละเอียดแผนภาพการโปรแกรมได้ดังรูปที่ 7.34

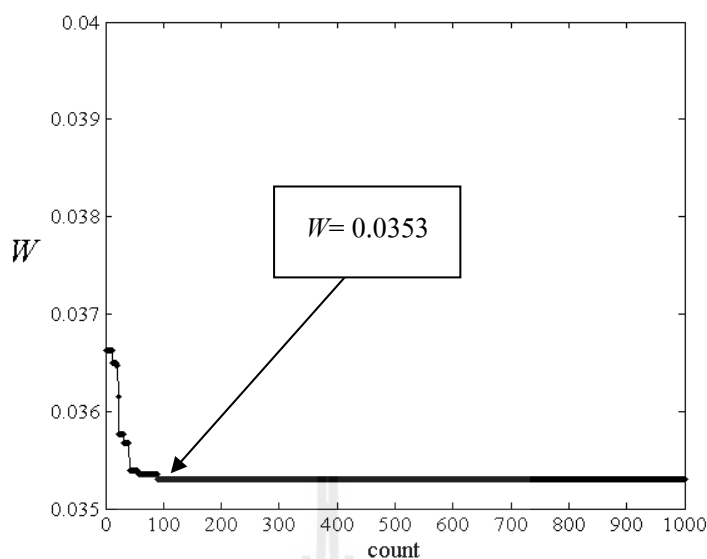
การออกแบบค่าพารามิเตอร์  $K$  และ  $V_{dc}^*$  โดยใช้ ATS ดำเนินการค้นหาในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 1000 รอบ (ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ ATS ใช้เหมือนกับการออกแบบในเวอร์ชันที่ 1 ในหัวข้อ 7.4) โดยผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว แสดงการลู่เข้าของค่า  $\mathcal{W}$  ที่ดีที่สุด ได้ดังรูปที่ 7.35 จากรูปดังกล่าว ค่า  $\mathcal{W}$  ได้ลู่เข้าค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.0353 ที่รอบการค้นหาเท่ากับ 89 โดยผลค่าพารามิเตอร์  $K$  เท่ากับ 1.8756 และค่า  $V_{dc}^*$  เท่ากับ 356.81 V ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.16 (ส่วนที่แรเงา)

ตารางที่ 7.16 ผลการออกแบบค่าตัวประกอบปรับเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชีและค่าแรงดัน  
บัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error												
$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$
-0.17	-0.10	-0.14	-0.08	-0.03	-0.05	0.00	0.05	0.03	0.08	0.14	0.10	0.17
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate												
$P_{14}$		$P_{15}$		$P_{16}$		$P_{17}$		$P_{18}$		$P_{19}$		$P_{20}$
-0.55		-0.05		-0.10		0.00		0.10		0.05		0.55
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage												
$P_{21}$			$P_{22}$			$P_{23}$			$P_{24}$		$P_{25}$	
-190.00			-60.00			0.00			60.00		190.00	
ค่าตัวประกอบ $K$ และค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ												
$K$				$V_{dc}^*$				$L_f$				
1.8756				356.81				0.018				

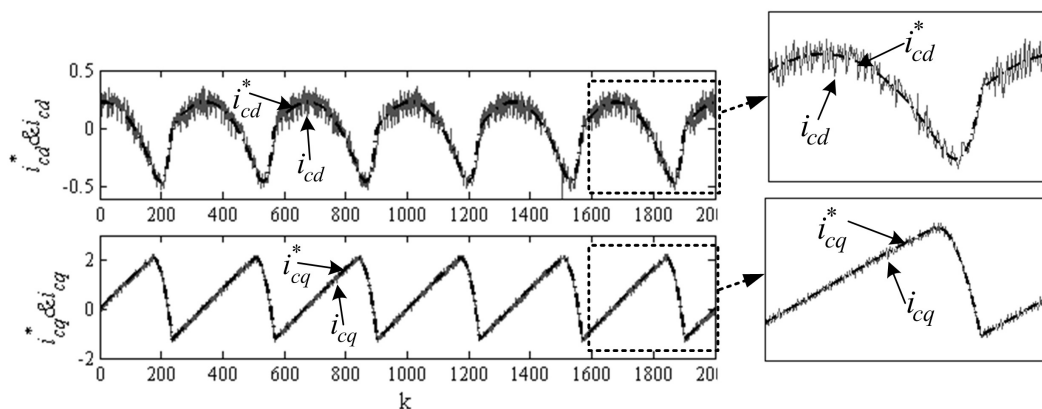


รูปที่ 7.34 แผนภาพการโปรแกรมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เวอร์ชันที่ 5



รูปที่ 7.35 ผลการลู่เข้าของ  $W$  สำหรับการออกแบบค่าตัวประกอบปรับเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชซี และค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS

จากผลค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบตามตารางที่ 7.16 นำไปจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิวโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เวอร์ชันที่ 5 บนโปรแกรม M-file สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 7.36 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีชซีที่ได้จากการออกแบบในเวอร์ชันที่ 5 สามารถควบคุมกระแสชดเชย ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ได้ดีตลอดรูปสัญญาณ อีกทั้งยังสามารถเกาะกระแสอ้างอิงได้ดีในช่วงรูปสัญญาณที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด ดังรูปขยายของทั้งสองแกน นอกจากนี้ วงจรรองกำลังแอกทีฟที่มีค่า  $V_{dc}^*$  เท่ากับ 356.81 V สามารถส่งเสริมให้กระแสชดเชยบนแกนดีคิวมีลักษณะตามกระแสอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลดังกล่าว หมายความว่า การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซี สามารถออกแบบเฉพาะค่าตัวประกอบ  $K$  สำหรับใช้ปรับค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชซีได้ ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว สามารถส่งผลให้การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟมีประสิทธิภาพที่ดีได้เช่นกัน

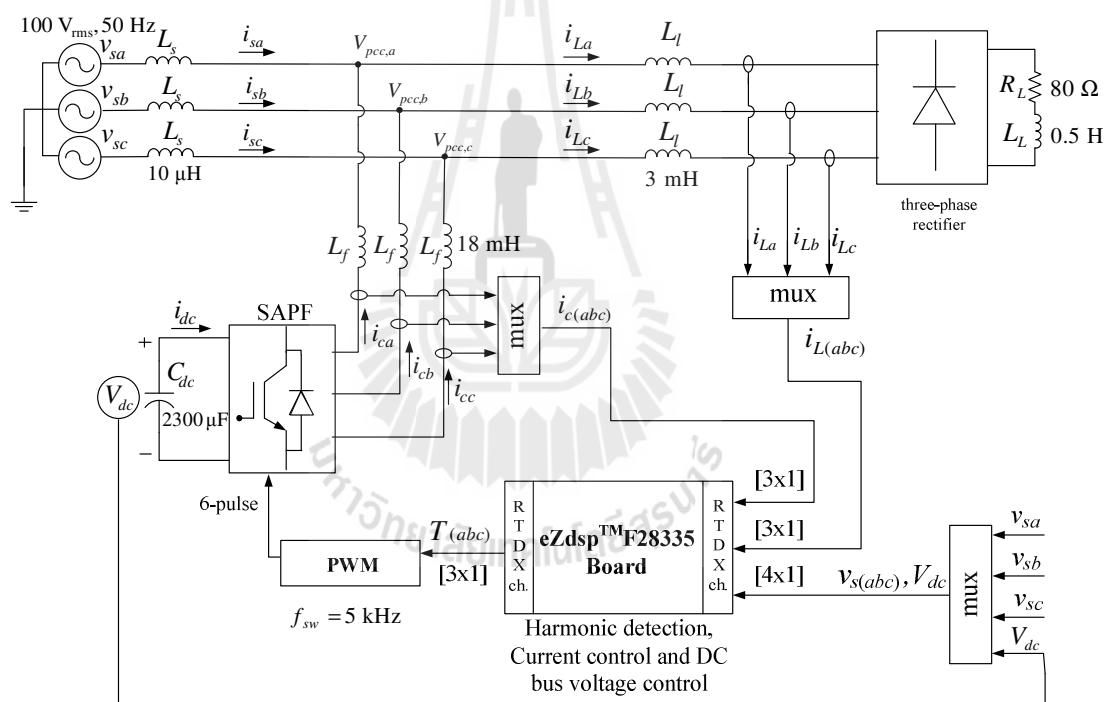


รูปที่ 7.36 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว  
สำหรับการออกแบบในเวอร์ชันที่ 5

จากการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS ทั้งห้าเวอร์ชัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า  $W$  ในแต่ละเวอร์ชันพบว่า การออกแบบสำหรับเวอร์ชันที่ 1 ซึ่งดำเนินการให้ ATS ค้นหาพารามิเตอร์ทั้งหมด 27 พารามิเตอร์ ให้ค่า  $W$  น้อยที่สุด เท่ากับ 0.0213 ในขณะที่การพัฒนาการออกแบบสำหรับเวอร์ชันที่ 2 (ATS ค้นหา 26 พารามิเตอร์) ให้ค่า  $W$  เท่ากับ 0.0268 เวอร์ชันที่ 3 (ATS ค้นหา 12 พารามิเตอร์) ให้ค่า  $W$  เท่ากับ 0.0310 เวอร์ชันที่ 4 (ATS ค้นหา 6 พารามิเตอร์) ให้ค่า  $W$  เท่ากับ 0.0328 และเวอร์ชันที่ 5 (ATS ค้นหา 2 พารามิเตอร์) ให้ค่า  $W$  เท่ากับ 0.0353 อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาผลสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมฟัซซีที่ได้จากการออกแบบของแต่ละเวอร์ชัน พบว่า ทุกเวอร์ชันสามารถออกแบบให้ตัวควบคุมฟัซซีมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ ในแต่ละเวอร์ชัน สามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เหมาะสมกับระบบพิจารณาได้เช่นกัน จากผลดังกล่าว จึงทำให้การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 5 เหมาะกับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติมากที่สุด เนื่องจากการออกแบบในเวอร์ชันดังกล่าว มีจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องทำการออกแบบน้อยที่สุดเพียง 2 พารามิเตอร์ ( $K$  และ  $V_{dc}^*$ ) ซึ่งจะช่วยลดการใช้หน่วยความจำของ ATS สำหรับการดำเนินการออกแบบในแต่ละครั้ง และจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในกรณีที่โหลดกระแสฮาร์มอนิกของระบบที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลง และจำเป็นจะต้องทำการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีใหม่ เพื่อให้มีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีขึ้น การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีจากการออกแบบด้วยวิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 5 สามารถดูรายละเอียดได้จากหัวข้อต่อไป

## 7.6 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย

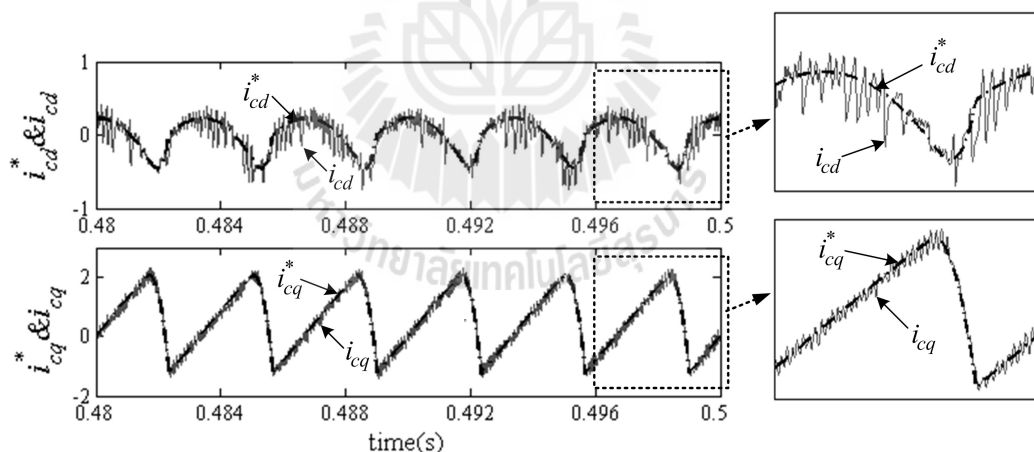
การจำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้ คือ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย (ระบบดังรูปที่ 5.10 ในบทที่ 5) เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมฟuzzyที่ได้จากการออกแบบโดยใช้วิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 5 ตามตารางที่ 7.16 โดยกำหนดให้ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 356.81 V ซึ่งได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 5 เช่นกัน จากระบบที่พิจารณาในรูป 5.10 ในบทที่ 5 นำมาแสดงใหม่สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.37 ดังนี้



รูปที่ 7.37 ระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

จากรูปที่ 7.37 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ได้แก่ ระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับโหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด  $R = 80 \Omega$  และ  $L = 0.5 \text{ H}$  และเชื่อมต่อกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จะกำหนดสร้างโดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม Simulink ส่วนระบบควบคุม ได้แก่ การตรวจฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF การควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy และการ

ควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ (การออกแบบตัวควบคุมพีไอสามารถดูได้จากบทที่ 4) จะถูกคำนวณบนบอร์ด eZdsp™ F28335 โดยอินพุตการคำนวณ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟส ( $v_{s(abc)}$ ) และค่าแรงดันบัลไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ขนาดข้อมูลเท่ากับ  $[4 \times 1]$  ค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดสามเฟส ( $i_{L(abc)}$ ) ขนาดข้อมูลเท่ากับ  $[3 \times 1]$  และค่ากระแสชดเชยสามเฟส ( $i_{c(abc)}$ ) ขนาดข้อมูลเท่ากับ  $[3 \times 1]$  โดยอินพุตดังกล่าว จะถูกส่งจากโปรแกรม Simulink ไปยังบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX 3 ช่อง นอกจากนี้ เอาต์พุตที่ได้จากคำนวณของบอร์ด eZdsp™ F28335 คือ ค่าสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์สามเฟส ( $T_{(abc)}$ ) ของเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM ที่มีขนาดข้อมูลเท่ากับ  $[3 \times 1]$  จะถูกส่งกลับมายังโปรแกรม Simulink ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX 1 ช่อง เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยมสำหรับการสร้างพัลส์ การควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้ง 6 สวิตช์ต่อไป จากระบบดังกล่าว ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวในช่วงเวลา 0.48 ถึง 0.5 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.38 และผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ในช่วงเวลา 0.4 ถึง 0.5 วินาที แสดงได้ดังรูปที่ 7.39 ถึง 7.41 ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัลไฟตรง ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.5 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.42

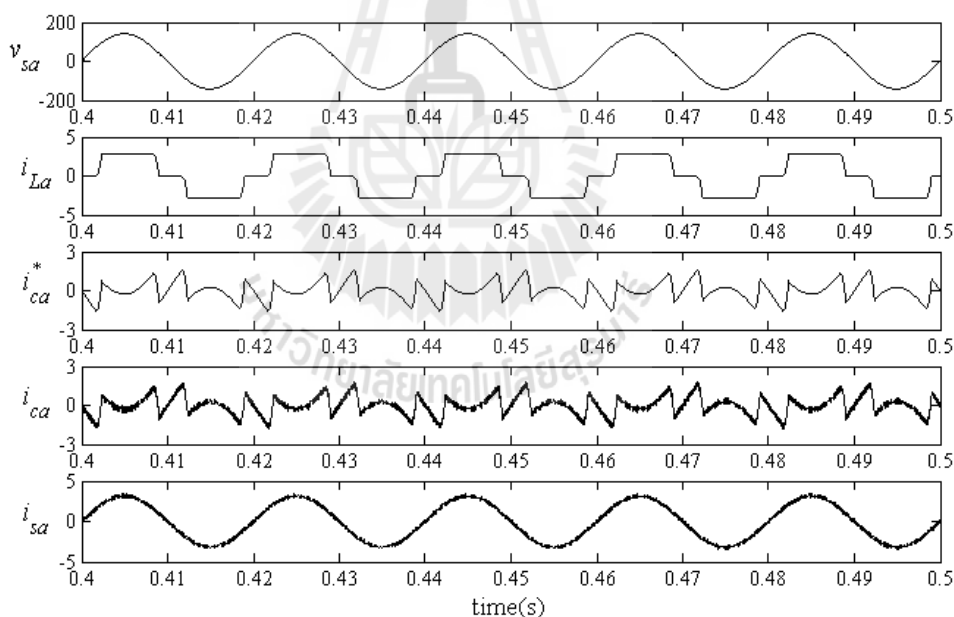


รูปที่ 7.38 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวโดยใช้ตัวควบคุมพีซีซีจากการออกแบบด้วยวิธี ATS

จากรูปที่ 7.38 ผลการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบระหว่างรูปสัญญาณกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF บนแกนดีคิว ซึ่งสังเกตได้ว่า กระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง

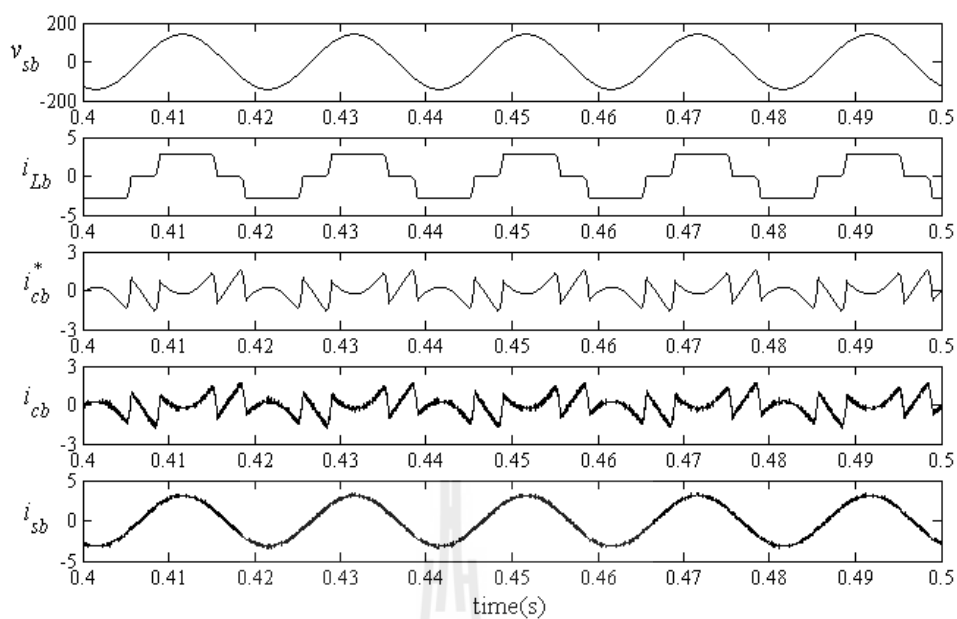
$(i_{ca}^*, i_{cb}^*)$  ได้ดีตลอดรูปสัญญาณ และเมื่อพิจารณารูปสัญญาณกระแสอ้างอิงในช่วงที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด พบว่า กระแสชดเชยสามารถเกาะตามค่ากระแสอ้างอิงได้ทั้งสองแกนดังรูปขยายที่แสดงไว้ด้านข้าง จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นแล้วว่า ตัวควบคุมพีชซีที่ได้จากการออกแบบโดยใช้วิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 5 มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

จากรูปที่ 7.39 ถึง 7.41 สังเกตได้ว่า เมื่อวงจรรอกกำลังแอกทีฟผลิตกระแสชดเชยสามเฟส  $(i_{ca}, i_{cb}, i_{cc})$  ที่มีลักษณะตามกระแสอ้างอิง  $(i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*)$  เข้าสู่ระบบไฟฟ้า ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย  $(i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})$  มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการชดเชยที่จะมีลักษณะรูปสัญญาณเหมือนกับกระแสไฟฟ้ที่โหลด  $(i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc})$  โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  มีค่าเท่ากับ 1.82% 1.92% และ 1.78% ตามลำดับ ในขณะที่ก่อนการชดเชย ค่า %THD ของกระแสดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 26.37% 26.40% และ 26.40% ตามลำดับเฟส ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.17

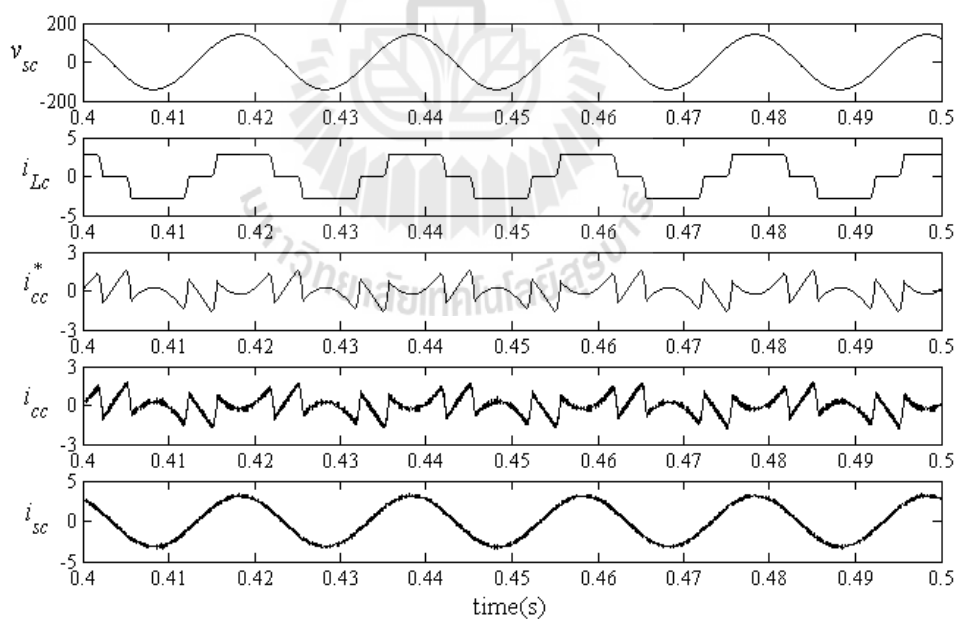


รูปที่ 7.39 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $a$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชย  
ใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบโดยใช้วิธี ATS

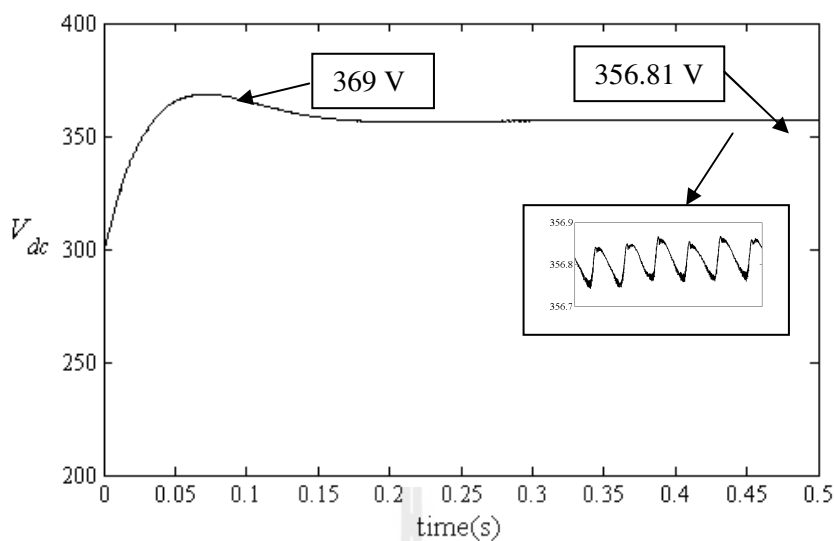




รูปที่ 7.40 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $b$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชย  
ใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบโดยใช้วิธี ATS



รูปที่ 7.41 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $c$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชย  
ใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบโดยใช้วิธี ATS



รูปที่ 7.42 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ได้จากการออกแบบโดยใช้วิธี ATS

จากผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัลไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ที่วัดพร้อมตัวเก็บประจุ  $C_{dc}$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟดังรูปที่ 7.42 สังเกตได้ว่า ในช่วงเวลาเริ่มต้นค่าแรงดันบัลไฟตรงมีค่าขอดีแรงดันสูงสุดประมาณเท่ากับ 369 V ที่เวลา 0.055 วินาที และหลังจากเวลาดังกล่าว ค่าแรงดันบัลไฟตรงได้เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่าแรงดันประมาณเท่ากับ 356.81 V ตามค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง ( $V_{dc}^*$ ) ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS ในเวอร์ชันที่ 5 โดยใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 0.18 วินาที จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบไว้ตามที่ได้ นำเสนอในบทที่ 4 มีสมรรถนะที่ดีและเพียงพอต่อการควบคุมค่าแรงดันไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ตารางที่ 7.17 ค่า %THD กรณีการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีซีซี  
ที่ออกแบบโดยใช้วิธี ATS

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย	
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย
a	26.37%	1.82%
b	26.40%	1.92%
c	26.40%	1.78%
เฉลี่ย	26.39%	1.84%

จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้งหมดข้างต้น จะเห็นได้ว่า การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีจากการออกแบบด้วยวิธี ATS มีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุมให้กระแสชดเชยมีลักษณะตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การพิจารณาออกแบบค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณาโดยใช้วิธี ATS สามารถส่งเสริมให้การฉีดกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

## 7.7 สรุป

การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซี รวมถึงการพิจารณาออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟใหม่ ในบทนี้ได้นำเสนอ การออกแบบโดยใช้วิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS) โดยมีวัตถุประสงค์การค้นหา คือ ค่าความผิดพลาดระหว่างกระแสชดเชยกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF จะต้องมิต่ำน้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อส่งผลให้ค่า  $%THD$  ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าต่ำเช่นกัน การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธี ATS ดังกล่าว ได้พัฒนาการออกแบบแบ่งออกเป็นห้าเวอร์ชัน ซึ่งแต่ละเวอร์ชันพบว่า สามารถให้ผลสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีใกล้เคียงกัน แต่กรณีการออกแบบเวอร์ชันที่ 5 มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากการออกแบบเวอร์ชันดังกล่าว ใช้หน่วยความจำของ ATS สำหรับการดำเนินการออกแบบน้อยที่สุด จึงเหมาะสมอย่างยิ่งกับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดกระแสฮาร์มอนิกและจำเป็นต้องออกแบบตัวควบคุมใหม่ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปของระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีจากการออกแบบด้วยวิธี ATS เวอร์ชันที่ 5 พบว่า ตัวควบคุมพีชซีมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว นอกจากนี้ ผลการออกแบบค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟจากวิธี ATS เวอร์ชันที่ 5 พบว่า มีค่าแรงดันที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา ซึ่งช่วยส่งเสริมให้วงจรรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า  $%THD$  ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย

## บทที่ 8

### การออกแบบตัวควบคุมพีชซีด้วยวิธีการใหม่

#### 8.1 กล่าวนำ

ในบทที่ผ่านมาได้นำเสนอการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซีโดยใช้วิธี ATS ซึ่งวิธีดังกล่าว จะทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับระบบที่พิจารณา อย่างไรก็ตาม การออกแบบด้วยวิธี ATS จำเป็นต้องกำหนดขอบเขตการค้นหาที่เหมาะสม และใช้เวลานานในการค้นหาพารามิเตอร์ รวมถึงความจำเป็นที่จะต้องใช้หน่วยความจำของ ATS มากสำหรับใช้ในการจัดเก็บข้อมูลและประเมินผลคำตอบ ดังนั้น ในบทนี้ผู้วิจัยจึงได้คิดค้นและจะนำเสนอวิธีการใหม่สำหรับการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซีเพื่อใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว รายละเอียดของวิธีการใหม่ รวมถึงการอธิบายการนำไปใช้ออกแบบตัวควบคุมพีชซีสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จะนำเสนอในหัวข้อที่ 8.2 นอกจากนี้ การทดสอบวิธีการใหม่สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีชซีในกรณีระบบที่ต่างกัน 3 ระบบ จะได้นำเสนอด้วยเช่นกัน ซึ่งสามารถดูได้จากหัวข้อที่ 8.3 ถึง 8.5

#### 8.2 การออกแบบตัวควบคุมพีชซีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีการใหม่

##### 8.2.1 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชซี

การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{13}$  ของอินพุต error ในรูปที่ 7.1 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{14}$  ถึง  $P_{20}$  ของอินพุต error rate ในรูปที่ 7.2 และตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$  ของเอาต์พุต voltage ในรูปที่ 7.3 (บทที่ 7) ของตัวควบคุมพีชซีด้วยวิธีการใหม่จะได้นำเสนอในบทนี้ โดยวิธีการใหม่ดังกล่าว จะใช้การคำนวณที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งสามารถแบ่งการคำนวณได้ 10 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณหาค่ากระแสอ้างอิง ( $I_{ref}$ ) แบบค่ายอดต่ำสุดถึงสูงสุด (peak to peak) บนแกนดีคิว โดยเลือกขนาดของกระแสอ้างอิงบนแกนที่มีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ (8.1)

$$I_{ref} = \min(I_{cd}^*, I_{cq}^*) \quad (8.1)$$

โดยที่  $I_{cd}^*$  และ  $I_{cq}^*$  คือ ขนาดของกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีและแกนคิวแบบค่ายอดต่ำสุดถึงสูงสุด ตามลำดับ

ขั้นที่ 2 คำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิง ( $u_{ref}$ ) สูงสุดสำหรับการชดเชย โดยใช้สมการที่ (8.2) ดังนี้

$$u_{ref} \approx L_f A_{max} 2\pi f_h \quad (8.2)$$

โดยที่  $A_{max}$  คือ ขนาดกระแสฮาร์มอนิกที่มีค่าสูงสุดบนแกนดีคิว

$f_h$  คือ ค่าความถี่ลำดับฮาร์มอนิกที่มีขนาดกระแสสูงสุดบนแกนดีคิว

ขั้นที่ 3 คำนวณหาค่าตัวประกอบปรับลดขนาดกระแสอ้างอิงสูงสุด ( $D_{max}$ ) โดยใช้สมการที่ (8.3) จากสมการดังกล่าว ค่าตัวประกอบ  $U$  ควรกำหนดให้มีค่ามากกว่า 1 ( $U > 1$ ) ทั้งนี้เพื่อให้วงจรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยเกาะตามกระแสอ้างอิงได้ในช่วงรูปสัญญาณที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด

$$D_{max} = \frac{(U u_{ref}) T}{L_f I_{ref}} \quad (8.3)$$

โดยที่  $U$  คือ ค่าตัวประกอบปรับเพิ่มขนาดแรงดันอ้างอิง

$T$  คือ ช่วงเวลาในการชั้คตัวอย่าง (วินาที)

ขั้นที่ 4 กำหนดเลือกค่าตัวประกอบปรับลดขนาดกระแสอ้างอิง ( $D$ ) ที่อยู่ในช่วงมากกว่าศูนย์และน้อยกว่าเท่ากับค่า  $D_{max}$  ( $0 < D \leq D_{max}$ )

ขั้นที่ 5 คำนวณหาขนาดค่าความผิดพลาดสูงสุด ( $e_{max}$ ) โดยใช้สมการที่ (8.4) สำหรับกำหนดใช้เป็นขอบเขตความกว้างฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error

$$e_{max} = D I_{ref} \quad (8.4)$$

ขั้นที่ 6 คำนวณค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{13}$  ของอินพุต error แบบสมมาตร โดยอาศัยค่า  $e_{max}$  ที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 5 แสดงได้ดังตารางที่ 8.1

ขั้นที่ 7 กำหนดเลือกค่าอัตราความผิดพลาดสูงสุด ( $er_{max}$ ) สำหรับกำหนดใช้เป็นขอบเขตความกว้างฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate โดยการกำหนดค่าดังกล่าว ควรออกแบบให้มีค่าน้อยเข้าใกล้ศูนย์ ทั้งนี้เพื่อให้ตัวควบคุมฟัซซีสามารถตรวจสอบทิศทางการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกระแสชดเชยที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยได้

ขั้นที่ 8 กำหนดค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{14}$  ถึง  $P_{20}$  ของอินพุต error rate แบบสมมาตร โดยอาศัยค่า  $er_{max}$  ดังแสดงในตารางที่ 8.1

ขั้นที่ 9 กำหนดค่าแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีสูงสุด ( $V_{max}$ ) โดยใช้สมการที่ (8.5) สำหรับกำหนดใช้เป็นขอบเขตความกว้างฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage

$$V_{max} = Uu_{ref} \quad (8.5)$$

ขั้นที่ 10 กำหนดค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$  ของเอาต์พุต voltage แบบสมมาตร โดยอาศัยค่า  $V_{max}$  ดังแสดงไว้ในตารางที่ 8.1 เช่นกัน

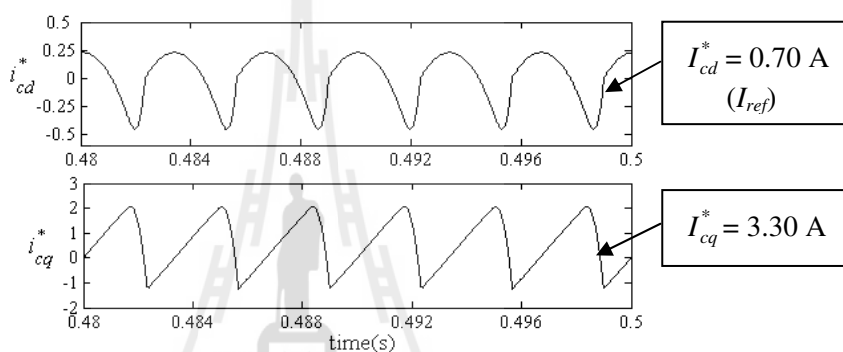
ตารางที่ 8.1 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีด้วยวิธีการใหม่

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error												
P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>13</sub>
$-e_{max}$	$-e_{max}/2$	$-e_{max}$	$-e_{max}/2$	0	$-e_{max}/2$	0	$e_{max}/2$	0	$e_{max}/2$	$e_{max}$	$e_{max}/2$	$e_{max}$
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate												
P <sub>14</sub>		P <sub>15</sub>		P <sub>16</sub>		P <sub>17</sub>		P <sub>18</sub>		P <sub>19</sub>		P <sub>20</sub>
$-er_{max}$		0		$-er_{max}$		0		$er_{max}$		0		$er_{max}$
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage												
P <sub>21</sub>		P <sub>22</sub>		P <sub>23</sub>		P <sub>24</sub>		P <sub>25</sub>				
$-V_{max}$		$-V_{max}/2$		0		$V_{max}/2$		$V_{max}$				

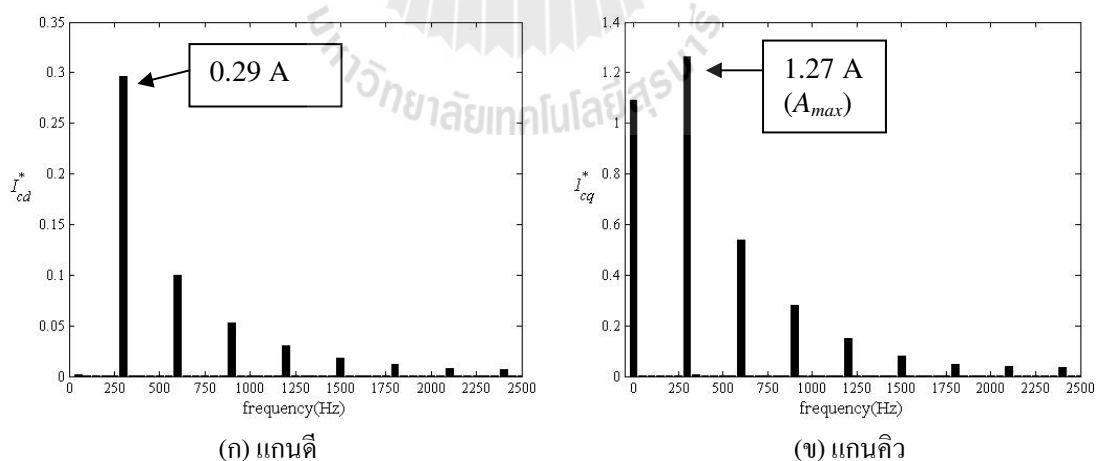
จากขั้นตอนการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีด้วยวิธีการใหม่ ข้างต้น ลำดับต่อมาจะเป็นการอธิบายตัวอย่างการนำไปใช้ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับระบบการกำจัดฮาร์มอนิกที่พิจารณา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 8.2.2 การออกแบบตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบที่พิจารณา

การออกแบบตัวควบคุมพีชชีด้วยวิธีการใหม่ตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 8.2.1 จะถูกนำมาใช้ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอคทีฟในระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 5.10 ในบทที่ 5 โดยจากระบบดังกล่าว เมื่อทำการจำลองสถานการณ์การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF เพื่อคำนวณหารูปสัญญาณกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในช่วงเวลา 0.48 ถึง 0.50 วินาที ได้ดังรูปที่ 8.1 และเมื่อทำการวิเคราะห์สเปกตรัมทางความถี่ของรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงดังกล่าว สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 8.2 ดังนี้



รูปที่ 8.1 กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิว



รูปที่ 8.2 สเปกตรัมขนาดกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิว

จากข้อมูลกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยของระบบข้างต้น สามารถดำเนินการออกแบบการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{13}$  ของอินพุต error ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก

$P_{14}$  ถึง  $P_{20}$  ของอินพุต error rate และตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$  ของเอาต์พุต voltage ของตัวควบคุมฟัซซี ได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่ากระแสอ้างอิง ( $I_{ref}$ ) ของระบบ โดยจากรูปที่ 8.1 จะพบว่า ขนาดกระแสอ้างอิงบนแกนดีแบบค่ายอดต่ำสุดถึงสูงสุด ( $I_{cd}^*$ ) มีค่าเท่ากับ 0.70 A และขนาดกระแสอ้างอิงแบบค่ายอดต่ำสุดถึงสูงสุดบนแกนคิว ( $I_{cq}^*$ ) มีค่าเท่ากับ 3.30 A ดังนั้น จากสมการที่ (8.1) จะได้ว่า ค่า  $I_{ref}$  ของระบบมีค่าเท่ากับ 0.70 A ดังนี้

$$I_{ref} = \min(0.70, 3.30) = 0.70 \text{ A}$$

ขั้นที่ 2 คำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิง ( $u_{ref}$ ) ของระบบ ซึ่งจากรูปที่ 8.2 สังเกตได้ว่าขนาดกระแสฮาร์มอนิกที่มีค่าสูงสุด ( $A_{max}$ ) ปรากฏอยู่บนแกนคิวเท่ากับ 1.27 A โดยค่าความถี่ลำดับฮาร์มอนิกที่มีขนาดกระแสสูงสุด ( $f_h$ ) ดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 300 Hz ดังนั้น เมื่อแทนค่า  $A_{max}$  และ  $f_h$  ลงในสมการที่ (8.2) จะได้ว่า  $u_{ref}$  ของระบบประมาณเท่ากับ 43 V ดังนี้ (โดยค่า  $L_f$  ของระบบมีค่าเท่ากับ 0.018 H)

$$u_{ref} \approx 0.018 \times 1.27 \times 2\pi \times 300 \approx 43 \text{ V}$$

ขั้นที่ 3 คำนวณหาค่าตัวประกอบปรับลดขนาดกระแสอ้างอิงสูงสุด ( $D_{max}$ ) ซึ่งจากค่า  $u_{ref}$  เท่ากับ 43 V ค่า  $I_{ref}$  เท่ากับ 0.70 A และค่า  $L_f$  ของวงจรรองกำลังแอฟทีฟที่มีค่าเท่ากับ 0.018 H จะสามารถคำนวณค่า  $D_{max}$  ตามสมการที่ (8.3) ได้เท่ากับ 0.17 โดยการออกแบบกำหนดให้ค่าตัวประกอบ  $U$  เท่ากับ 5 (ทั้งนี้เพื่อให้วงจรรองกำลังแอฟทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดได้ประมาณ 5 เท่าของกระแสอ้างอิง) และกำหนดใช้ช่วงเวลาในการชักตัวอย่าง ( $T$ ) เท่ากับ 10 ไมโครวินาที

$$D_{max} = \frac{5(43)(1 \times 10^{-5})}{0.018(0.70)} = 0.17$$

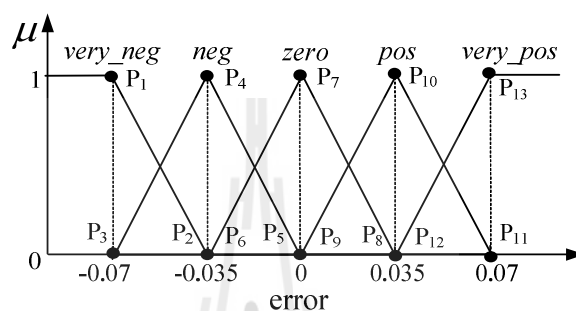
ขั้นที่ 4 กำหนดเลือกค่าตัวประกอบปรับลดขนาดกระแสอ้างอิง ( $D$ ) ตามเงื่อนไข  $0 < D \leq D_{max}$  ซึ่งจากค่า  $D_{max}$  เท่ากับ 0.17 เพราะฉะนั้น ผู้วิจัยจึงกำหนดให้ค่าตัวประกอบ  $D$  เท่ากับ 0.1

ขั้นที่ 5 คำนวณหาขนาดค่าความผิดพลาดสูงสุด ( $e_{max}$ ) ซึ่งจากค่า  $I_{ref}$  ของระบบที่มีค่าเท่ากับ 0.7 A และจากการกำหนดให้ค่าตัวประกอบ  $D$  เท่ากับ 0.1 จะสามารถคำนวณค่า  $e_{max}$  ตามสมการที่ (8.4) ได้เท่ากับ 0.07 A ดังนี้



$$e_{max} = 0.1(0.7) = 0.07 \text{ A}$$

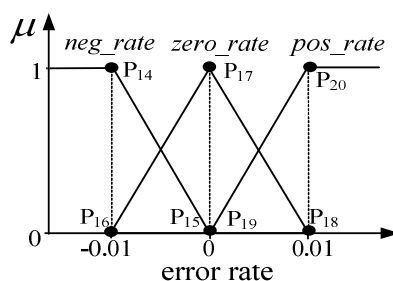
ขั้นที่ 6 กำหนดค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{13}$  ของอินพุต error โดยการแทนค่า  $e_{max}$  เท่ากับ 0.07 ลงในตารางที่ 8.1 ซึ่งสุดท้ายจะได้ผลการออกแบบค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{13}$  แสดงดังรูปที่ 8.3 ( $P_1, P_3 = -0.07$ ,  $P_2, P_4, P_6 = -0.035$ ,  $P_5, P_7, P_9 = 0$ ,  $P_8, P_{10}, P_{12} = 0.035$ ,  $P_{11}, P_{13} = 0.07$ )



รูปที่ 8.3 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error ด้วยวิธีการใหม่

ขั้นที่ 7 กำหนดเลือกค่าอัตราความผิดพลาดสูงสุด ( $er_{max}$ ) ที่มีค่าน้อยเท่ากับ 0.01 ทั้งนี้เพื่อให้ตัวควบคุมพีชชีสามารถตรวจสอบทิศทางการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกระแสชดเชยที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่ากับ 1% ได้

ขั้นที่ 8 กำหนดค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{14}$  ถึง  $P_{20}$  ของอินพุต error rate โดยแทนค่า  $er_{max}$  เท่ากับ 0.01 ลงในตารางที่ 8.1 ซึ่งจะได้ผลการกำหนดออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{14}$  ถึง  $P_{20}$  ดังรูปที่ 8.4 ( $P_{14}, P_{16} = -0.01$ ,  $P_{15}, P_{17}, P_{19} = 0$ ,  $P_{18}, P_{20} = 0.01$ )

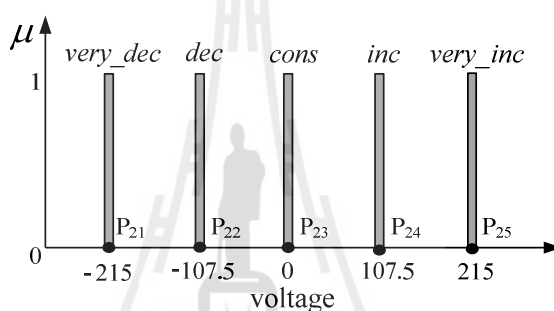


รูปที่ 8.4 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate ด้วยวิธีการใหม่

ขั้นที่ 9 คำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชีสูงสุด ( $V_{max}$ ) ซึ่งจากค่า  $u_{ref}$  เท่ากับ 43 V และการออกแบบกำหนดให้ค่าตัวประกอบ  $U$  มีค่าเท่ากับ 5 จะสามารถคำนวณค่า  $V_{max}$  ตามสมการที่ (8.5) ได้ค่าเท่ากับ 215 V ดังนี้

$$V_{max} = 5(43) = 215 \text{ V}$$

ขั้นที่ 10 คำนวณค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$  ของเอาต์พุต voltage โดยการแทนค่า  $V_{max}$  เท่ากับ 215 V ลงในตารางที่ 8.1 ซึ่งจะได้ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$  แสดงดังรูปที่ 8.5 ดังนี้ ( $P_{21} = -215$ ,  $P_{22} = -107.5$ ,  $P_{23} = 0$ ,  $P_{24} = 107.5$ ,  $P_{25} = 215$ )

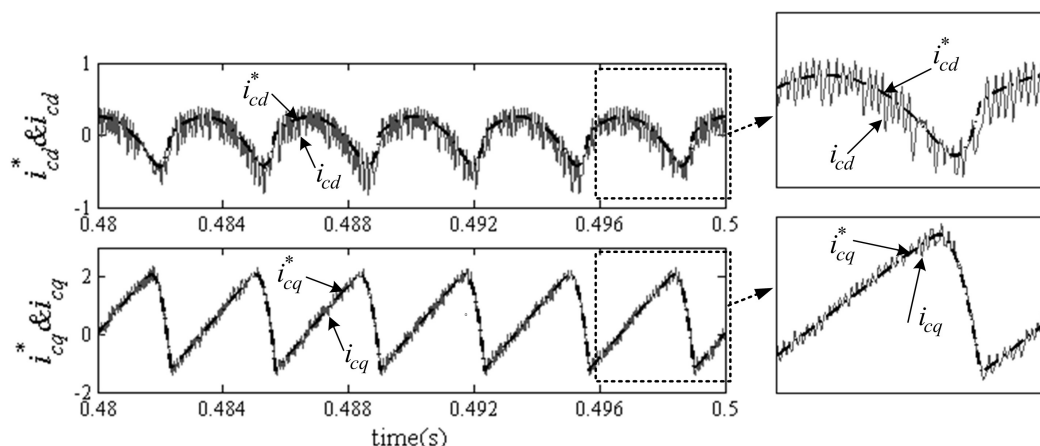


รูปที่ 8.5 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage ด้วยวิธีการใหม่

จากผลการออกแบบตัวควบคุมพีชชีข้างต้น ลำดับต่อไป คือ การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟในระบบที่พิจารณา ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จากหัวข้อต่อไปนี้

### 8.2.3 การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีชชีที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่

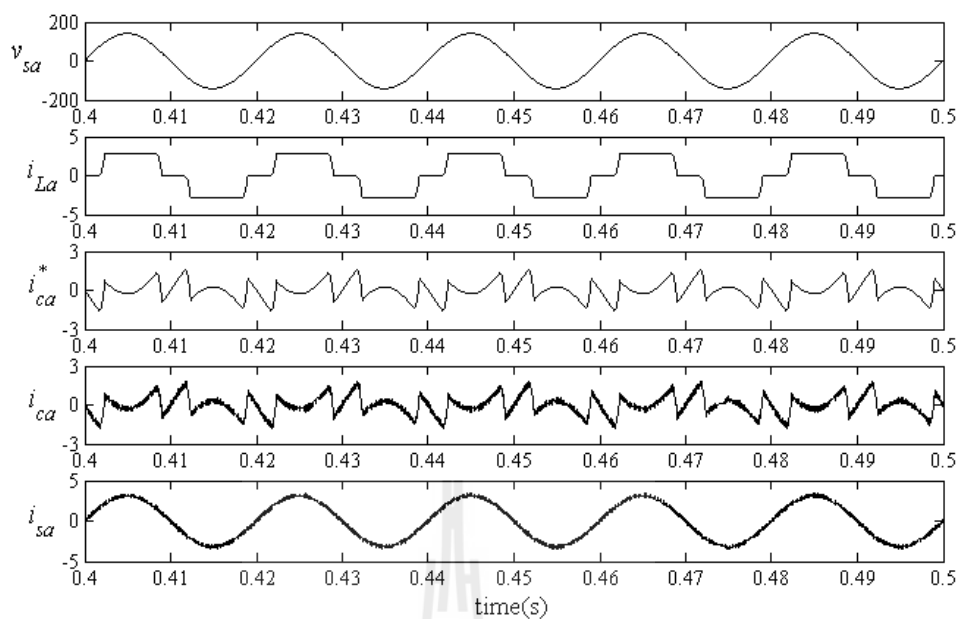
การจำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้ จะใช้ระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปดังรูปที่ 7.38 ในบทที่ 7 โดยในส่วนของตัวควบคุมพีชชีที่ใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่คำนวณอยู่บนบอร์ด eZdsp™ F28335 จะกำหนดให้ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกมีค่าตามผลการออกแบบด้วยวิธีการใหม่ดังรูปที่ 8.3 ถึง 8.5 นอกจากนี้ ค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง ( $V_{dc}^*$ ) ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 360 V (ตามการออกแบบนำเสนอไว้ในบทที่ 4) จากระบบดังกล่าว ผลการจำลองสถานการณ์ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



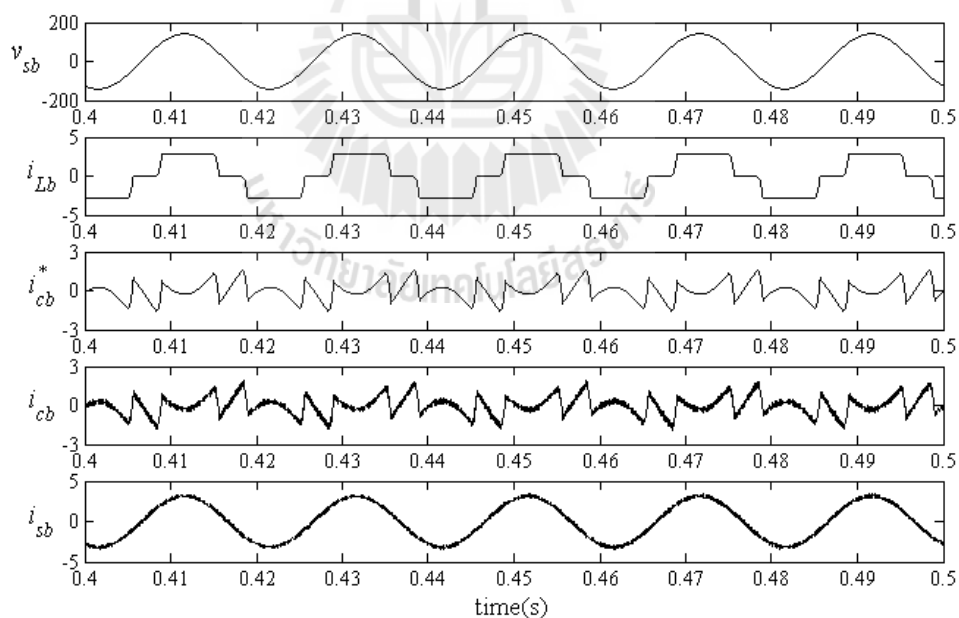
รูปที่ 8.6 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวโดยใช้ตัวควบคุมพีชซีจากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่

ผลการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบระหว่างกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟกับกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิวในช่วงเวลา 0.48 ถึง 0.5 วินาที แสดงได้ดังรูปที่ 8.6 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า กระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิว ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ตลอดรูปสัญญาณ โดยจากรูปขยายจะเห็นได้ว่า กระแสชดเชยสามารถเกาะตามกระแสอ้างอิงได้ดีในช่วงรูปสัญญาณที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด ซึ่งจากผลดังกล่าวหมายความว่า ตัวควบคุมพีชซีที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่ มีสมรรถนะที่ดีสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

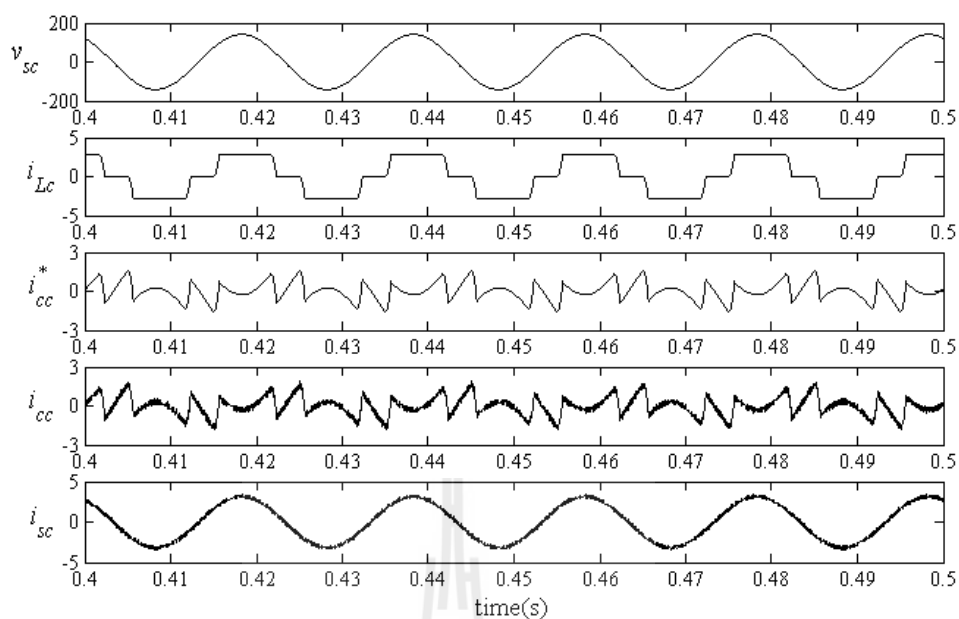
ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในช่วงเวลา 0.4 วินาที ถึง 0.5 วินาที ของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  แสดงได้ดังรูปที่ 8.7 ถึง 8.9 ตามลำดับ จากผลดังกล่าว สังเกตได้ว่า กระแสชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ ) ที่ฉีดโดยวงจรรองกำลังแอกทีฟมีลักษณะคล้ายตามรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงสามเฟส ( $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ ) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟส ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) ภายหลังการชดเชยกลับมามีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย (รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชยจะมีลักษณะรูปสัญญาณเหมือนกับกระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ )) โดยวัดค่า  $\%THD$  ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ได้เท่ากับ 1.67% 1.65% และ 1.50% ตามลำดับ ในขณะที่ก่อนการชดเชยค่า  $\%THD$  ของกระแสดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 26.37% 26.40% และ 26.40% ตามลำดับ ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 8.2



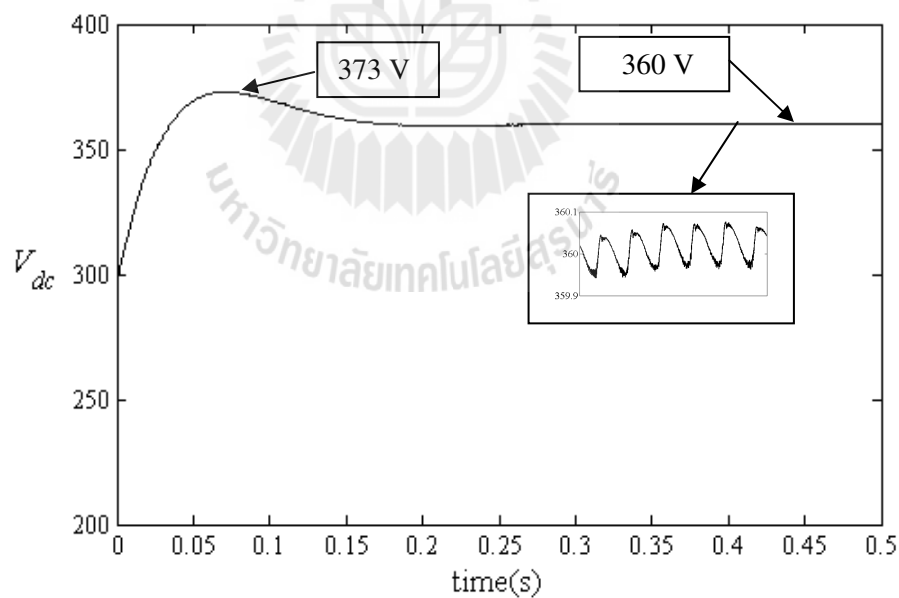
รูปที่ 8.7 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $a$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชย  
ใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบโดยใช้วิธีการใหม่



รูปที่ 8.8 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $b$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชย  
ใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบโดยใช้วิธีการใหม่



รูปที่ 8.9 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $c$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชย  
ใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบโดยใช้วิธีการใหม่



รูปที่ 8.10 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง

นอกจากนี้ ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ของวงจรกรอง  
กำลังแอกทีฟในช่วงเวลาดังเวลา 0 ถึง 0.5 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.10 โดยสังเกตได้ว่า ที่

เวลาประมาณ 0.055 วินาที พบว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงเท่ากับ 373 V อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมพีไอ ( $K_{Pv} = 0.2085$ ,  $K_{Iv} = 4.6336$  การออกแบบสามารถดูได้จากบทที่ 4) สามารถควบคุมให้แรงดันบัสไฟตรงมีค่าเข้าสู่ 360 V ตามค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง ( $V_{dc}^*$ ) โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.18 วินาที

ตารางที่ 8.2 ค่า %THD กรณีการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีซีซี ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการใหม่

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย	
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย
a	26.37%	1.67%
b	26.40%	1.65%
c	26.40%	1.50%
เฉลี่ย	26.39%	1.61%

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของระบบข้างต้น ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟของตัวควบคุมพีซีซีที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่ โดยวิธีดังกล่าวสามารถให้ค่า %THD เฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยลดลงเท่ากับ 1.61% จากก่อนการชดเชยที่มีค่าเท่ากับ 26.39% ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 8.2

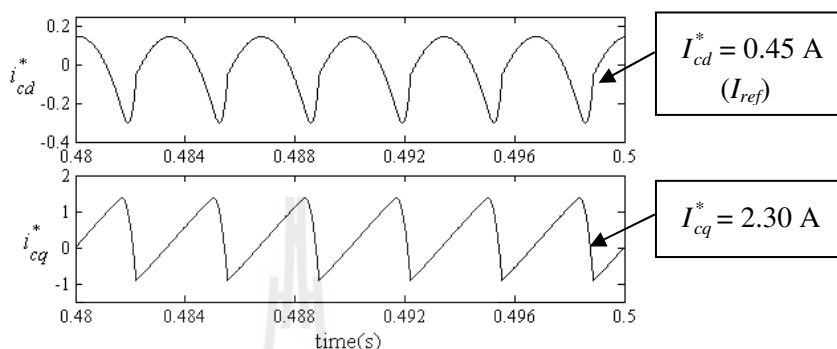
นอกจากนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบประสิทธิผลเพิ่มเติมของวิธีการใหม่สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีซีซี ผู้วิจัยจะทำการทดสอบใช้ออกแบบตัวควบคุมพีซีซีสำหรับระบบที่ต่างกันจำนวน 3 ระบบ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จากหัวข้อที่ 8.3 ถึง 8.5 ดังต่อไปนี้

### 8.3 การออกแบบตัวควบคุมพีซีซีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1

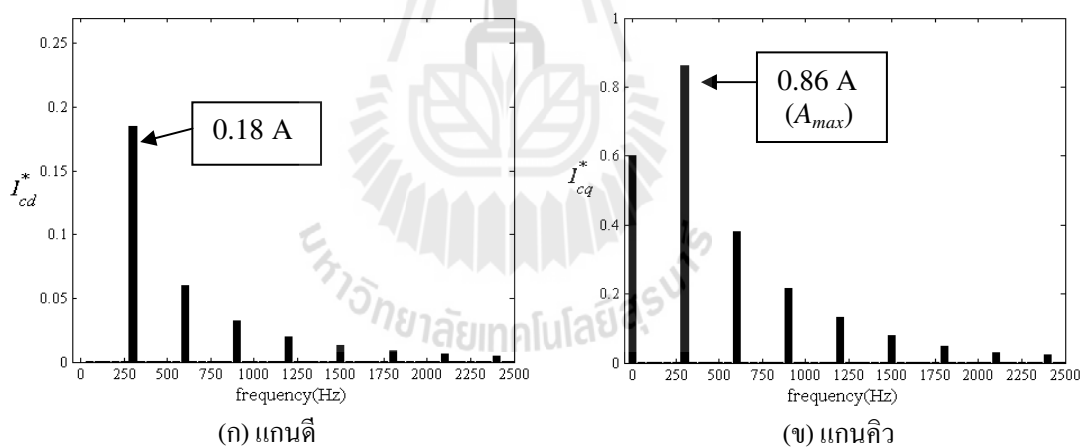
การทดสอบวิธีการใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมพีซีซีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบใหม่กรณีที่ 1 คือ ระบบที่มีขนาดกระแสไฟฟ้าที่ไหลลดน้อยลงจากระบบที่พิจารณาก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 8.2.2 (โหลดของระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 5.1 คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลด  $R_L$  เท่ากับ 80  $\Omega$  อนุกรมกับ  $L_L$  เท่ากับ 0.5 H ซึ่งมีค่าขดกระแสไฟฟ้าบนแกนสามเฟสเท่ากับ 3 A) จากระบบดังรูปที่ 5.1 นำมาแสดงใหม่โดยกำหนดเปลี่ยนโหลด  $R_L$



ชดเชยบนแกนดัดคิว ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) โดยใช้วิธี SDF ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ในช่วงเวลา 0.48 ถึง 0.50 วินาที สามารถแสดงดังรูปที่ 8.12 โดยสเปกตรัมของรูปสัญญาณดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 8.13 จากข้อมูลกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยของระบบใหม่กรณีที่ 1 ดังกล่าว สามารถดำเนินการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy โดยใช้วิธีการใหม่ ได้ดังนี้



รูปที่ 8.12 กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดัดคิวของระบบใหม่กรณีที่ 1



รูปที่ 8.13 สเปกตรัมขนาดกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดัดคิวของระบบใหม่กรณีที่ 1

ขั้นที่ 1 กำหนดค่า  $I_{ref}$  ของระบบ โดยจากการพิจารณารูปที่ 8.1 พบว่า ค่า  $I_{cd}^*$  และ  $I_{cq}^*$  มีค่าเท่ากับ 0.45 A และ 2.30 A ตามลำดับ ดังนั้น การคำนวณค่า  $I_{ref}$  ตามสมการที่ (8.1) จึงได้ผลเท่ากับ 0.45 A แสดงได้ดังนี้

$$I_{ref} = \min(0.45, 2.30) = 0.45 \text{ A}$$



ขั้นที่ 2 คำนวณหาค่า  $u_{ref}$  ของระบบ ซึ่งจากรูปที่ 8.2 จะสังเกตได้ว่า ค่า  $A_{max}$  ของระบบใหม่กรณีที่ 1 ปรากฏอยู่บนแกนควมมีค่าเท่ากับ 0.86 A ที่ค่าความถี่  $f_h$  เท่ากับ 300 Hz ดังนั้น ผลการคำนวณค่า  $u_{ref}$  ด้วยสมการที่ (8.2) จึงมีค่าประมาณเท่ากับ 29 V ดังนี้ (ค่า  $L_f$  เท่ากับ 18 mH)

$$u_{ref} \approx 0.018 \times 0.86 \times 2\pi \times 300 \approx 29 \text{ V}$$

ขั้นที่ 3 คำนวณหาค่า  $D_{max}$  ซึ่งจากค่า  $u_{ref}$  และค่า  $I_{ref}$  ของระบบที่มีค่าเท่ากับ 29 V และ 0.45 A ตามลำดับ เมื่อแทนลงในสมการที่ (8.3) จะได้ผลการคำนวณเท่ากับ 0.36 โดยการออกแบบกำหนดให้ค่า  $U$  เท่ากับ 10 และค่าเวลา  $T$  เท่ากับ 10 ไมโครวินาที

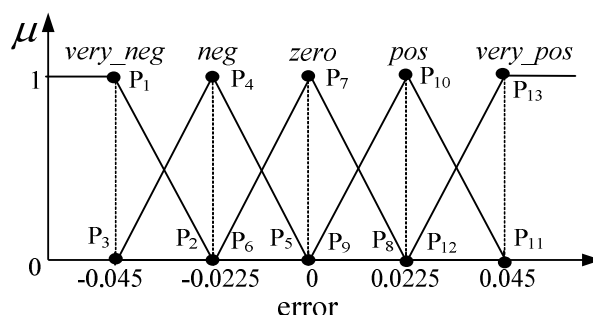
$$D_{max} = \frac{10(29)(1 \times 10^{-5})}{0.018(0.45)} = 0.36$$

ขั้นที่ 4 เลือกค่าตัวประกอบ  $D$  ตามเงื่อนไข  $0 < D \leq D_{max}$  ซึ่งจากค่า  $D_{max}$  ของระบบที่มีค่าเท่ากับ 0.36 ผู้วิจัยจึงกำหนดเลือกค่า  $D$  เท่ากับ 0.1

ขั้นที่ 5 คำนวณหาค่า  $e_{max}$  สำหรับใช้ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error โดยการแทนค่า  $I_{ref}$  เท่ากับ 0.45 A และค่า  $D$  เท่ากับ 0.1 ลงในสมการที่ (8.4) ซึ่งจะได้ผลการคำนวณเท่ากับ 0.045 A ดังนี้

$$e_{max} = 0.1(0.45) = 0.045 \text{ A}$$

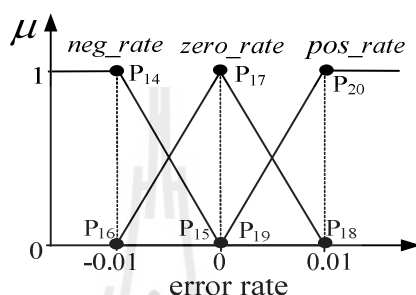
ขั้นที่ 6 แทนค่า  $e_{max}$  เท่ากับ 0.045 ลงในสมการตามตารางที่ (8.1) จะได้ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{13}$  ของอินพุต error สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1 ดังรูปที่ 8.14 ( $P_1, P_3 = -0.045$ ,  $P_2, P_4, P_6 = -0.0225$ ,  $P_5, P_7, P_9 = 0$ ,  $P_8, P_{10}, P_{12} = 0.0225$ ,  $P_{11}, P_{13} = 0.045$ )



รูปที่ 8.14 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1

ขั้นที่ 7 กำหนดค่า  $er_{max}$  สำหรับใช้ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate โดยกรณีระบบนี้ จะกำหนดให้ค่า  $er_{max}$  เท่ากับ 0.01

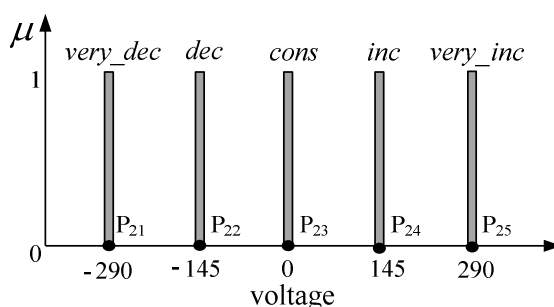
ขั้นที่ 8 แทนค่า  $er_{max}$  เท่ากับ 0.01 ลงในตารางที่ (8.1) จะได้ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{14}$  ถึง  $P_{20}$  ของอินพุต error rate สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1 ดังรูปที่ 8.15 ( $P_{14}, P_{16} = -0.01, P_{15}, P_{17}, P_{19} = 0, P_{18}, P_{20} = 0.01$ )



รูปที่ 8.15 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1

ขั้นที่ 9 คำนวณหาค่า  $V_{max}$  ของระบบสำหรับใช้ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage โดยการแทนค่า  $u_{ref}$  เท่ากับ 29 V และค่า  $U$  เท่ากับ 10 ลงในสมการที่ (8.5) ซึ่งจะได้ผลเท่ากับ 290 V ดังนี้

$$V_{max} = 10(29) = 290 \text{ V}$$



รูปที่ 8.16 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1

ขั้นที่ 10 แทนค่า  $V_{max}$  เท่ากับ 290 V ลงในสมการตามตารางที่ (8.1) จะได้ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$  ของเอาต์พุต voltage สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1 ดังรูปที่ 8.16 ( $P_{21} = -290, P_{22} = -145, P_{23} = 0, P_{24} = 145, P_{25} = 290$ )

จากผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1 ข้างต้น ลำดับต่อไป จะทำการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีดังกล่าว ซึ่งสามารถรายละเอียดได้จากหัวข้อต่อไปนี้

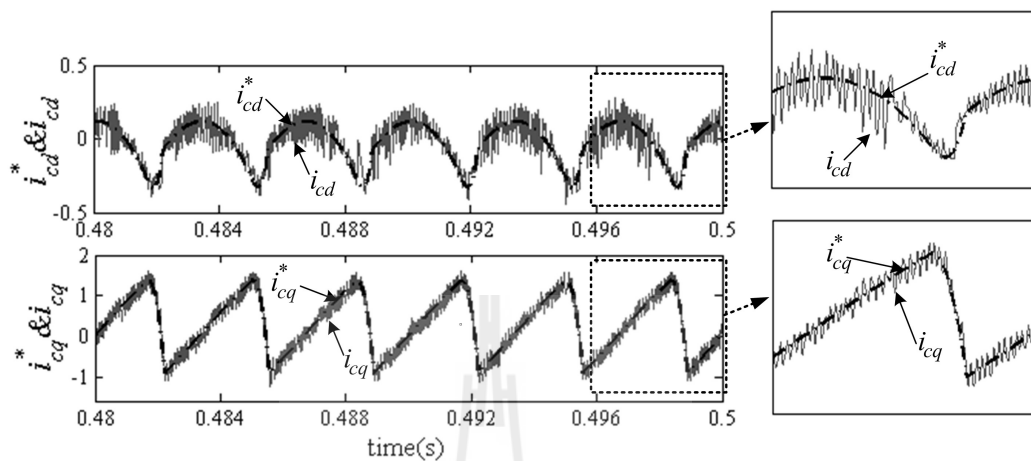
### 8.3.2 การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1

การจำลองสถานการณ์ระบบใหม่กรณีที่ 1 (ระบบดังรูปที่ 8.11) จะใช้ระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปโดยจะกำหนดให้โหลด  $R_L$  ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่สร้างอยู่บนโปรแกรม Simulink มีค่าเท่ากับ 120  $\Omega$  และกำหนดให้ตัวควบคุมฟัซซีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่คำนวณบนบอร์ด eZdsp™F28335 มีค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกตามผลการออกแบบด้วยวิธีการใหม่ดังรูปที่ 8.14 ถึง 8.16 จากระบบดังกล่าว ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวในช่วงเวลา 0.48 ถึง 0.5 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.17 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับเฟส  $a, b$  และ  $c$  ในช่วงเวลา 0.4 ถึง 0.5 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.18 ถึง 8.20 ตามลำดับ และผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.5 วินาทีแสดงได้ดังรูปที่ 8.21

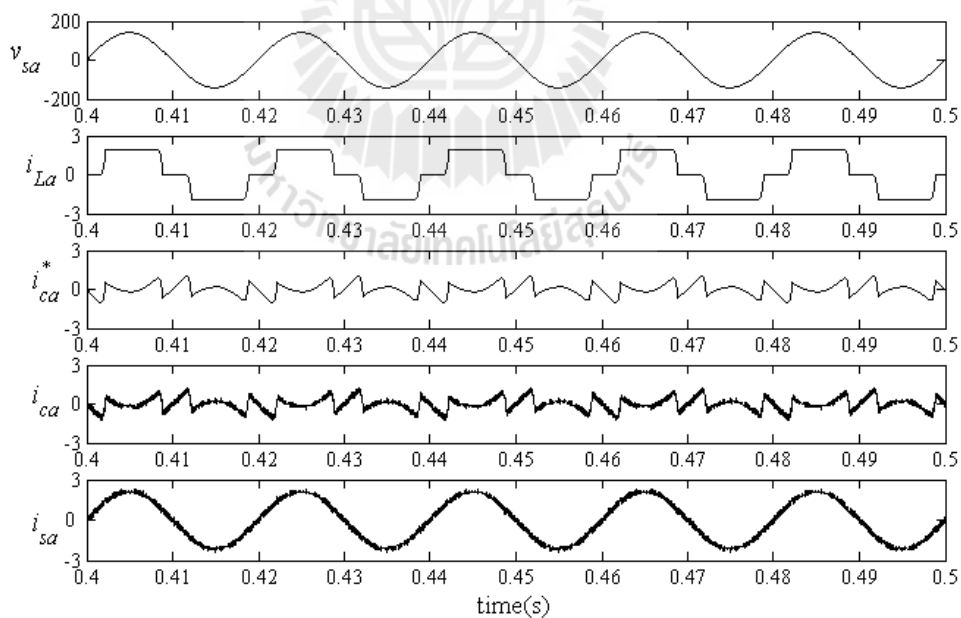
จากรูปที่ 8.17 สังเกตได้ว่า กระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ตลอดรูปสัญญาณ และในช่วงรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด พบว่า กระแสชดเชยสามารถเกาะตามค่ากระแสอ้างอิงได้ดีทั้งสองแกน ซึ่งดูได้จากรูปขยาย จากผลดังกล่าว หมายความว่า ตัวควบคุมฟัซซีที่ได้จากการออกแบบโดยใช้วิธีการใหม่ มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1

จากรูปที่ 8.18 ถึง 8.20 สังเกตได้ว่า วงจรรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ ) ที่มีลักษณะตามกระแสอ้างอิง ( $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ ) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของเฟส  $a, b$  และ  $c$  มีค่าเท่ากับ 2.51% 2.23% และ 2.74% ตามลำดับ (ค่า %THD เฉลี่ยเท่ากับ 2.50%) ในขณะที่

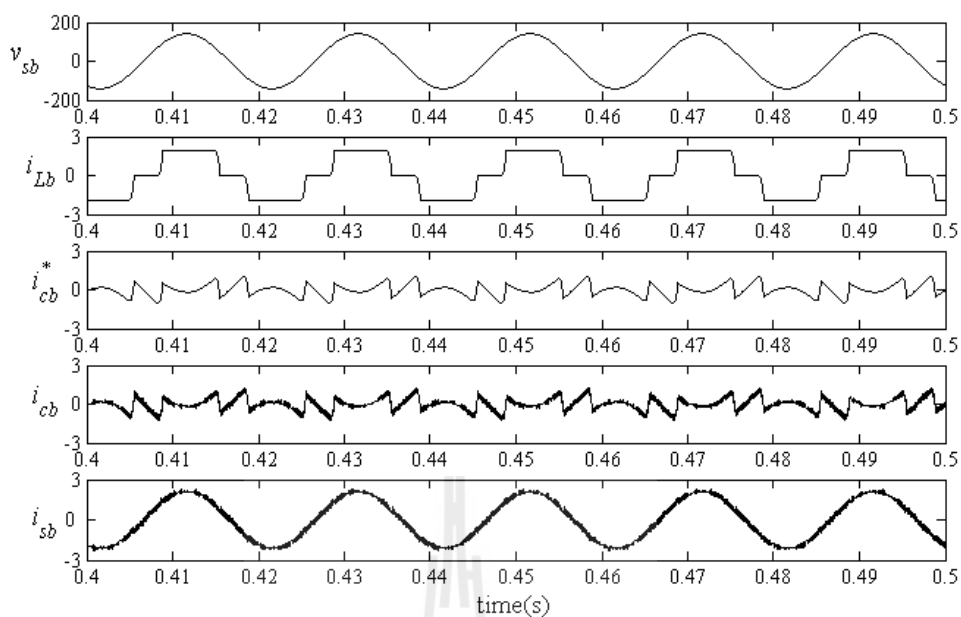
ก่อนการชดเชย ค่า  $\%THD$  ของกระแสดังกล่าวสำหรับระบบใหม่กรณีนี้ 1 นี้ มีค่าเท่ากับ 27.18% 27.21% และ 27.21% ตามลำดับเฟส (ค่า  $\%THD$  เฉลี่ยเท่ากับ 27.20%) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 8.3



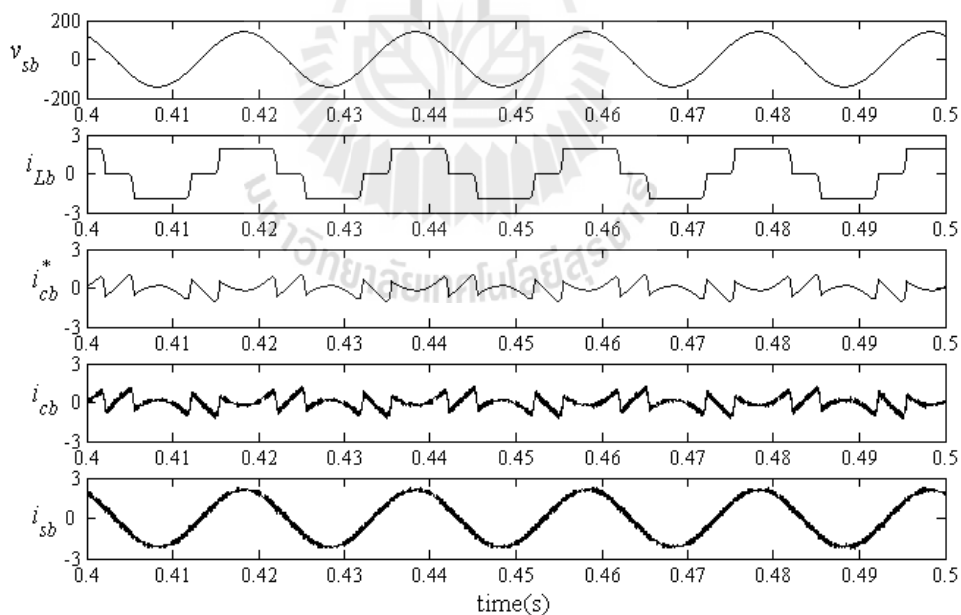
รูปที่ 8.17 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวโดยใช้ตัวควบคุมพีชชี สำหรับระบบใหม่กรณีนี้ 1



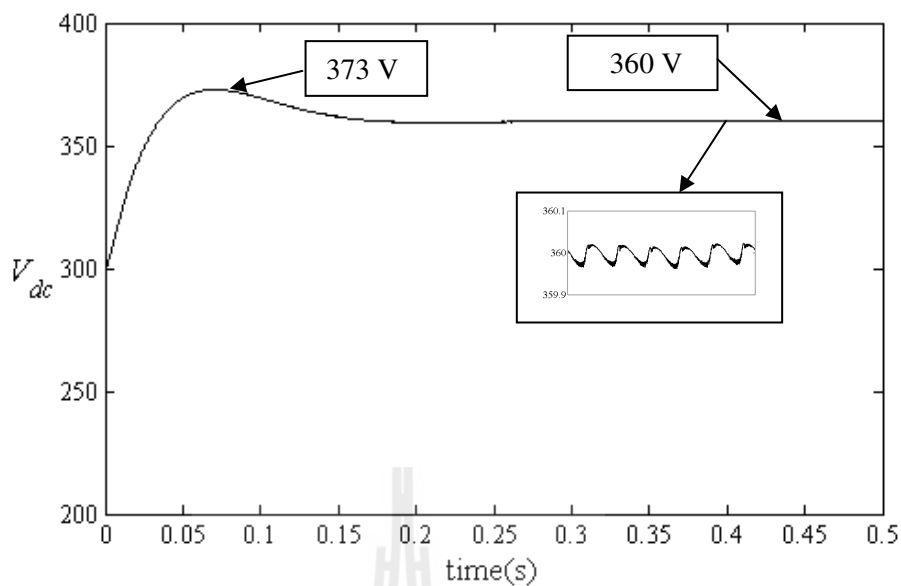
รูปที่ 8.18 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $a$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชย ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีนี้ 1



รูปที่ 8.19 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $b$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชย  
ใช้ตัวควบคุมพีชซีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1



รูปที่ 8.20 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $c$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชย  
ใช้ตัวควบคุมพีชซีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1



รูปที่ 8.21 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1

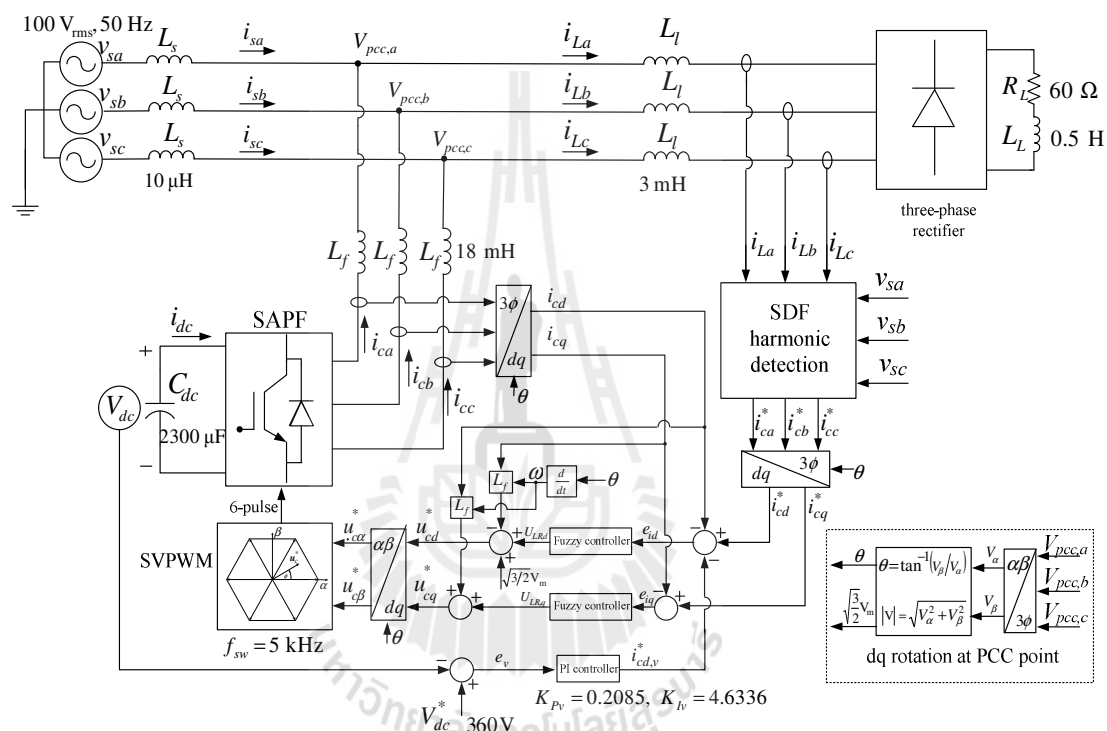
สำหรับผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 8.21 สังเกตได้ว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) มีค่ายอดแรงดันสูงสุดประมาณเท่ากับ 373 V ที่เวลาเท่ากับ 0.055 วินาที และค่าแรงดันดังกล่าว ได้ลู่เข้าสู่ค่าเท่ากับ 360 V ตามแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง ( $V_{dc}^*$ ) ที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 0.18 วินาที จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 8.3 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 1

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย	
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย
a	27.18%	2.51%
b	27.21%	2.23%
c	27.21%	2.30%
เฉลี่ย	27.20%	2.35%

### 8.4 การออกแบบตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2

การทดสอบวิธีการใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมพีชชีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบใหม่กรณีที่ 2 คือ ระบบที่มีขนาดกระแสไฟฟ้าที่โหลดเพิ่มขึ้นจากระบบที่พิจารณา โดยการกำหนดเปลี่ยนโหลด  $R_L$  ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเท่ากับ  $60 \Omega$  ดังแสดงในรูปที่ 8.22 ผลจากการกำหนดโหลดดังกล่าว จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลบนแกนสามเฟสขนาดเพิ่มขึ้นโดยมีค่ายอดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4 A



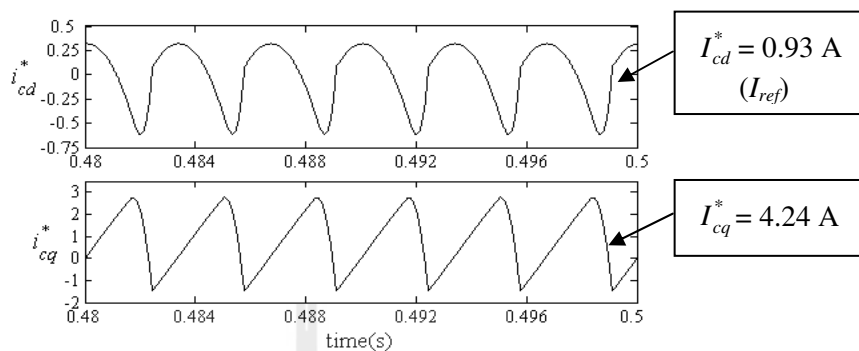
รูปที่ 8.22 ระบบใหม่กรณีที่ 2

จากระบบดังรูปที่ 8.22 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีด้วยวิธีการใหม่สำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ สามารถอธิบายได้ดังนี้

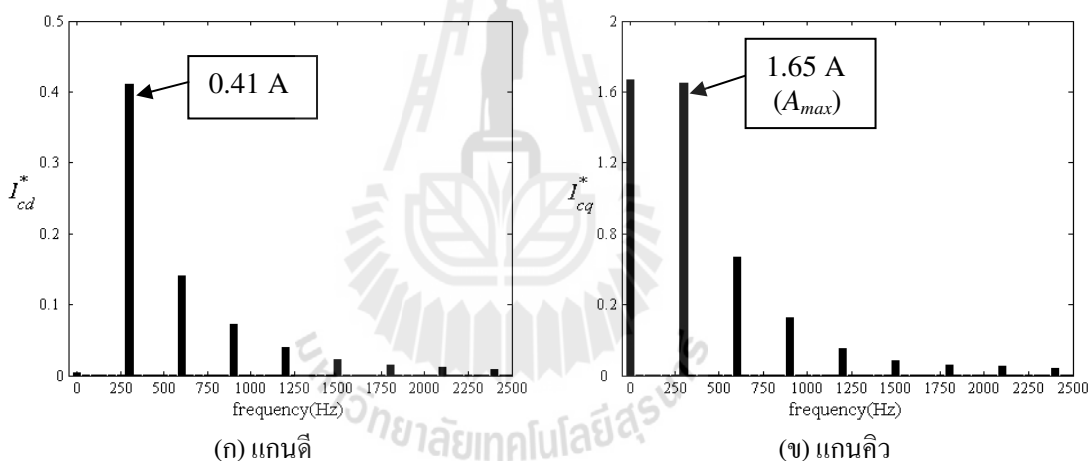
#### 8.4.1 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2

การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2 ดังรูปที่ 8.22 จะเริ่มทำการจำลองสถานการณ์ระบบก่อนมีการชดเชยเพื่อคำนวณหากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) โดยผลการจำลองสถานการณ์รูปสัญญาณกระแส

อ้างอิงดังกล่าวในช่วงเวลา 0.48 ถึง 0.50 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.23 และสเปกตรัมของรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิว แสดงได้ดังรูปที่ 8.24



รูปที่ 8.23 กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิวของระบบใหม่กรณีที่ 2



รูปที่ 8.24 สเปกตรัมขนาดกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิวของระบบใหม่กรณีที่ 2

จากข้อมูลกระแสอ้างอิงของระบบใหม่กรณีที่ 2 ข้างต้น สามารถดำเนินการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่ ได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดค่า  $I_{ref}$  ของระบบ โดยจากรูปที่ 8.23 พบว่า ค่า  $I_{cd}^*$  และ  $I_{cq}^*$  มีค่าเท่ากับ 0.93 A และ 4.24 A ตามลำดับ ดังนั้น การคำนวณค่า  $I_{ref}$  ด้วยสมการที่ (8.1) จึงได้ผลเท่ากับ 0.93 A ดังนี้

$$I_{ref} = \min(0.93, 4.24) = 0.93 \text{ A}$$



ขั้นที่ 2 คำนวณหาค่า  $u_{ref}$  ของระบบ โดยพิจารณาจากรูปที่ 8.24 จะสังเกตได้ว่า ค่า  $A_{max}$  อยู่บนแกนคิวดังนี้มีค่าเท่ากับ 1.65 A ที่ค่าความถี่  $f_h$  เท่ากับ 300 Hz ดังนั้น การคำนวณค่า  $u_{ref}$  ตามสมการที่ (8.2) จึงได้ค่าประมาณเท่ากับ 56 V ดังนี้

$$u_{ref} \approx 0.018 \times 1.65 \times 2\pi \times 300 \approx 56 \text{ V}$$

ขั้นที่ 3 คำนวณหาค่า  $D_{max}$  ซึ่งจากค่า  $I_{ref}$  และค่า  $u_{ref}$  ของระบบที่มีค่าเท่ากับ 0.93 A และ 56 V ตามลำดับ เมื่อแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (8.3) จะได้ผลค่า  $D_{max}$  เท่ากับ 0.16 โดยการออกแบบสำหรับกรณีระบบนี้ยังคงกำหนดให้ค่าตัวประกอบ  $U$  เท่ากับ 5 และค่าเวลา  $T$  เท่ากับ 10 ไมโครวินาที

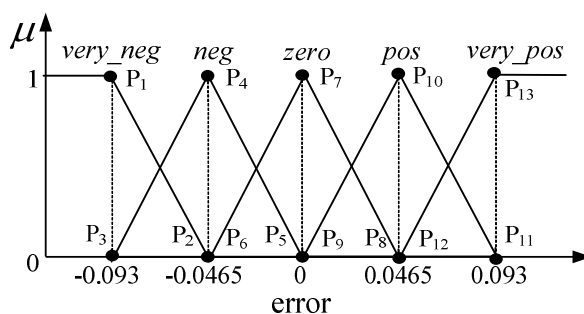
$$D_{max} = \frac{5(56)(1 \times 10^{-5})}{0.018(0.93)} = 0.16$$

ขั้นที่ 4 เลือกค่าตัวประกอบ  $D$  ภายใต้เงื่อนไข  $0 < D \leq D_{max}$  ซึ่งจากค่า  $D_{max}$  ที่เท่ากับ 0.16 ผู้วิจัยจึงกำหนดเลือกค่า  $D$  เท่ากับ 0.1

ขั้นที่ 5 คำนวณหาค่า  $e_{max}$  สำหรับใช้ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error โดยจากสมการที่ (8.4) เมื่อแทนค่า  $I_{ref}$  เท่ากับ 0.93 A และค่า  $D$  เท่ากับ 0.1 จะได้ผลการคำนวณค่า  $e_{max}$  เท่ากับ 0.093 A ดังนี้

$$e_{max} = 0.1(0.93) = 0.093 \text{ A}$$

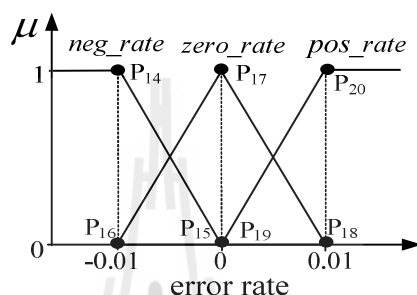
ขั้นที่ 6 แทนค่า  $e_{max}$  ลงในสมการตามตารางที่ (8.1) จะได้ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{13}$  ของอินพุต error สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 8.25 ( $P_1, P_3 = -0.093$ ,  $P_2, P_4, P_6 = -0.0465$ ,  $P_5, P_7, P_9 = 0$ ,  $P_8, P_{10}, P_{12} = 0.0465$ ,  $P_{11}, P_{13} = 0.093$ )



รูปที่ 8.25 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2

ขั้นที่ 7 กำหนดค่า  $er_{max}$  สำหรับใช้ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate ของระบบใหม่กรณีที่ 2 เท่ากับ 0.01

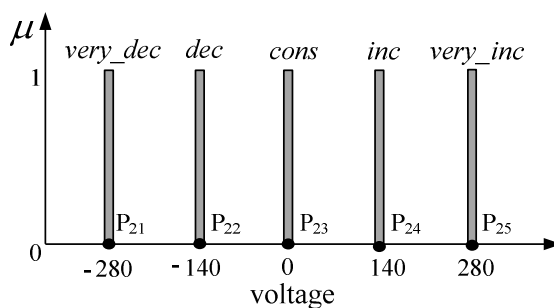
ขั้นที่ 8 แทนค่า  $er_{max}$  เท่ากับ 0.01 ลงในสมการตามตารางที่ (8.1) จะผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{14}$  ถึง  $P_{20}$  แสดงดังรูปที่ 8.26 ( $P_{14}, P_{16} = -0.01$ ,  $P_{15}, P_{17}, P_{19} = 0$ ,  $P_{18}, P_{20} = 0.01$ )



รูปที่ 8.26 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2

ขั้นที่ 9 คำนวณค่า  $V_{max}$  ของระบบสำหรับใช้ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage ซึ่งจากสมการที่ (8.5) เมื่อแทนค่า  $u_{ref}$  เท่ากับ 56 V และค่า  $U$  เท่ากับ 5 จะได้ผลการคำนวณค่า  $V_{max}$  เท่ากับ 280 V ดังนี้

$$V_{max} = 5(56) = 280 \text{ V}$$



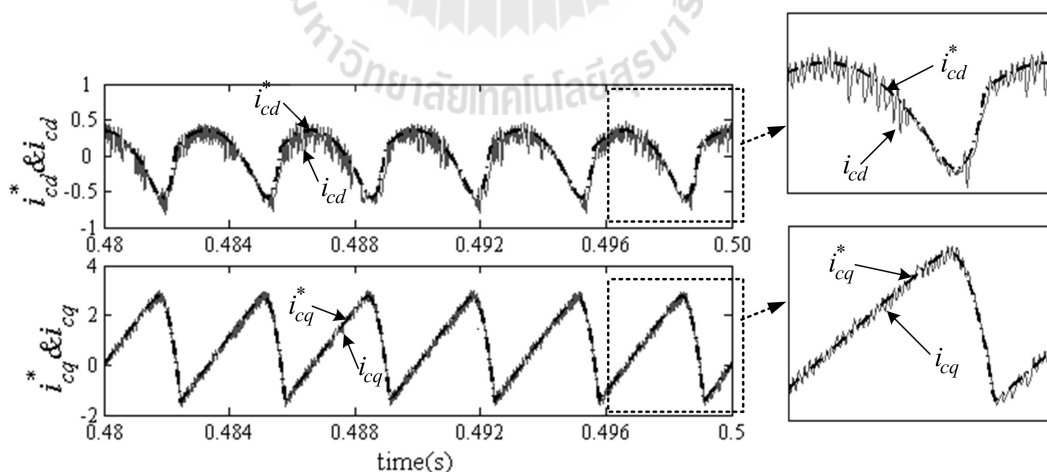
รูปที่ 8.27 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2

ขั้นที่ 10 แทนค่า  $V_{max}$  เท่ากับ 280 V ลงในสมการตามตารางที่ (8.1) จะได้ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$  ของเอาต์พุต voltage สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 8.27 ( $P_{21} = -280$ ,  $P_{22} = -140$ ,  $P_{23} = 0$ ,  $P_{24} = 140$ ,  $P_{25} = 280$ )

จากผลการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy สำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบใหม่กรณีที่ 2 ข้างต้น การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมฟuzzy ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่ สามารถดูดังต่อไปนี้

#### 8.4.2 การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมฟuzzy ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2

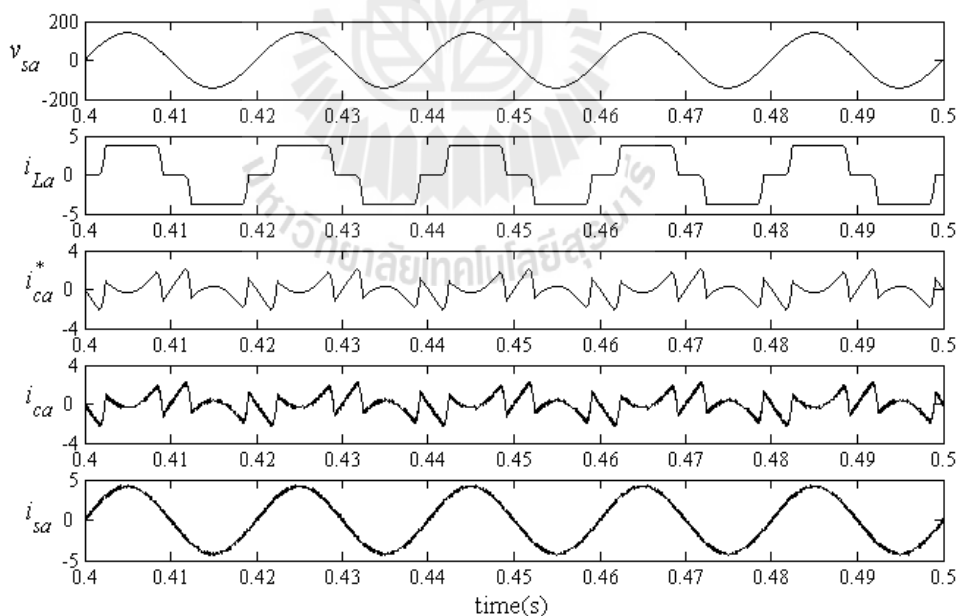
การจำลองสถานการณ์ระบบใหม่กรณีที่ 2 (รูปที่ 8.22) โดยใช้ระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป จะกำหนดให้โหลด  $R_L$  ของวงจรเรียงกระแสที่สร้างอยู่บนโปรแกรม Simulink มีค่าเท่ากับ  $60 \Omega$  และกำหนดให้ตัวควบคุมฟuzzy สำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่คำนวณบนบอร์ด eZdsp™ F28335 มีค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกตามผลการออกแบบด้วยวิธีการใหม่ดังรูปที่ 8.25 ถึง 8.27 การจำลองสถานการณ์ของระบบดังกล่าวสามารถแสดงผลการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดิกิวในช่วงเวลา 0.48 ถึง 0.5 วินาที ได้ดังรูปที่ 8.28 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ในช่วงเวลา 0.4 ถึง 0.5 วินาที แสดงได้ดังรูปที่ 8.29 ถึง 8.31 ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรงตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.5 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.32



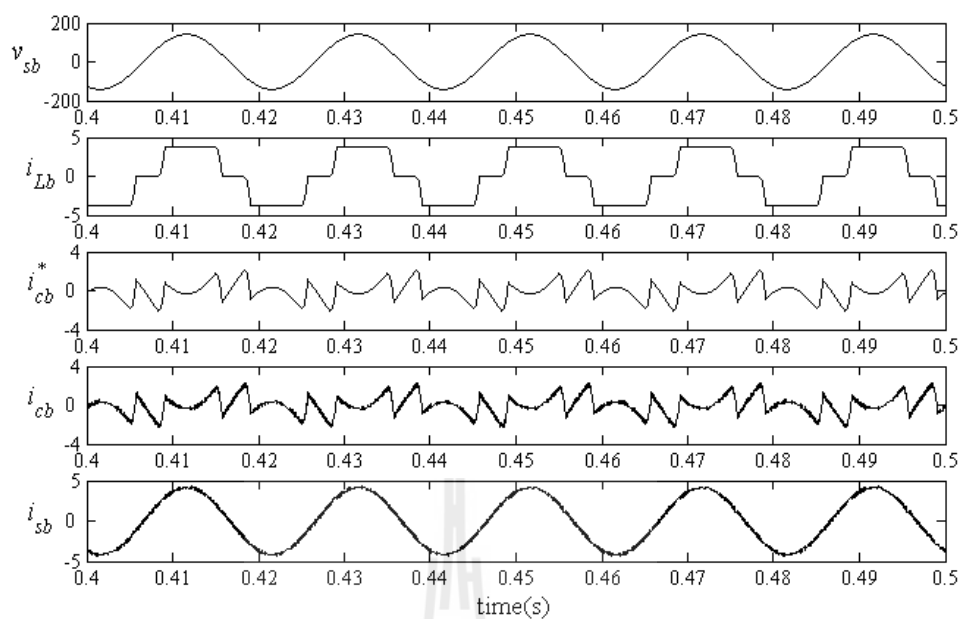
รูปที่ 8.28 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดิกิวโดยใช้ตัวควบคุมฟuzzy สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2

จากรูปที่ 8.28 สังเกตได้ว่า กระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ตลอดรูปสัญญาณ โดยเมื่อขยายรูปดังกล่าว พบว่า กระแสชดเชยสามารถเกาะตามค่ากระแสอ้างอิงในช่วงรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดได้ดีทั้งสองแกน จากผลดังกล่าว หมายความว่า ตัวควบคุมพีชชีที่ออกแบบโดยใช้วิธีการใหม่สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2 มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

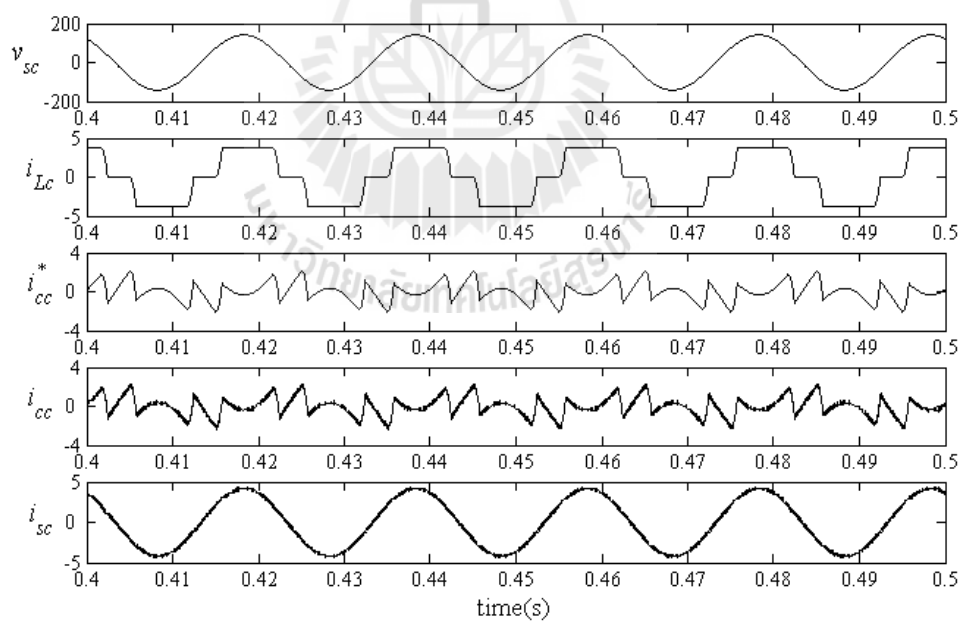
จากรูปที่ 8.29 ถึง 8.31 สังเกตได้ว่า กระแสชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ ) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีลักษณะตามกระแสอ้างอิง ( $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ ) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF จากผลดังกล่าว จึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  มีค่าเท่ากับ 1.52% 1.47% และ 1.48% ตามลำดับ (ค่า %THD เดิมเท่ากับ 1.49%) ในขณะที่ก่อนการชดเชย ค่า %THD ของกระแสดังกล่าวสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2 นี้ มีค่าเท่ากับ 25.69% 25.71% และ 25.72% ตามลำดับเฟส (ค่า %THD เดิมเท่ากับ 25.71%) ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 8.4



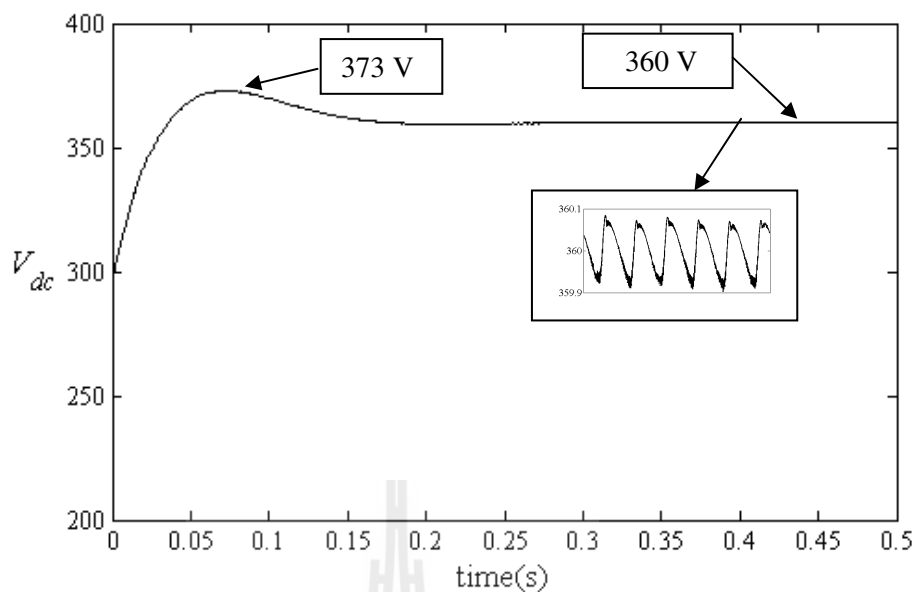
รูปที่ 8.29 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $a$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2



รูปที่ 8.30 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $b$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชย  
ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2



รูปที่ 8.31 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $c$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชย  
ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2



รูปที่ 8.32 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2

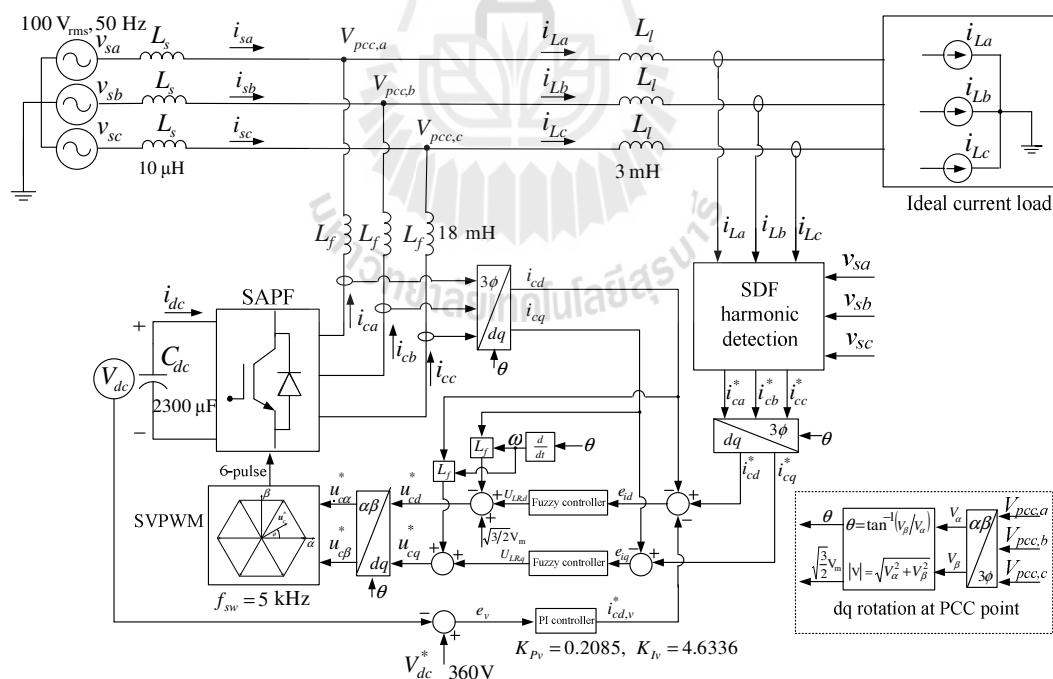
จากรูปที่ 8.32 สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอยังคงให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับระบบใหม่กรณี 2 โดยค่าแรงดันดังกล่าว มีค่ายอดแรงดันสูงสุดประมาณเท่ากับ 373 V ที่เวลาเท่ากับ 0.055 วินาที และหลังจากนั้นได้ลู่เข้าสู่ค่าแรงดันเท่ากับ 360 V ตามค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง ( $V_{dc}^*$ ) โดยใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 0.18 วินาที

ตารางที่ 8.4 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 2

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย	
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย
a	25.69%	1.52%
b	25.71%	1.47%
c	25.72%	1.48%
เฉลี่ย	25.71%	1.49%

### 8.5 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3

การทดสอบวิธีการใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบใหม่กรณีที่ 3 คือ ระบบที่มีรูปร่างของกระแสไฟฟ้าที่โหลดแตกต่างจากระบบที่พิจารณา โดยจะกำหนดใช้โหลดกระแสทางอุดมคติ (Ideal current load) ทั้งนี้เนื่องจากโหลดดังกล่าวสามารถกำหนดรูปร่างของกระแสไฟฟ้าได้ตามต้องการ สำหรับระบบที่ต่อเข้ากับโหลดกระแสทางอุดมคติสามเฟสแบบสมดุลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.33 จากรูปดังกล่าวกำหนดให้โหลดกระแสทางอุดมคติมีปริมาณกระแสไฟฟ้ามูลฐานอันดับที่ 1 (ความถี่เท่ากับ 50 Hz) รวมกับกระแสร่มอนิกที่อันดับ 2 4 5 7 8 11 และ 13 (ความถี่เท่ากับ 100 Hz 200 Hz 250 Hz 350 Hz 400 Hz 550Hz และ 650 Hz ตามลำดับ) ดังสมการที่ (8.6) จากสมการดังกล่าว ค่ากระแสไฟฟ้าที่อันดับต่าง ๆ ( $i_n$ ) กำหนดให้มีค่าตามตารางที่ 8.5 นอกจากนี้ กำหนดให้มุมเฟสเริ่มต้น ( $\phi$ ) ของโหลดมีค่าเท่ากับ  $-\pi/6$  จากระบบใหม่กรณีที่ 3 ดังกล่าว การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังหัวข้อต่อไป



รูปที่ 8.33 ระบบใหม่กรณีที่ 3

ตารางที่ 8.5 ขนาดกระแสไฟฟ้าของโหลดแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติ

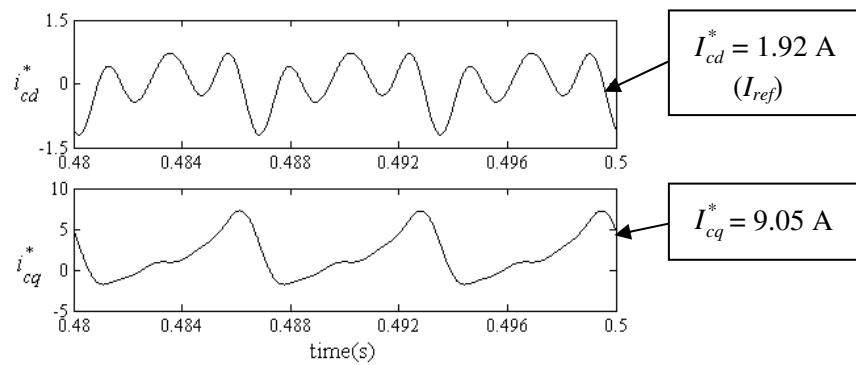
อันดับที่ ( $n$ )	ความถี่ (Hz)	ขนาดกระแส $i_n$ (A <sub>rms</sub> )
1	50	3
2	100	1.5
4	200	1.2
5	250	0.8
7	350	0.7
8	400	0.5
11	550	0.2
13	650	0.1

$$\begin{aligned}
 i_{La} &= i_1 \sin(2\pi f_1 t + \phi) + i_2 \sin(2\pi f_2 t + \phi) + i_4 \sin(2\pi f_4 t + \phi) + i_5 \sin(2\pi f_5 t + \phi) \\
 &\quad + i_7 \sin(2\pi f_7 t + \phi) + i_8 \sin(2\pi f_8 t + \phi) + i_{11} \sin(2\pi f_{11} t + \phi) + i_{13} \sin(2\pi f_{13} t + \phi) \\
 i_{Lb} &= i_1 \sin(2\pi f_1 t + \phi - \frac{2\pi}{3}) + i_2 \sin(2\pi f_2 t + \phi + \frac{2\pi}{3}) + i_4 \sin(2\pi f_4 t + \phi - \frac{2\pi}{3}) + i_5 \sin(2\pi f_5 t + \phi + \frac{2\pi}{3}) \\
 &\quad + i_7 \sin(2\pi f_7 t + \phi - \frac{2\pi}{3}) + i_8 \sin(2\pi f_8 t + \phi + \frac{2\pi}{3}) + i_{11} \sin(2\pi f_{11} t + \phi + \frac{2\pi}{3}) + i_{13} \sin(2\pi f_{13} t + \phi - \frac{2\pi}{3}) \quad (8.6) \\
 i_{Lc} &= i_1 \sin(2\pi f_1 t + \phi + \frac{2\pi}{3}) + i_2 \sin(2\pi f_2 t + \phi - \frac{2\pi}{3}) + i_4 \sin(2\pi f_4 t + \phi + \frac{2\pi}{3}) + i_5 \sin(2\pi f_5 t + \phi - \frac{2\pi}{3}) \\
 &\quad + i_7 \sin(2\pi f_7 t + \phi + \frac{2\pi}{3}) + i_8 \sin(2\pi f_8 t + \phi - \frac{2\pi}{3}) + i_{11} \sin(2\pi f_{11} t + \phi - \frac{2\pi}{3}) + i_{13} \sin(2\pi f_{13} t + \phi + \frac{2\pi}{3})
 \end{aligned}$$

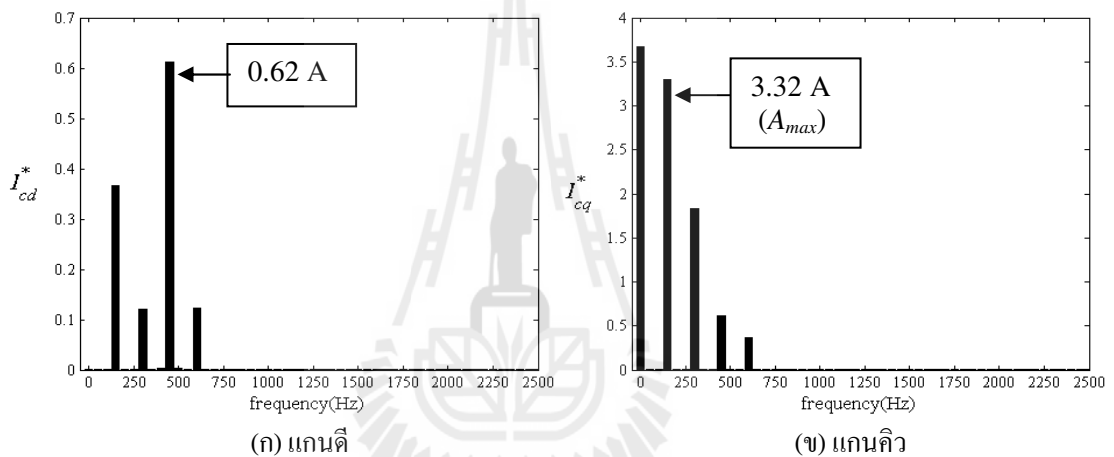
### 8.5.1 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy สำหรับระบบใหม่ กรณีที่ 3

การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy สำหรับระบบใหม่กรณี  
ที่ 3 จะเริ่มต้นจากการจำลองสถานการณ์ระบบดังรูปที่ 8.33 ก่อนมีการชดเชย ทั้งนี้เพื่อคำนวณหา  
กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) สำหรับนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม  
ฟuzzy โดยผลการจำลองสถานการณ์ของกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิวในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.48 ถึง 0.50  
วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.34 และเมื่อนำรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงดังกล่าวไปวิเคราะห์  
ทางสเปกตรัมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.35 ดังนี้





รูปที่ 8.34 กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิวของระบบใหม่กรณีที่ 3



รูปที่ 8.35 สเปกตรัมขนาดกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิวของระบบใหม่กรณีที่ 3

จากคุณลักษณะของกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิวของระบบใหม่กรณีที่ 3 ข้างต้น สามารถดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีซีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลัง แอक्तिฟได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดค่า  $I_{ref}$  ของระบบ โดยจากรูปที่ 8.34 จะพบว่า ค่า  $I_{cd}^*$  และ  $I_{cq}^*$  ของระบบใหม่กรณีที่ 3 มีค่าเท่ากับ 1.92 A และ 9.05 A ตามลำดับ ดังนั้น เมื่อแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (8.1) จะได้ผลการคำนวณค่า  $I_{ref}$  เท่ากับ 1.50 A ดังนี้

$$I_{ref} = \min(1.92, 9.05) = 1.92 \text{ A}$$

ขั้นที่ 2 กำหนดค่า  $u_{ref}$  ของระบบ ซึ่งจากรูปที่ 8.35 สังเกตได้ว่า ค่า  $A_{max}$  ปรากฏ

อยู่บนแกนควมมีเท่ากับ 3.30 A ที่ตำแหน่งค่าความถี่  $f_h$  เท่ากับ 150 Hz เพราะฉะนั้น การคำนวณค่า  $u_{ref}$  โดยใช้สมการที่ (8.2) จึงได้ค่าประมาณเท่ากับ 57 V ดังนี้

$$u_{ref} \approx 0.018 \times 3.32 \times 2\pi \times 150 \approx 57 \text{ V}$$

ขั้นที่ 3 คำนวณหาค่า  $D_{max}$  โดยการแทนค่า  $I_{ref}$  และค่า  $u_{ref}$  ของระบบที่มีค่าเท่ากับ 1.92 A และ 57 V ลงในสมการที่ (8.3) ซึ่งสุดท้ายจะได้ค่า  $D_{max}$  เท่ากับ 0.082 โดยการออกแบบกำหนดใช้ค่าตัวประกอบ  $U$  เท่ากับ 5 และค่าเวลา  $T$  เท่ากับ 10 ไมโครวินาที ดังนี้

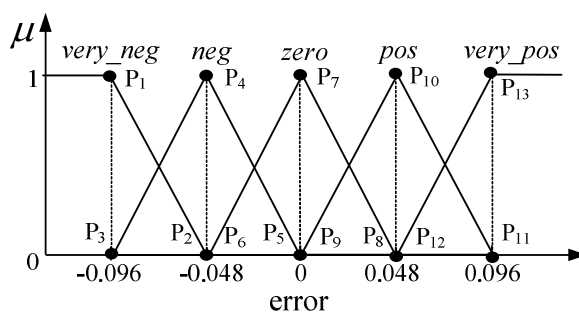
$$D_{max} = \frac{5(57)(1 \times 10^{-5})}{0.018(1.92)} = 0.082$$

ขั้นที่ 4 เลือกค่าตัวประกอบ  $D$  ภายใต้เงื่อนไข  $0 < D \leq D_{max}$  ซึ่งจากค่า  $D_{max}$  ของระบบที่มีค่าเท่ากับ 0.082 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงกำหนดเลือกค่า  $D$  เท่ากับ 0.05

ขั้นที่ 5 คำนวณหาค่า  $e_{max}$  สำหรับใช้ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error ของตัวควบคุมฟัซซี โดยจากค่า  $I_{ref}$  ของระบบที่มีค่าเท่ากับ 1.92 A และค่า  $D$  เท่ากับ 0.05 เมื่อแทนลงในสมการที่ (8.4) จะได้ผลการคำนวณค่า  $e_{max}$  เท่ากับ 0.096 A ดังนี้

$$e_{max} = 0.05(1.92) = 0.096 \text{ A}$$

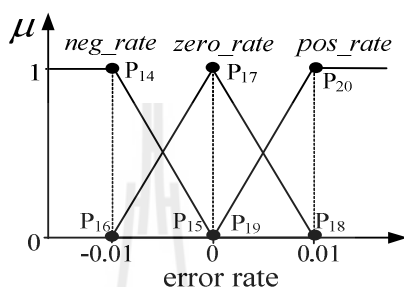
ขั้นที่ 6 นำค่า  $e_{max}$  เท่ากับ 0.096 A แทนลงในสมการตามตารางที่ (8.1) จะได้ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_1$  ถึง  $P_{13}$  ของอินพุต error ดังรูปที่ 8.36 ดังนี้ ( $P_1, P_3 = -0.096$ ,  $P_2, P_4, P_6 = -0.048$ ,  $P_5, P_7, P_9 = 0$ ,  $P_8, P_{10}, P_{12} = 0.048$ ,  $P_{11}, P_{13} = 0.096$ )



รูปที่ 8.36 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3

ขั้นที่ 7 กำหนดค่า  $er_{max}$  สำหรับใช้ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate ของระบบใหม่กรณีที่ 3 ซึ่งในที่นี้ ผู้วิจัยยังคงกำหนดใช้ค่า  $er_{max}$  เท่ากับ 0.01

ขั้นที่ 8 ดำเนินการแทนค่า  $er_{max}$  เท่ากับ 0.01 ลงในสมการตามตารางที่ (8.1) จะได้ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{14}$  ถึง  $P_{20}$  ของตัวควบคุมฟัซซี แสดงดังรูปที่ 8.37 ( $P_{14}, P_{16} = -0.01, P_{15}, P_{17}, P_{19} = 0, P_{18}, P_{20} = 0.01$ )

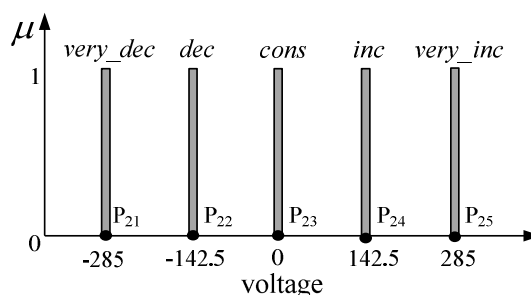


รูปที่ 8.37 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3

ขั้นที่ 9 คำนวณหาค่า  $V_{max}$  สำหรับใช้ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต voltage ของตัวควบคุมฟัซซี โดยจากค่า  $u_{ref}$  ของระบบที่มีค่าเท่ากับ 57 V และจากการออกแบบกำหนดให้ค่าตัวประกอบ  $U$  เท่ากับ 5 ดังนั้น จึงสามารถคำนวณค่า  $V_{max}$  ได้เท่ากับ 285 V ดังนี้

$$V_{max} = 5(57) = 285 \text{ V}$$

ขั้นที่ 10 แทนค่า  $V_{max}$  เท่ากับ 285 V ลงในสมการตามตารางที่ (8.1) จะได้ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $P_{21}$  ถึง  $P_{25}$  ของเอาต์พุต voltage แสดงดังรูปที่ 8.38 ( $P_{21} = -285, P_{22} = -142.5, P_{23} = 0, P_{24} = 142.5, P_{25} = 285$ )

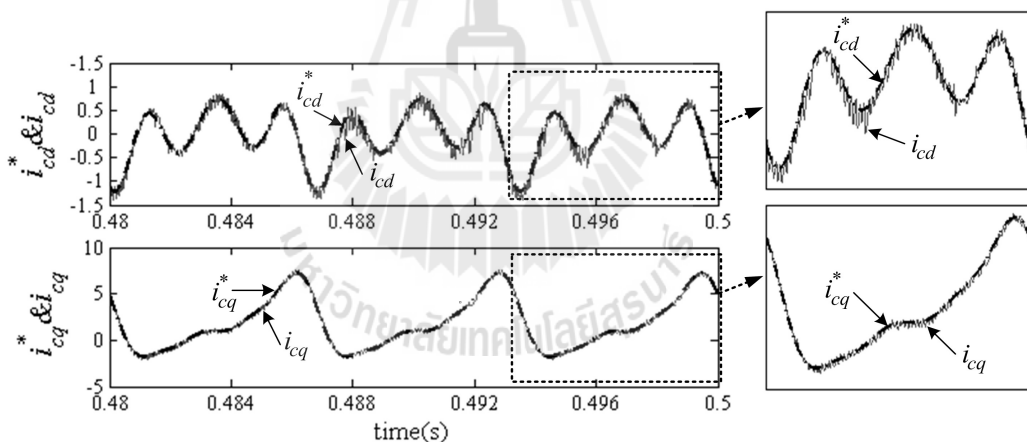


รูปที่ 8.38 ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3

จากการออกแบบตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3 ข้างต้น ลำดับต่อไป คือ การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชชีดังกล่าว ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผลสามารถดูได้จากหัวข้อต่อไปนี้

### 8.5.2 การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีชชีที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่สำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3

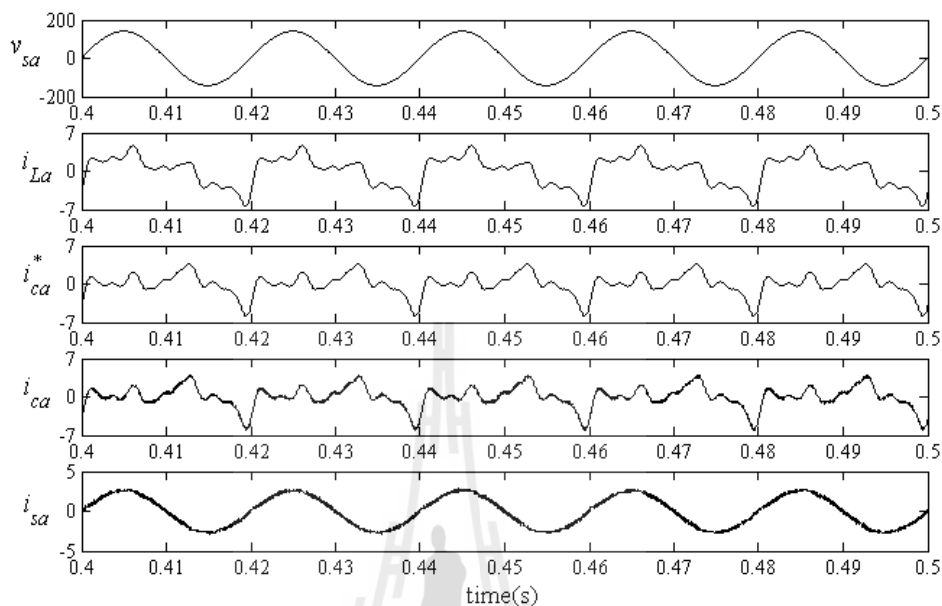
การจำลองสถานการณ์ระบบใหม่กรณีที่ 3 ดังรูปที่ 8.33 แบบฮาร์ดแวร์ในลูบจะ กำหนดให้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟมีค่าตำแหน่ง ฟังก์ชันสมาชิกตามผลการออกแบบด้วยวิธีการใหม่ดังรูปที่ 8.36 ถึง 8.38 ซึ่งจากระบบดังกล่าว ผล การจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนคิกิวในช่วงเวลา 0.48 ถึง 0.5 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.39 และสำหรับผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ในช่วงเวลาดังแต่ 0.4 ถึง 0.5 วินาที แสดงได้ดังรูปที่ 8.40 ถึง 8.42 ตามลำดับ นอกจากนี้ผล การจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.5 วินาที สามารถสามารถดูได้จากรูปที่ 8.43



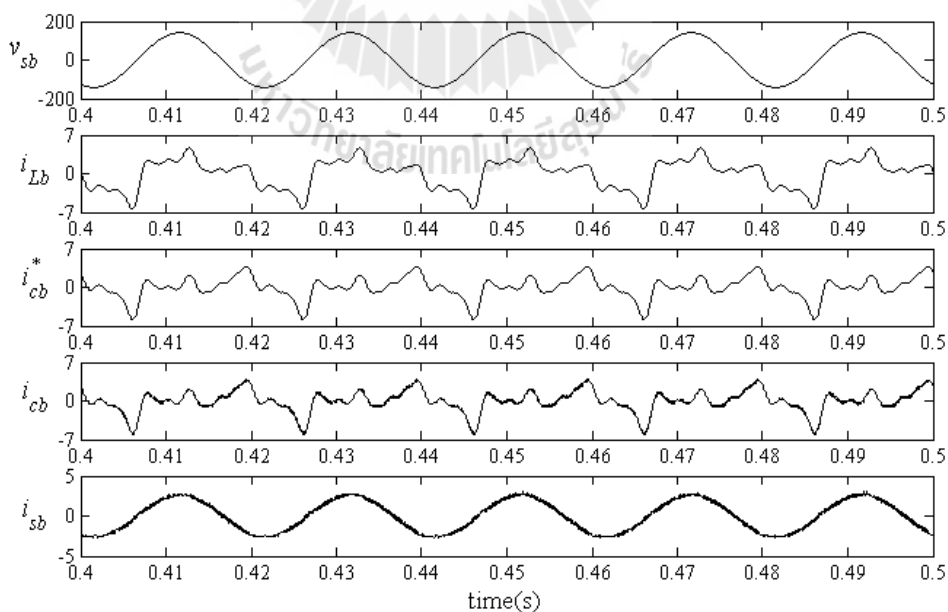
รูปที่ 8.39 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนแกนคิกิว โดยใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3

จากการเปรียบเทียบรูปสัญญาณระหว่างกระแสชดเชยกับกระแสอ้างอิงบนแกนคิกิวดังรูปที่ 8.39 สังเกตได้ว่า กระแสชดเชยบนแกนคิกิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ได้ดีตลอดทั้งรูปสัญญาณ โดยเมื่อทำการขยายรูปสัญญาณของทั้งสองแกนดังกล่าว พบว่า กระแสชดเชยสามารถเกาะตามกระแสอ้างอิงได้ดีในช่วงที่รูปสัญญาณมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูงสุด ซึ่งจากผลดังกล่าว หมายความว่า ตัวควบคุมพีชชีที่ได้จากการออกแบบด้วย

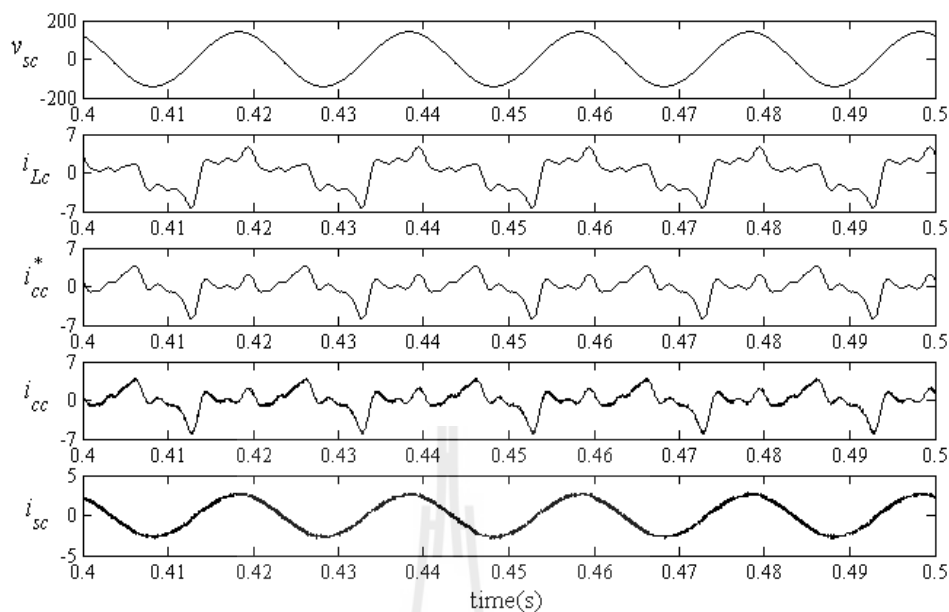
วิธีการใหม่มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสขดลวดของวงจรกำลังแอกทีฟในระบบใหม่  
กรณีที่ 3 นี้



รูปที่ 8.40 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $a$  กรณีการควบคุมกระแสขดลวด  
ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3



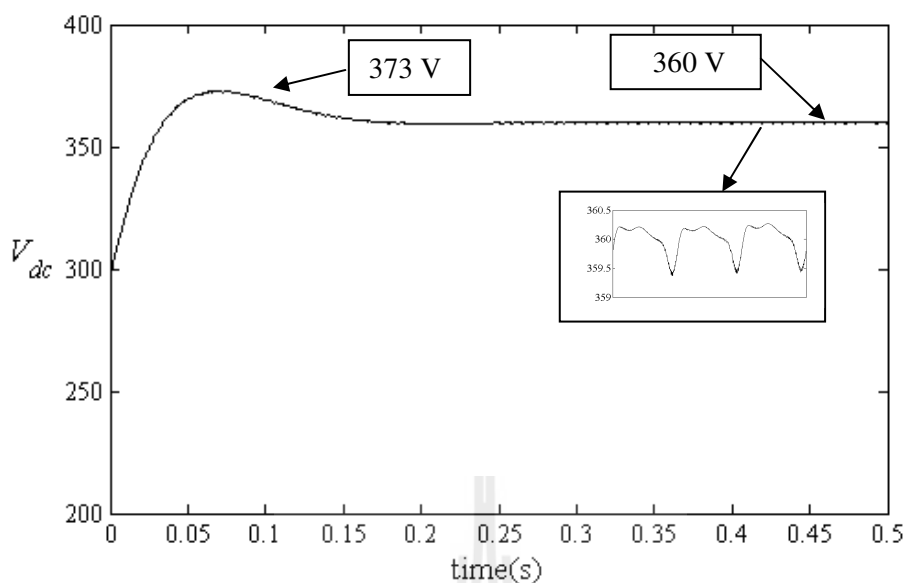
รูปที่ 8.41 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $b$  กรณีการควบคุมกระแสขดลวด  
ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3



รูปที่ 8.42 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $c$  กรณีการควบคุมกระแสชดเชย  
ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3

จากรูปที่ 8.40 ถึง 8.42 สังเกตได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ ) (หรือกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชย) มีลักษณะรูปสัญญาณผิดเพี้ยนไปจากจากรูปไซน์มาก โดยวัดค่า  $\%THD$  ของกระแสดังกล่าวของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ได้เท่ากับ 75.51% 75.38% และ 75.46% ตามลำดับ (ค่า  $\%THD$  เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 75.45%) อย่างไรก็ตาม เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟฉีดกระแสชดเชยสามเฟส ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ ) ที่มีลักษณะรูปสัญญาณตามกระแสอ้างอิง ( $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ ) ได้ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย โดยค่า  $\%THD$  ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 3.05% 3.02% และ 2.99% ตามลำดับเฟส (ค่า  $\%THD$  เฉลี่ยเท่ากับ 3.02%) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 8.6

จากรูปที่ 8.43 สังเกตได้ว่า การควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3 ตัวควบคุมดังกล่าวยังคงมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าเท่ากับ 360 V ตามค่าแรงดันอ้างอิง ( $V_{dc}^*$ ) โดยในช่วงเวลาเริ่มต้น พบว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงดังกล่าวมีค่าสูงสุดประมาณเท่ากับ 373 V ที่เวลาเท่ากับ 0.55 วินาที และหลังจากนั้นค่าแรงดันได้ลู่เข้าที่ค่าเท่ากับ 360 V โดยใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 0.18 วินาที



รูปที่ 8.43 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3

ตารางที่ 8.6 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสำหรับระบบใหม่กรณีที่ 3

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย	
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย
a	75.51%	3.05%
b	75.38%	3.02%
c	75.46%	2.99%
เฉลี่ย	75.45%	3.02%

จากการทดสอบวิธีการใหม่ในการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับ 3 กรณีระบบใหม่ โดยในหัวข้อที่ 8.3 และ 8.4 ได้นำเสนอการทดสอบกับกรณีระบบใหม่ที่มีขนาดของกระแสไฟฟ้าที่โหลดเปลี่ยนจากระบบที่พิจารณา 2 ระบบ ทั้งกรณีโหลดที่มีขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลง และกรณีที่มีขนาดกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น (โดยโหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลด  $R_L$  อนุกรมกับ  $L_L$ ) ส่วนในหัวข้อที่ถึง 8.5 คือ การทดสอบกับระบบใหม่ที่มีรูปร่างของกระแสไฟฟ้าที่โหลดแตกต่างจากระบบที่พิจารณา 1 ระบบ โดยกำหนดให้โหลดของระบบเป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติ ผลการทดสอบทั้งสามกรณีดังกล่าว พบว่าตัวควบคุมฟัซซีที่ออกแบบด้วยวิธีการใหม่มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกของทุกระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพที่ดีด้วย

เช่นกัน ดังผลการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อที่ 8.3 ถึง 8.5 ซึ่งจากผลดังกล่าว หมายความว่า วิธีการใหม่ที่ได้นำเสนอในบทนี้ สามารถออกแบบตัวควบคุมพีซีซีให้มีสมรรถนะที่ดีในควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 8.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอ การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีซีซีด้วยวิธีการใหม่ โดยใช้การคำนวณที่ง่าย และไม่จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ ตัวควบคุมพีซีซีดังกล่าวจะควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณา พบว่า ตัวควบคุมพีซีซีที่ได้จากการออกแบบโดยใช้วิธีการใหม่สามารถให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟ และให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยพบว่า ค่า  $\%THD$  เฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบหลังการชดเชยมีค่าลดลง นอกจากนี้ ในบทนี้ยังได้นำเสนอการทดสอบวิธีการใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมพีซีซีดังกล่าวสำหรับระบบใหม่ที่แตกต่าง 3 ระบบ ทั้งในกรณีระบบที่มีขนาดกระแสไฟฟ้าที่โหลดน้อยลงและเพิ่มขึ้นจากระบบที่พิจารณา และกรณีระบบที่มีรูปร่างของกระแสไฟฟ้าที่โหลดแตกต่างจากระบบที่พิจารณา ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ของทั้งสามระบบดังกล่าว พบว่า ตัวควบคุมพีซีซีที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่มีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุมกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการกำจัดฮาร์มอนิก พบว่า ค่า  $\%THD$  เฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลงทุกกรณี



## บทที่ 9

### การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว

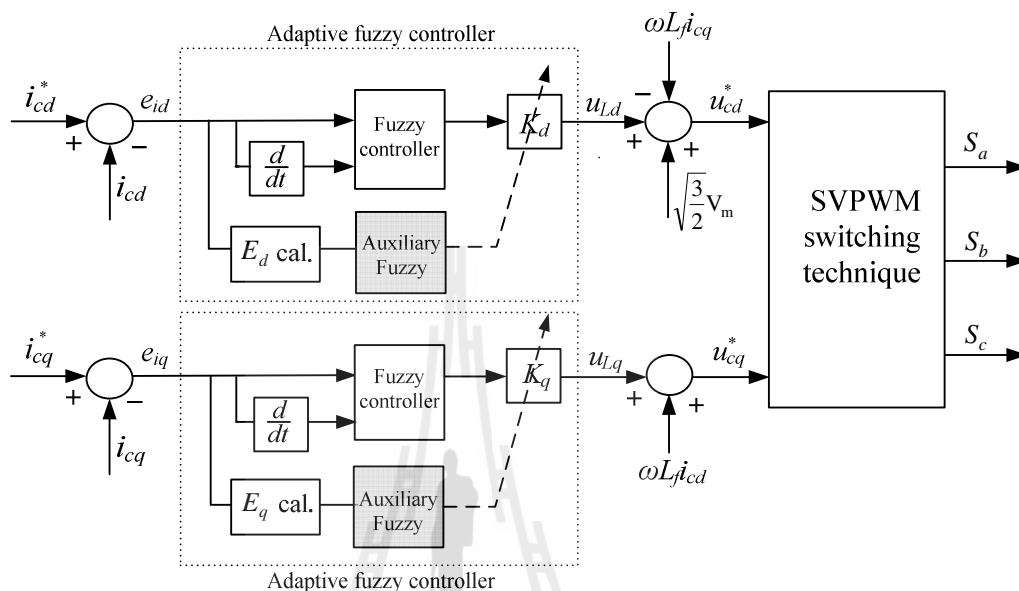
#### 9.1 กล่าวนำ

โดยปกติระบบไฟฟ้าตามโรงงานอุตสาหกรรมจะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดที่ใช้งานเสมอ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโหลดดังกล่าวอาจจะมีปริมาณฮาร์มอนิกปะปนอยู่ไม่ช้าก็เร็ว ด้วยเหตุนี้ การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟร่วมกับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชชีที่ได้ ออกแบบสำหรับระบบที่พิจารณาอาจจะมีสมรรถนะการควบคุมที่ไม่ดีพอในกรณีที่โหลดเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ในบทนี้จึงนำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว สำหรับรองรับกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นและเพื่อให้การกำจัดฮาร์มอนิกมีประสิทธิภาพที่ดีเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องทำการออกแบบตัวควบคุมพีชชีใหม่ ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวดังกล่าว ประกอบด้วย ตัวควบคุมพีชชี (ตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 8) และพีชชีช่วย โดยโครงสร้างของระบบการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวนำเสนอในหัวข้อที่ 9.2 การออกแบบพีชชีช่วยจะนำเสนอในหัวข้อที่ 9.3 และการจำลองสถานการณ์กรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างการใช้เพียงตัวควบคุมพีชชีโดยไม่มีพีชชีช่วยกับการใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว สามารถดูรายละเอียดได้ในหัวข้อที่ 9.4

#### 9.2 การควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว

การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีตามที่ได้ นำเสนอในบทที่ 8 อาจจะมีสมรรถนะที่ไม่ดีพอถ้าโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง (ทั้งนี้ เนื่องจากตัวควบคุมพีชชีดังกล่าวได้ถูกออกแบบไว้ที่จุดการทำงานนั้น ๆ ที่พิจารณา) ดังนั้น จึงอาจจำเป็นต้องทำการออกแบบตัวควบคุมพีชชีใหม่เพื่อให้มีสมรรถนะที่ดีในกรณีที่โหลดเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม ถ้าโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นบ่อยครั้ง การออกแบบตัวควบคุมพีชชีใหม่ทุกครั้งอาจเป็นทางเลือกที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากในการออกแบบตัวควบคุมพีชชีใหม่แต่ละครั้งจะต้องดำเนินการเก็บข้อมูลของโหลดที่เปลี่ยนแปลงและจะต้องทำการปิดระบบการชดเชยก่อนเพื่อใส่ตัวควบคุมพีชชีที่ได้ออกแบบใหม่ ซึ่งจะทำให้การชดเชยฮาร์มอนิกไม่มีความต่อเนื่อง ด้วยเหตุดังกล่าว ในบทนี้จึงนำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว

(Adaptive fuzzy controller) ที่สามารถปรับสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยให้ดีขึ้นได้เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวประกอบด้วย ตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy controller) และตัวควบคุมฟัซซีช่วย หรือเรียกว่า ฟัซซีช่วย (Auxiliary fuzzy) ดังแสดงในรูปที่ 9.1



รูปที่ 9.1 ระบบควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัว

จากรูปที่ 9.1 ตัวควบคุมฟัซซีสองชุดบนแกนดีคิว จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมหลักในการควบคุมกระแสชดเชย (การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับระบบที่พิจารณาสามารถดูได้นำจากหัวข้อที่ 8.2.2 ในบทที่ 8) ส่วนฟัซซีช่วยสองชุดบนแกนดีคิวจะทำหน้าที่ปรับค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีด้วยค่าตัวประกอบ  $K_d$  และ  $K_q$  เพื่อเพิ่มสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยให้ดีขึ้นในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง โดยแนวคิดการปรับค่าตัวประกอบดังกล่าวได้จากผลการพิจารณาทดสอบการออกแบบค่าตัวประกอบ  $K_d$  และ  $K_q$  ด้วยวิธี ATS ในหัวข้อที่ 7.5.4 บทที่ 7 (โดยกำหนดให้  $K_d$  และ  $K_q$  มีค่าเท่ากัน เท่ากับค่า  $K$ ) ซึ่งพบว่า ค่าตัวประกอบดังกล่าว มีผลต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ และสามารถส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้ สำหรับอินพุตของฟัซซีช่วย คือ ค่าขนาดความผิดพลาดบนแกนดีคิว ( $E_d, E_q$ ) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (9.1) โดยการคำนวณค่าขนาดความผิดพลาด  $E_d$  และ  $E_q$  ดังกล่าว จะกำหนดให้ใช้ข้อมูลค่าความผิดพลาดบนแกนดีคิว ( $e_{id}, e_{iq}$ ) จำนวน 10 คาบ (การคำนวณค่า  $e_{id}$  และ  $e_{iq}$  สามารถดูได้จากสมการที่ 5.10 ในบทที่ 5) ทั้งนี้เนื่องจากกำหนดให้ฟัซซีช่วยทำงานทุกช่วงเวลาเท่ากับ 10 คาบ

$$E_j = \frac{\sum_{n=0}^{10N} (\sqrt{e_{ij}(n)^2})}{10N + 1} \quad ; j = d, q \quad (9.1)$$

โดยที่  $N$  คือ จำนวนข้อมูลค่าความผิดพลาดแกนดิวใน 1 คาบ (0.02 วินาที)  
 หมายเหตุ:  $N$  เท่ากับ 2000 สำหรับการใช้ช่วงเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 10 ไมโครวินาที

จากระบบควบคุมกระแสชดเชยข้างต้น รายละเอียดการออกแบบ โครงสร้างและตำแหน่ง ฟังก์ชันสมาชิกของฟuzzyช่วยสำหรับใช้ปรับค่าตัวประกอบ  $K_d$  และ  $K_q$  สามารถดูได้จากหัวข้อ ถัดไป

### 9.3 การออกแบบฟuzzyช่วย

การออกแบบฟuzzyช่วยสำหรับใช้ปรับค่าตัวประกอบ  $K_d$  และ  $K_q$  บนแกนดิวจะ กำหนดการออกแบบที่เหมือนกัน ซึ่งประกอบด้วย การออกแบบโครงสร้างของฟuzzyช่วย และการ ออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของฟuzzyช่วย ซึ่งการออกแบบดังกล่าว จะพิจารณาให้ฟuzzyช่วย สามารถทำงานร่วมกับตัวควบคุมฟuzzyและช่วยเพิ่มสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยให้ดียิ่งขึ้น โดยรายละเอียดการออกแบบฟuzzyช่วย สามารถอธิบายได้ดังนี้

#### 9.3.1 การออกแบบโครงสร้างของฟuzzyช่วย

การออกแบบโครงสร้างของฟuzzyช่วยจะยังคงเลือกใช้รูปแบบการอนุมานฟuzzy แบบ sugeno โดยประกอบด้วย ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตชื่อ error  $E$  ที่มีรูปร่างแบบฟังก์ชันรูป สามเหลี่ยม และฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตชื่อ factor  $K$  ที่มีรูปร่างแบบเส้นตรงโทน (ฟังก์ชัน แบบจำลองฟuzzyของ Sugeno อันดับศูนย์) สำหรับค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิกอินพุต error  $E$  ได้ ทำการออกแบบให้มีจำนวน 5 ค่า คือ zero pos\_1 pos\_2 pos\_3 และ pos\_4 ส่วนค่าเชิงภาษาของ ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตจะออกแบบให้มีจำนวน 5 ค่า เช่นกัน คือ cons inc\_1 inc\_2 inc\_3 และ inc\_4 ดังแสดงในรูปที่ 9.2 และ 9.3 ตามลำดับ นอกจากนี้การออกแบบกฎของฟuzzyช่วย สำหรับใช้ปรับ ค่าตัวประกอบ  $K_d$  และ  $K_q$  ได้พิจารณาออกแบบกฎจำนวน 5 ข้อ ดังนี้

กฎข้อที่ 1 IF error  $E = zero$  THEN factor  $K = cons$

กฎข้อที่ 2 IF error  $E = pos_1$  THEN factor  $K = inc_1$

กฎข้อที่ 3 IF error  $E = pos_2$  THEN factor  $K = inc_2$

กฎข้อที่ 4 IF error  $E = pos_3$  THEN factor  $K = inc_3$

กฎข้อที่ 5 IF error  $E = pos_4$  THEN factor  $K = inc_4$

ความหมายของกฎข้อที่ 1 คือ ถ้าค่าอินพุต error  $E$  (ค่าอินพุตชัดเจน คือ  $E_d$  และ  $E_q$ ) มีค่าเท่ากับ zero แล้วกำหนดให้ค่าเอาต์พุต factor  $K$  (ค่าเอาต์พุตชัดเจน คือ  $K_d$  และ  $K_q$ )

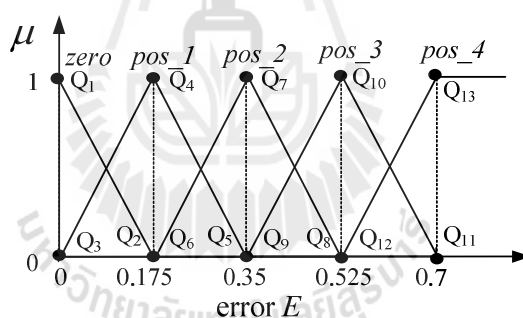
เท่ากับ *cons* (constant)

ความหมายของกฎข้อที่ 2 คือ ถ้าค่าอินพุต error  $E$  มีค่าอยู่ในระดับ *pos\_1* แล้วกำหนดให้เพิ่มค่าเอาต์พุต factor  $K$  ในระดับเท่ากับ *inc\_1* (increase level 1)

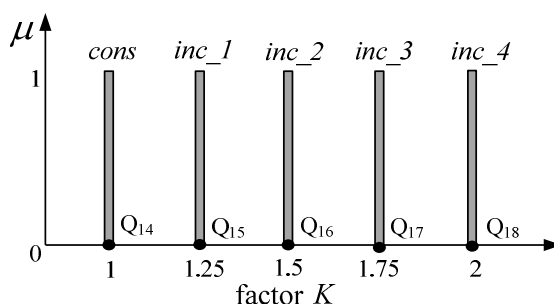
สำหรับความหมายของกฎข้อที่ 3 ถึง 5 สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับกฎข้อที่ 2 แต่จะเปลี่ยนตามระดับค่าอินพุต error  $E$  และค่าเอาต์พุต factor  $K$  ในระดับที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากกฎพีชชีทั้ง 5 ข้อดังกล่าว จะทำให้พีชชีช่วยสามารถปรับเพิ่มค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชีด้วยค่าตัวประกอบ  $K_d$  และ  $K_q$  ได้ถึง 4 ระดับ (*inc\_1* ถึง *inc\_4*)

หลังจากผ่านกระบวนการประเมินและรวมกฎพีชชีตามที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น การคำนวณหาค่าเอาต์พุตชัดเจนสุดท้ายของ factor  $K$  หรือค่า  $K_d$  และ  $K_q$  จะใช้การทำดีพีชชีแบบวิธีการหาค่าน้ำหนักเฉลี่ย (WA) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9.2) ดังนี้

$$K_{d,q} = \frac{\sum_{m=14}^{18} \mu(Q_m) \times Q_m}{\sum_{m=14}^{18} \mu(Q_m)} \quad (9.2)$$



รูปที่ 9.2 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต error  $E$  ของพีชชีช่วย



รูปที่ 9.3 ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต factor  $K$  ของพีชชีช่วย

### 9.3.2 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของฟuzzyช่วย

การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $Q_1$  ถึง  $Q_{13}$  ของอินพุต error  $E$  ดังรูปที่ 9.2 และตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $Q_{14}$  ถึง  $Q_{18}$  ของเอาต์พุต factor  $K$  ที่ปรากฏในรูปที่ 9.3 ของฟuzzyช่วย จะใช้วิธีการออกแบบฟังก์ชันสมาชิกแบบสมมาตร ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนการออกแบบได้ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดเลือกค่าขนาดความผิดพลาด  $E_d$  และ  $E_q$  น้อยที่สุด ( $E_{d,min}$  และ  $E_{q,min}$  เท่ากับ  $E_{min}$ ) สำหรับใช้กำหนดเป็นขอบเขตต่ำสุดของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต error  $E$  โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้ค่า  $E_{min}$  เท่ากับ 0 (ทั้งนี้เนื่องจากค่าขนาดความผิดพลาดน้อยที่สุดที่เป็นไปได้มีค่าเท่ากับศูนย์)

ขั้นที่ 2 กำหนดหาค่าขนาดความผิดพลาด  $E_d$  และ  $E_q$  มากที่สุด ( $E_{d,max}$  และ  $E_{q,max}$  เท่ากับ  $E_{max}$ ) สำหรับใช้กำหนดเป็นขอบเขตสูงสุดของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต error  $E$  โดยใช้สมการที่ (9.3) ดังนี้

$$E_{max} = Me_{max} \quad (9.3)$$

จากสมการที่ (9.3)  $M$  คือ ค่าตัวประกอบขยายค่าความผิดพลาดสูงสุด ( $e_{max}$ ) ซึ่งจะต้องกำหนดให้มามีค่ามากกว่า 1 โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้  $M$  มีค่าเท่ากับ 10 ทั้งนี้เพื่อขยายค่าความผิดพลาดสูงสุด 10 เท่า (ขยายขอบเขตฟังก์ชันสมาชิกอินพุต error ของตัวควบคุมฟuzzy หลักออก 10 เท่า) สำหรับค่า  $e_{max}$  ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (8.4) ในบทที่ 8 โดยในกรณีการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyสำหรับระบบที่พิจารณา พบว่า ค่า  $e_{max}$  เท่ากับ 0.07 A ดังนั้น การคำนวณค่า  $E_{max}$  สำหรับใช้ออกแบบฟuzzyช่วยตามสมการที่ (9.3) จึงมีค่าเท่ากับ 0.7 แสดงได้ดังนี้

$$E_{max} = 10(0.07) = 0.7 \text{ A}$$

ขั้นที่ 3 กำหนดเลือกค่าตัวประกอบ  $K_d$  และ  $K_q$  น้อยที่สุด ( $K_{d,min}$  และ  $K_{q,min}$  เท่ากับ  $K_{min}$ ) สำหรับใช้กำหนดเป็นขอบเขตต่ำสุดของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต factor  $K$  โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้  $K_{min}$  มีค่าเท่ากับ 1 ทั้งนี้เนื่องจากถ้าค่าอินพุต  $E$  ตกอยู่ในย่านค่าเชิงภาษา zero จะกำหนดให้ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzyไม่เปลี่ยนแปลง หรือไม่มีการปรับค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzy

ขั้นที่ 4 กำหนดหาค่าตัวประกอบ  $K_d$  และ  $K_q$  มากที่สุด ( $K_{d,max}$  และ  $K_{q,max}$  เท่ากับ  $K_{max}$ ) สำหรับใช้กำหนดเป็นขอบเขตสูงสุดของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต factor  $K$

ด้วยสมการที่ (9.4) โดยที่  $U$  คือ ค่าตัวประกอบปรับเพิ่มขนาดแรงดันอ้างอิงที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy สำหรับระบบที่พิจารณาในบทที่ 8 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5

$$K_{max} = \frac{M}{U} \quad (9.4)$$

จากสมการที่ (9.4) เมื่อแทนค่า  $M$  เท่ากับ 10 และค่า  $U$  เท่ากับ 5 จะได้ผลการคำนวณค่า  $K_{max}$  เท่ากับ 2 ดังนี้

$$K_{max} = \frac{10}{5} = 2$$

ขั้นที่ 5 จำนวนค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $Q_1$  ถึง  $Q_{13}$  ของอินพุต error  $E$  โดยใช้ตารางที่ 9.1 จากตารางดังกล่าวเมื่อแทนค่า  $E_{min}$  เท่ากับ 0 และค่า  $E_{max}$  เท่ากับ 0.7 สุดท้ายจะได้ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $Q_1$  ถึง  $Q_{13}$  ของฟuzzy ช่วยแสดงดังรูปที่ 9.2 ( $Q_1, Q_3 = 0$ ,  $Q_2, Q_4, Q_6 = 0.175$ ,  $Q_5, Q_7, Q_9 = 0.35$ ,  $Q_8, Q_{10}, Q_{12} = 0.525$ ,  $Q_{11}, Q_{13} = 0.7$ )

ขั้นที่ 6 จำนวนค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $Q_{14}$  ถึง  $Q_{18}$  ของเอาต์พุต factor  $K$  โดยใช้ตารางที่ 9.1 จากตารางดังกล่าวดำเนินการแทนค่า  $K_{min}$  เท่ากับ 1 และค่า  $K_{max}$  เท่ากับ 2 จะได้ผลการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก  $Q_{14}$  ถึง  $Q_{18}$  ของฟuzzy ช่วยแสดงดังรูปที่ 9.3 ( $Q_{14} = 1$ ,  $Q_{15} = 1.25$ ,  $Q_{16} = 1.5$ ,  $Q_{17} = 1.75$ ,  $Q_{18} = 2$ )

ตารางที่ 9.1 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของฟuzzy ช่วยแบบสมมาตร

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error $E$														
$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$	$Q_9$	$Q_{10}$	$Q_{11}$	$Q_{12}$	$Q_{13}$		
$E_{min}$	$0.25E_{max}$	$E_{min}$	$0.25E_{max}$	$0.5E_{max}$	$0.25E_{max}$	$0.5E_{max}$	$0.75E_{max}$	$0.5E_{max}$	$0.75E_{max}$	$E_{max}$	$0.75E_{max}$	$E_{max}$		
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต factor $K$														
$Q_{14}$			$Q_{15}$			$Q_{16}$			$Q_{17}$			$Q_{18}$		
$K_{min}$			$\frac{3K_{min} + K_{max}}{4}$			$\frac{K_{min} + K_{max}}{2}$			$\frac{K_{min} + 3K_{max}}{4}$			$K_{max}$		

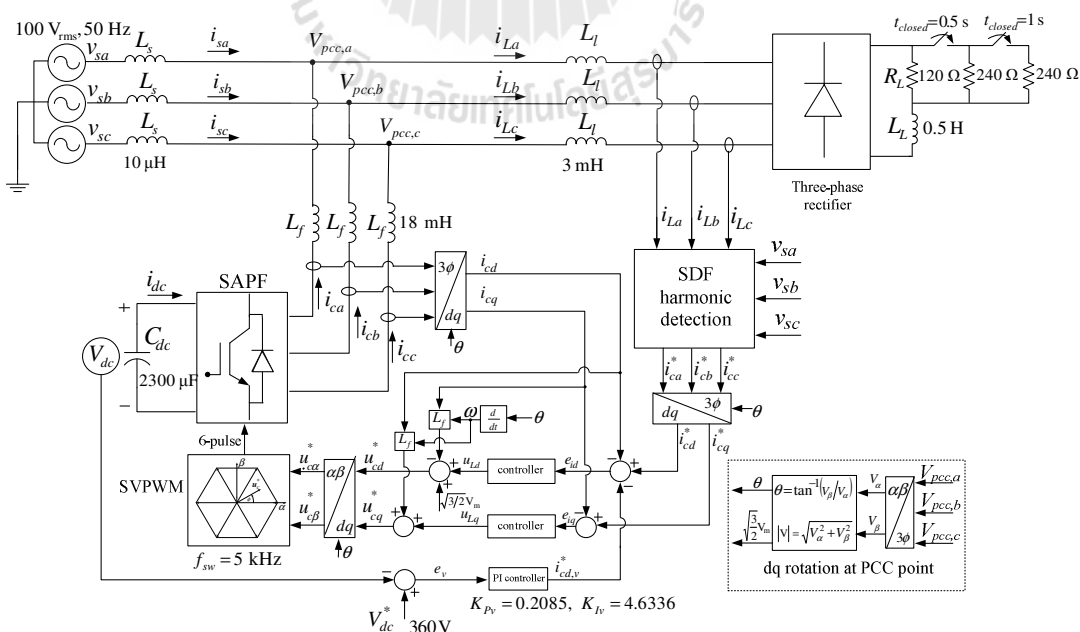
จากผลการออกแบบฟuzzy ช่วยข้างต้น ลำดับต่อไป คือ การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่โหลดของระบบที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลง เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ระหว่างการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy โดยไม่มีฟuzzy ช่วย และการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy แบบปรับตัว ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวสามารถดูได้ในหัวข้อที่ 9.4 ดังนี้

### 9.4 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกโพลดมีการเปลี่ยนแปลง

การจำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีโดยไม่มีพีชซีช่วย และการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัว โดยการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว จะกำหนดให้โพลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปจากโพลดที่พิจารณาที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโพลด  $R_L$  เท่ากับ  $80 \Omega$  อนุกรมกับ  $L_L$  เท่ากับ  $0.5 \text{ H}$  (ระบบที่พิจารณา คือ ระบบดังรูปที่ 5.10 ในบทที่ 5) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของโพลดดังกล่าวสามารถแบ่งได้ 2 กรณี คือ กรณีโพลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า และกรณีโพลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกระแสไฟฟ้า โดยรายละเอียดการจำลองสถานการณ์และผลการจำลองสถานการณ์ของทั้งสองกรณีสามารถอธิบายได้ดังนี้

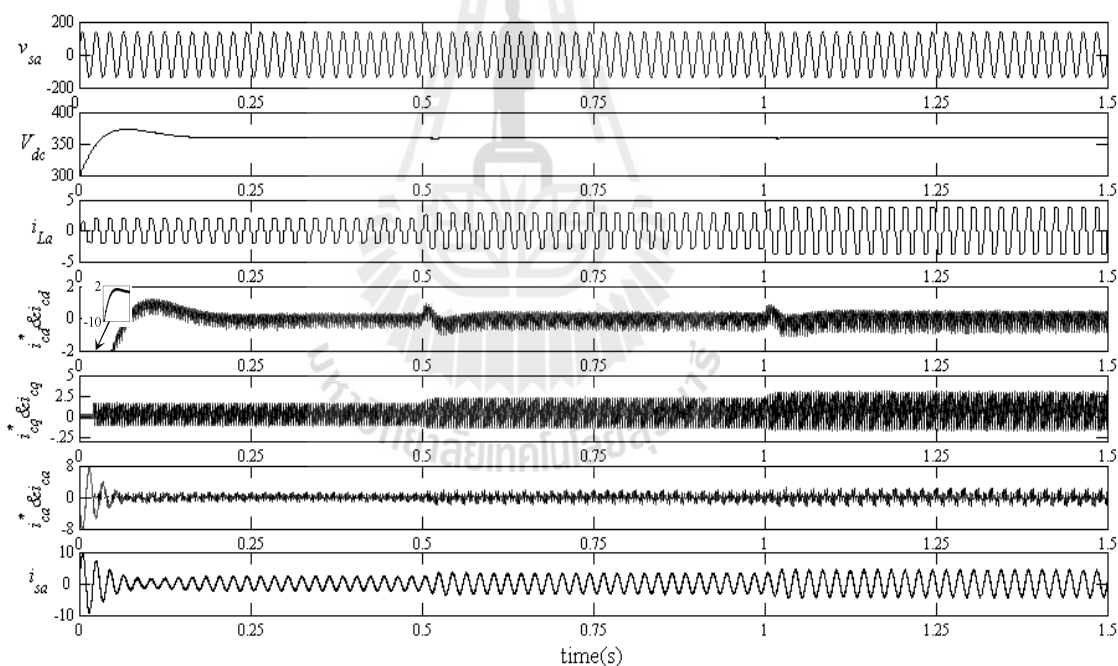
#### 9.4.1 การจำลองสถานการณ์กรณีโพลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า

การจำลองสถานการณ์กรณีโพลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า ทั้งขนาดน้อยลงและขนาดเพิ่มขึ้นไปจากโพลดที่พิจารณาเดิม (โพลดที่พิจารณามีค่าขอดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ  $3 \text{ A}$ ) จะได้นำเสนอในหัวข้อนี้ โดยกรณีที่โพลดมีขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลงจะกำหนดให้โพลด  $R_L$  ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีค่าเท่ากับ  $120 \Omega$  (ค่าขอดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ  $2 \text{ A}$ ) ส่วนกรณีโพลดมีขนาดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะกำหนดให้โพลด  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $60 \Omega$  (ค่าขอดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ  $4 \text{ A}$ ) สำหรับระบบกรณีโพลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.4



รูปที่ 9.4 ระบบที่พิจารณากรณีโพลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า

การจำลองสถานการณ์ระบบรูปที่ 9.4 จะใช้ระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปดังรูปที่ 7.38 ในบทที่ 7 โดยจะกำหนดให้โหลดของระบบที่สร้างอยู่บนโปรแกรม Simulink มีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลด  $R_L$  ตามที่กำหนดไว้ในรูปที่ 9.4 คือ ช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง 0.5 วินาที กำหนดให้  $R_L$  มีค่าเท่ากับ 120  $\Omega$  ช่วงเวลา 0.5 ถึง 1 วินาที กำหนดให้  $R_L$  มีค่าเท่ากับ 80  $\Omega$  (120  $\Omega$  ขนานกับ 240  $\Omega$  และเวลาตั้งแต่ 1 วินาที เป็นต้นไป กำหนดให้  $R_L$  มีค่าเท่ากับ 60  $\Omega$  (120  $\Omega$  240  $\Omega$  และ 240  $\Omega$  ขนานกัน) นอกจากนี้ระบบควบคุมกระแสชดเชยที่คำนวณอยู่บนบอร์ด eZdsp™ F28335 จะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีชชีโดยไม่มีพีชชีช่วยกับการใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว ซึ่งจากระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีโดยไม่มีพีชชีช่วยตั้งแต่เวลา 0 ถึง 1.5 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.5 และผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวในช่วงเวลาเดียวกัน แสดงได้ดังรูปที่ 9.9

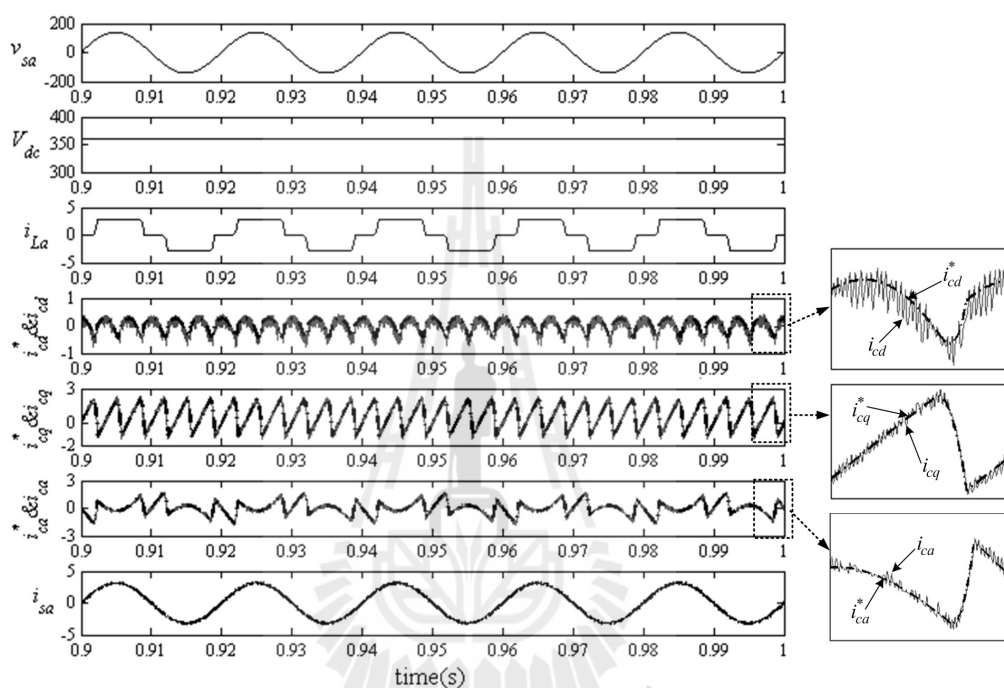


รูปที่ 9.5 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีโดยไม่มีพีชชีช่วยกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า

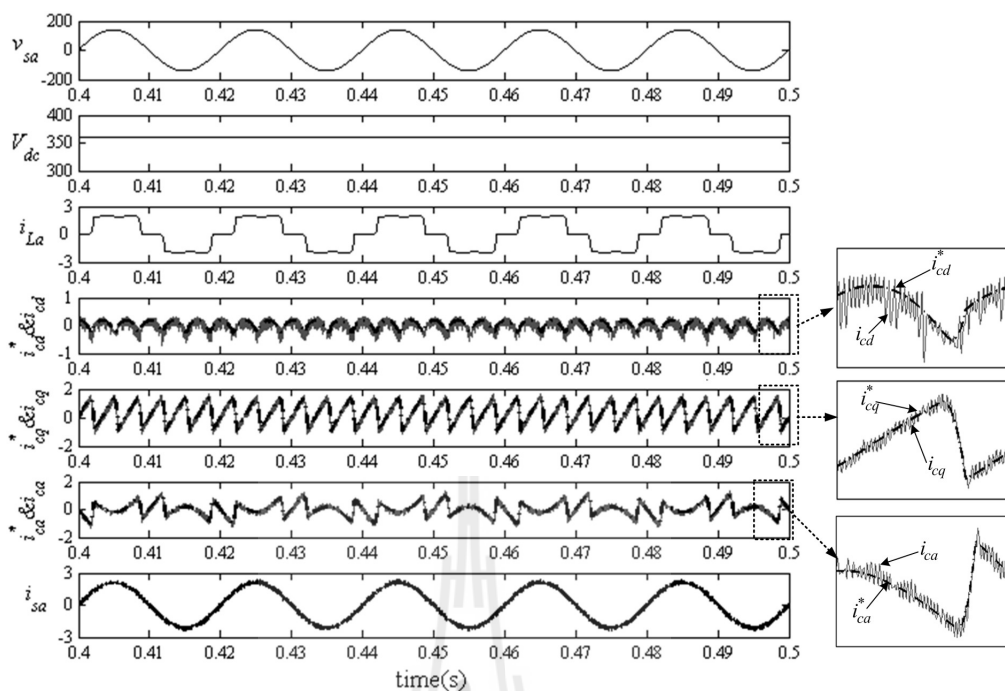
ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีโดยไม่มีพีชชีช่วยกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้างดังรูปที่ 9.5 ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.5 ถึง 1 วินาที คือ ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับกรณีโหลดที่พิจารณา ซึ่งสามารถแสดงผล



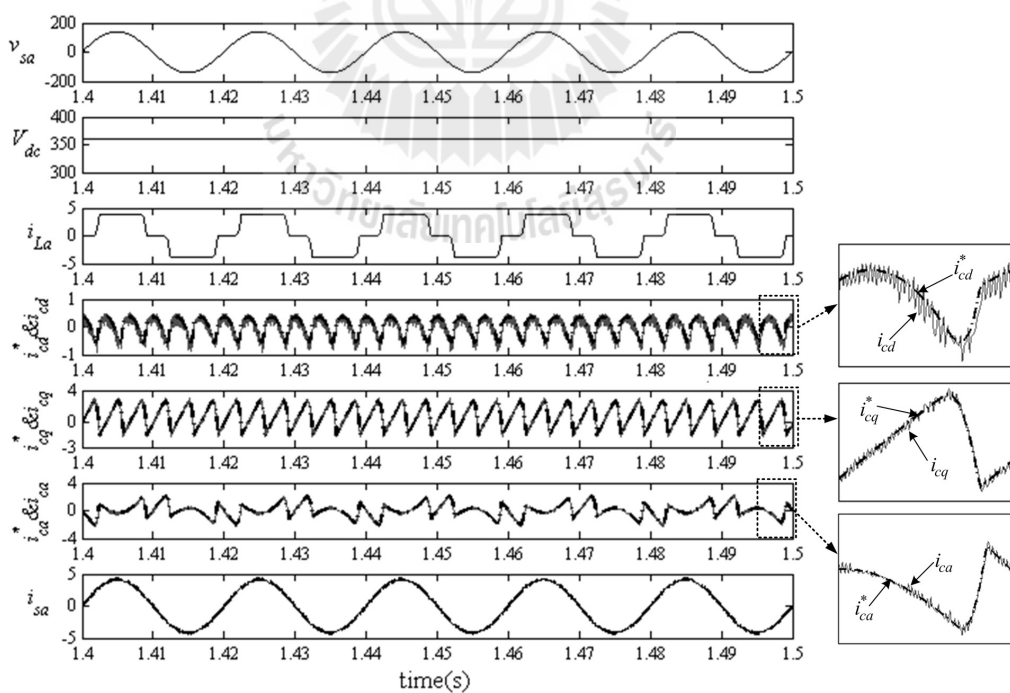
ในช่วงสภาวะคงตัวที่เวลา 0.9 ถึง 1 วินาที ได้ดังรูปที่ 9.6 สำหรับในช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง 0.5 วินาที คือ ผลการจำลองสถานการณ์กรณีโหลดมีขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลง โดยผลในช่วงสภาวะคงตัวที่เวลา 0.4 ถึง 0.5 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.7 นอกจากนี้ในช่วงเวลาดังแต่ 1 ถึง 1.5 วินาที คือ ผลการจำลองสถานการณ์กรณีโหลดมีขนาดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงผลในช่วงสภาวะคงตัวที่เวลา 1.4 ถึง 1.5 วินาที ได้ดังรูปที่ 9.8 ดังนี้



รูปที่ 9.6 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชี โดยไม่มีพีชชีช่วยกรณีโหลดที่พิจารณา



รูปที่ 9.7 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสขดขยที่ใชตัวควบคุมพีชชี่ โดยไม่มีพีชชี่ช่วยกรณีโหลดมีขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลง



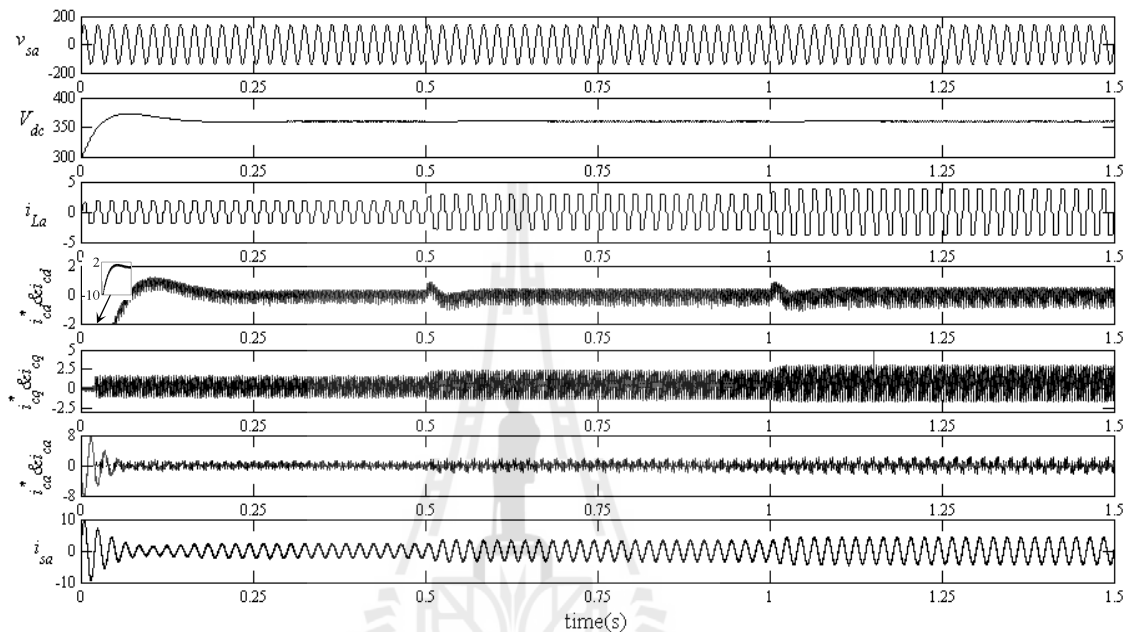
รูปที่ 9.8 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสขดขยที่ใชตัวควบคุมพีชชี่ โดยไม่มีพีชชี่ช่วยกรณีโหลดมีขนาดกระแสไฟฟ้เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 9.6 กรณีโหลดที่พิจารณาที่มีค่ายอดกระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_{La}$ ) เท่ากับ 3 A สังเกตได้ว่า การควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซีโดยไม่มีพีซีซีช่วย (ที่นำเสนอการออกแบบในหัวข้อที่ 8.22 บทที่ 8) สามารถควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) ให้มีลักษณะที่คล้ายตามรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิว ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF โดยเมื่อขยายรูปสัญญาณในช่วงรูปสัญญาณที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด พบว่า กระแสชดเชยสามารถเกาะกระแสอ้างอิงได้ดีทั้งสองแกน จากผลการควบคุมดังกล่าว จึงทำให้วงจรรอกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยบนแกนสามเฟสได้ตามกระแสอ้างอิงบนแกนสามเฟสได้ดีด้วยเช่นกัน ดังผลแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอ้างอิงกับกระแสชดเชยของเฟส  $a$  ( $i_{ca}^*$  &  $i_{ca}$ ) จากผลการฉีดกระแสชดเชยดังกล่าว จึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_{sa}$ ) ภายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชยที่มีลักษณะรูปสัญญาณเช่นเดียวกับกระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_{La}$ ) โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยของเฟส  $a$  มีค่าเท่ากับ 1.67% ในขณะที่ก่อนชดเชยมีค่าเท่ากับ 26.37% (สำหรับผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส  $b$  และ  $c$  จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับเฟส  $a$  โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟสสามารถดูได้จากตารางที่ 9.2)

จากรูปที่ 9.7 กรณีกระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_{La}$ ) มีขนาดน้อยลงที่ค่ายอดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2 A จะสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีซีซีที่ออกแบบสำหรับกรณีโหลดที่พิจารณา ยังคงสามารถควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) ให้มีลักษณะคล้ายตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ของกรณีโหลดขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลงได้เช่นกัน โดยจะเห็นได้จากรูปขยายที่กระแสชดเชยทั้งสองแกนสามารถเกาะตามรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงในช่วงที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดได้ดี และทำให้วงจรรอกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยบนแกนสามเฟสได้ตามกระแสอ้างอิงดังผลของเฟส  $a$  ( $i_{ca}^*$  &  $i_{ca}$ ) จากผลดังกล่าว จึงส่งผลให้รูปสัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_{sa}$ ) ภายหลังการชดเชยมีลักษณะที่เป็นไซน์เพิ่มขึ้นเช่นกันในกรณีโหลดนี้ ซึ่งวัดค่า %THD เท่ากับ 2.45% ในขณะที่ก่อนชดเชย %THD ดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 27.18% (สำหรับผลค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟสสามารถดูได้จากตารางที่ 9.2)

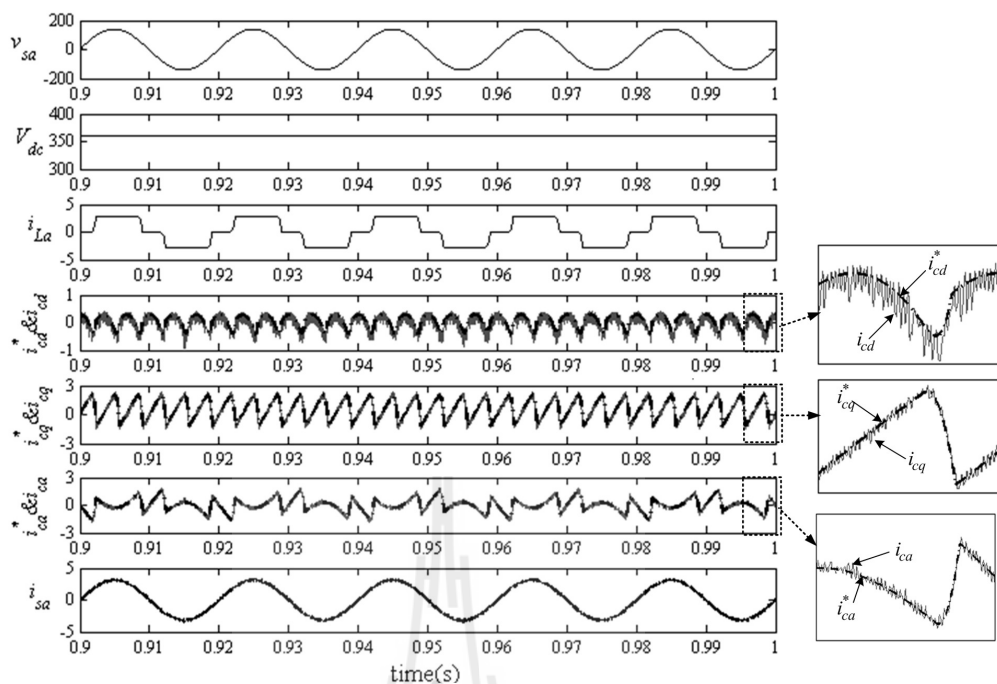
จากรูปที่ 9.8 กรณีกระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_{La}$ ) มีขนาดเพิ่มขึ้นที่ค่ายอดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4 A สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีซีซีสามารถควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) ให้มีลักษณะคล้ายตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ได้ แต่เมื่อขยายรูปสัญญาณในช่วงที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด พบว่า กระแสชดเชยบนแกนดีคิวไม่สามารถเกาะตามกระแสอ้างอิงได้ดีเท่ากับกรณีโหลดที่พิจารณา แต่อย่างไรก็ตาม ผลการฉีดกระแสชดเชยบนแกนสามเฟสของวงจรรอกำลังแอกทีฟโดยภาพรวมยังคงมีลักษณะที่คล้ายตามกระแสอ้างอิง ซึ่งสามารถดูผลได้จาก

เฟส  $a$  ( $i_{ca}^*$  &  $i_{ca}$ ) จากผลการฉีดกระแสชดเชยดังกล่าว จึงส่งผลกระแสไฟฟ้าที่จ่าย ( $i_{sa}$ ) ภายหลังการชดเชยมีลักษณะที่เป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้น โดยพบว่าค่า  $\%THD$  ในกรณีโหลดนี้ มีค่าลดลงเท่ากับ 1.50% จากก่อนการชดเชยที่มีค่าเท่ากับ 25.69% (ผลค่า  $\%THD$  ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟส สามารถดูได้จากตารางที่ 9.2)

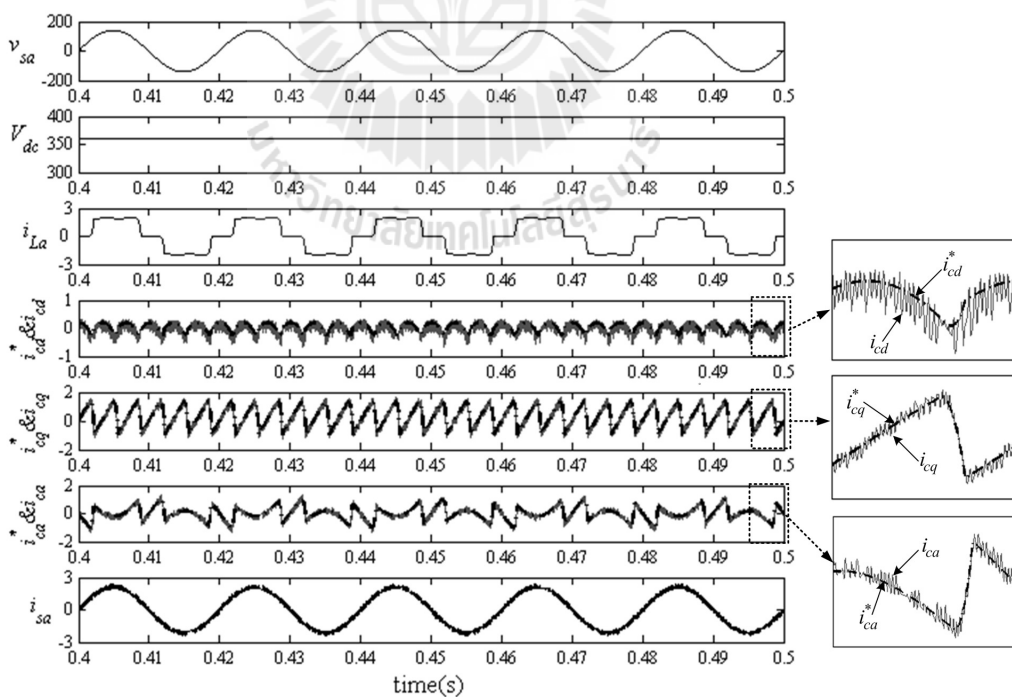


รูปที่ 9.9 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัวกรณี โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า

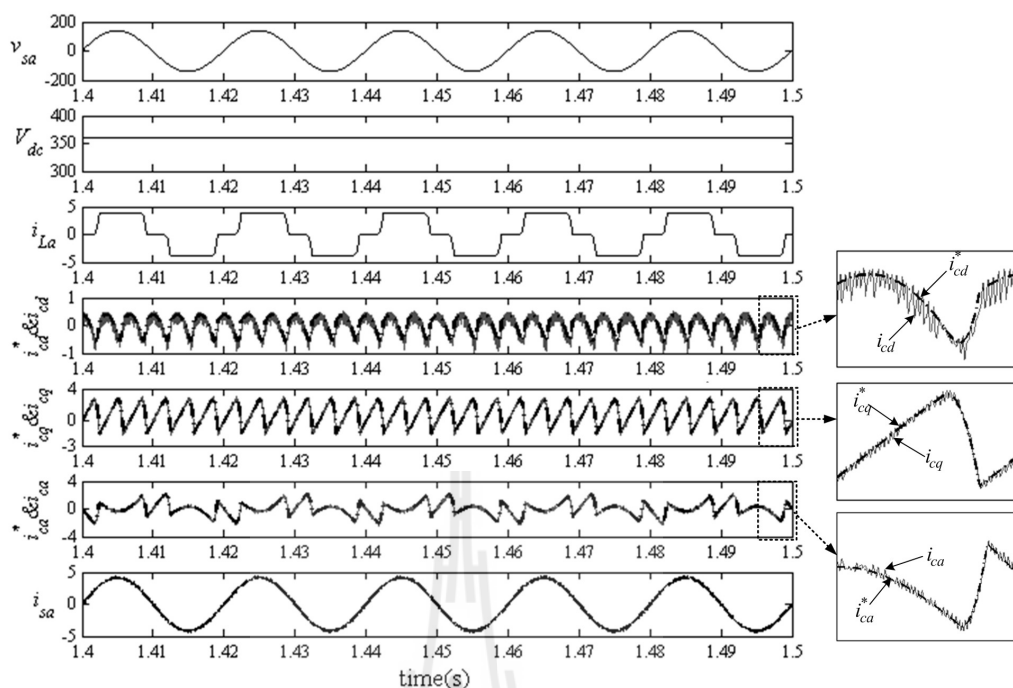
ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัวกรณี โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 9.9 โดยผลในช่วงสภาวะคงตัวของกรณีโหลดที่พิจารณาที่เวลา 0.90 ถึง 1 วินาที ได้ดังรูปที่ 9.10 ผลการจำลองสถานการณ์ในช่วงสภาวะคงตัวกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลงที่เวลา 0.40 ถึง 0.5 แสดงได้ดังรูปที่ 9.11 และผลการจำลองสถานการณ์ในสภาวะคงตัวกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่เวลา 1.40 ถึง 1.5 วินาที สามารถดูได้จากรูปที่ 9.12 ดังนี้



รูปที่ 9.10 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสขดขยที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซี แบบปรับตัวกรณี โหลดที่พิจารณา



รูปที่ 9.11 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสขดขยที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซี แบบปรับตัวกรณี โหลดมีขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลง



รูปที่ 9.12 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซี แบบปรับตัวกรณี โหลดมีขนาดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 9.10 กรณีโหลดที่พิจารณาที่มีค่าขดกระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_{La}$ ) เท่ากับ 3 A สังเกตได้ว่า การควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซีแบบปรับตัวตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 9.3 สามารถควบคุมให้กระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) มีลักษณะที่คล้ายตามรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิว ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) โดยพบว่าในช่วงรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดกระแสชดเชยสามารถเกาะตามกระแสอ้างอิงได้ดีดังรูปขยายของทั้งสองแกน นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า กระแสชดเชยบนแกนสามเฟสที่จัดโดยวงจรกรองกำลังแยกทีฟมีลักษณะที่คล้ายตามกระแสอ้างอิงบนแกนสามเฟสเช่นกันดังผลของเฟส  $a$  ( $i_{ca}^*$  &  $i_{ca}$ ) จากผลดังกล่าว จึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_{sa}$ ) ภายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยวัดค่า %THD หลังการชดเชยของเฟส  $a$  ได้ค่าเท่ากับ 1.58% (ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟส สามารถดูได้จากตารางที่ 9.2)

จากรูปที่ 9.11 กรณีกระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_{La}$ ) มีขนาดน้อยลงที่ค่าขดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2 A สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีซีซีแบบปรับตัวสามารถปรับการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) ให้มีลักษณะคล้ายตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) ได้ดี โดยกระแสชดเชยสามารถเกาะตามรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงได้ดีในช่วงที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด

ซึ่งสามารถดูได้จากรูปขยายของทั้งสองแกน จากผลการควบคุมดังกล่าว จึงทำให้วงจรรอกกำลัง แอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยบนแกนสามเฟสได้ตามกระแสอ้างอิงดังผลแสดงของเฟส  $a$  ( $i_{ca}^*$  &  $i_{ca}$ ) โดยผลกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_{sa}$ ) ภายหลังจากชดเชย พบว่า มีลักษณะรูปสัญญาณที่เป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้น ซึ่งวัดค่า %THD ของเฟส  $a$  ได้เท่ากับ 2.21% (ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟส สามารถดูได้จากตารางที่ 9.2)

จากรูปที่ 9.12 กรณีกระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_{La}$ ) มีขนาดเพิ่มขึ้นที่ค่ายอดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4 A สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวสามารถควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) ให้มีลักษณะคล้ายตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) และสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้เกาะตามกระแสอ้างอิงในช่วงรูปสัญญาณที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับกรณีการใช้เพียงตัวควบคุมพีชซี ดังผลแสดงแบบรูปขยายของทั้งสองแกน นอกจากนี้ ผลการฉีดกระแสชดเชยบนแกนสามเฟสของวงจรรอกกำลังแอกทีฟยังมีลักษณะที่คล้ายตามกระแสอ้างอิงได้ดีเช่นกันดังผลของเฟส  $a$  ( $i_{ca}^*$  &  $i_{ca}$ ) จากผลดังกล่าว จึงส่งผลกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_{sa}$ ) ภายหลังจากชดเชยมีลักษณะที่เป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้น ซึ่งวัดค่า %THD ได้เท่ากับ 1.44% (ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟส สามารถดูได้จากตารางที่ 9.2)

สำหรับผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟทั้งสามกรณี โหลด ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 1.5 วินาที ดังรูปที่ 9.5 (การควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีชซี) และรูปที่ 9.9 (การควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัว) สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบไว้ในบทที่ 4 ( $K_{Pv} = 0.2085$ ,  $K_{Iv} = 4.6336$ ) สามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าเท่ากับ 360 V ตามค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง ( $V_{dc}^*$ ) ได้ตลอดช่วงเวลาที่วงจรรอกกำลังแอกทีฟทำการฉีดกระแสชดเชย โดยผลการควบคุมค่าแรงดันดังกล่าวใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.18 วินาที นอกจากนี้ ในช่วงเวลาที่โหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันสองครั้งที่เวลา 0.5 และ 1.0 วินาที พบว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงดังกล่าวมีค่าประมาณคงที่ด้วยเช่นกัน (การเปลี่ยนแปลงมีค่าเพียงเล็กน้อย)

จากผลการจำลองสถานการณ์กรณีกำหนดให้โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าข้างต้น สามารถเปรียบเทียบผลค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟสได้ดังตารางที่ 9.2 จากตารางดังกล่าว จะสังเกตได้ว่า ค่า %THD เฉลี่ยหลังการชดเชยของการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวและที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีชซีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยกรณีการใช้ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวให้ค่า %THD เฉลี่ยที่น้อยกว่าการใช้เพียงตัวควบคุมพีชซี โดยไม่มีพีชซีช่วยเล็กน้อย คือ กรณีโหลดที่พิจารณา (โหลด  $R_L = 80 \Omega$ ) ค่า %THD เฉลี่ยของตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวให้ค่าเท่ากับ 1.57% กรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า

น้อยลง (โหลด  $R_L = 120 \Omega$ ) มีค่า  $\%THD$  เฉลี่ยเท่ากับ 2.04% และกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (โหลด  $R_L = 60 \Omega$ ) ค่า  $\%THD$  เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.45% ในขณะที่การควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้เพียงตัวควบคุมพีชชีให้ค่า  $\%THD$  เฉลี่ยเท่ากับ 1.61% 2.46% และ 1.53% ตามลำดับกรณีโหลด จากผลดังกล่าว หมายความว่า ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวมีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ดีกว่าตัวควบคุมพีชชีเพียงเล็กน้อยทั้งกรณีโหลดที่พิจารณาและกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลงและเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 9.2 การเปรียบเทียบค่า  $\%THD$  กรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า (โหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลด  $R_L$  อนุกรมกับ  $L_L$ )

เฟส	ค่า $\%THD$ ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_s$ )								
	โหลด $R_L = 120 \Omega, L_L = 0.5 \text{ H}$ (ค่าขุดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2 A)			โหลด $R_L = 80 \Omega, L_L = 0.5 \text{ H}$ (ค่าขุดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3 A)			โหลด $R_L = 60 \Omega, L_L = 0.5 \text{ H}$ (ค่าขุดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4 A)		
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย		ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย		ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย	
		Fuzzy controller	Adaptive fuzzy controller		Fuzzy controller	Adaptive fuzzy controller		Fuzzy controller	Adaptive fuzzy controller
a	27.18%	2.45%	2.21%	26.37%	1.67%	1.58%	25.69%	1.50%	1.44%
b	27.21%	2.66%	1.91%	26.40%	1.65%	1.37%	25.71%	1.54%	1.55%
c	27.21%	2.25%	2.05%	26.40%	1.50%	1.74%	25.72%	1.53%	1.36%
เฉลี่ย	27.20%	2.46%	2.04%	26.39%	1.61%	1.57%	25.71%	1.53%	1.45%

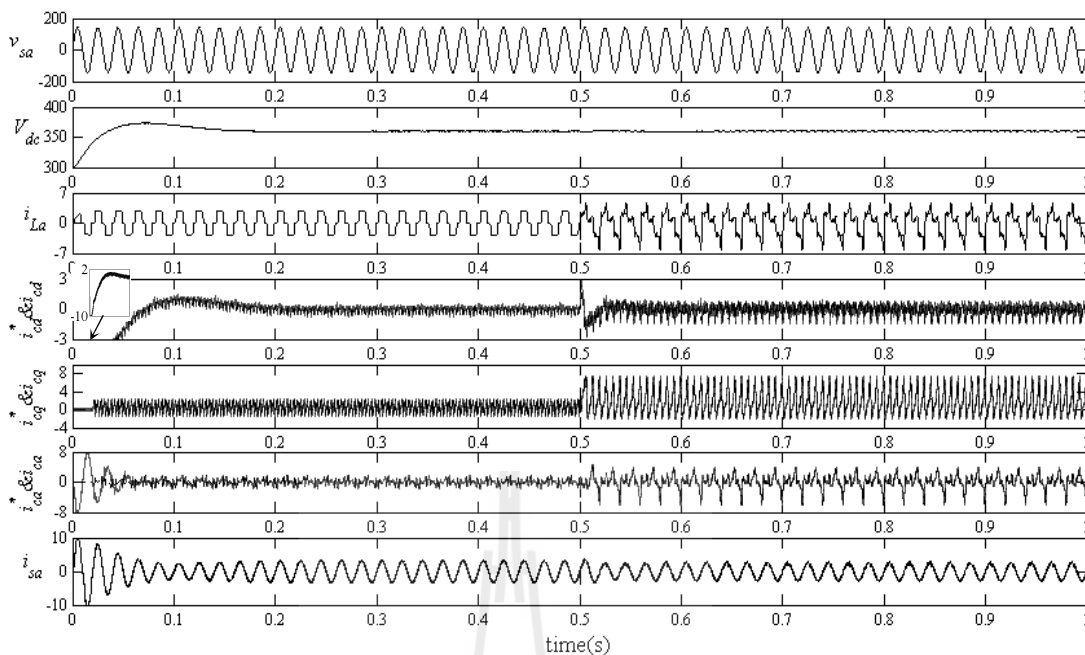
#### 9.4.2 การจำลองสถานการณ์กรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกระแสไฟฟ้า

การจำลองสถานการณ์กรณีโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกระแสไฟฟ้าไปจากโหลดที่พิจารณาเดิม จะกำหนดให้โหลดเปลี่ยนเป็นโหลดกระแสทางอุดมคติ (Ideal current load) ทั้งนี้เนื่องจากการปรับค่า  $R_L$  และ  $L_L$  ของโหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างของกระแสไฟฟ้า แต่ในทางตรงข้าม การกำหนดใช้โหลดกระแสทางอุดมคติจะสามารถกำหนดรูปร่างของกระแสไฟฟ้าได้ตามต้องการ การจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีชชีโดยไม่มีพีชชีช่วยกับการใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวสำหรับกรณีโหลดดังกล่าว สามารถอธิบายได้ดังนี้

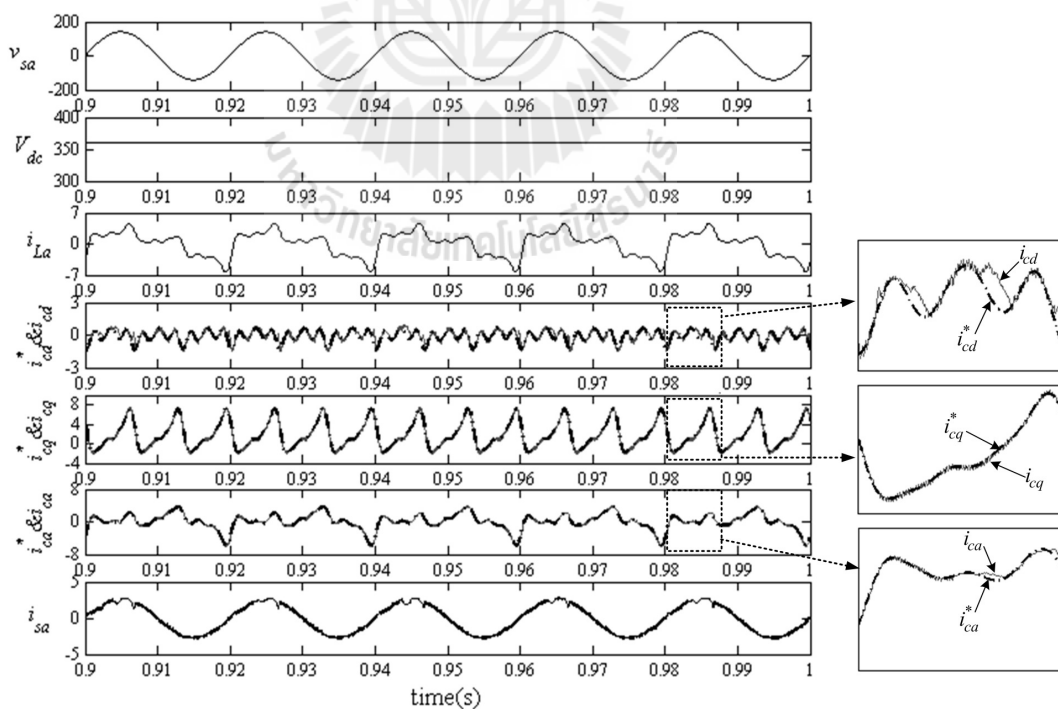
การจำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้จะกำหนดให้โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกระแสไฟฟ้าจากกรณีโหลดที่พิจารณาเป็นโหลดกระแสทางอุดมคติที่กำหนดตามสมการที่



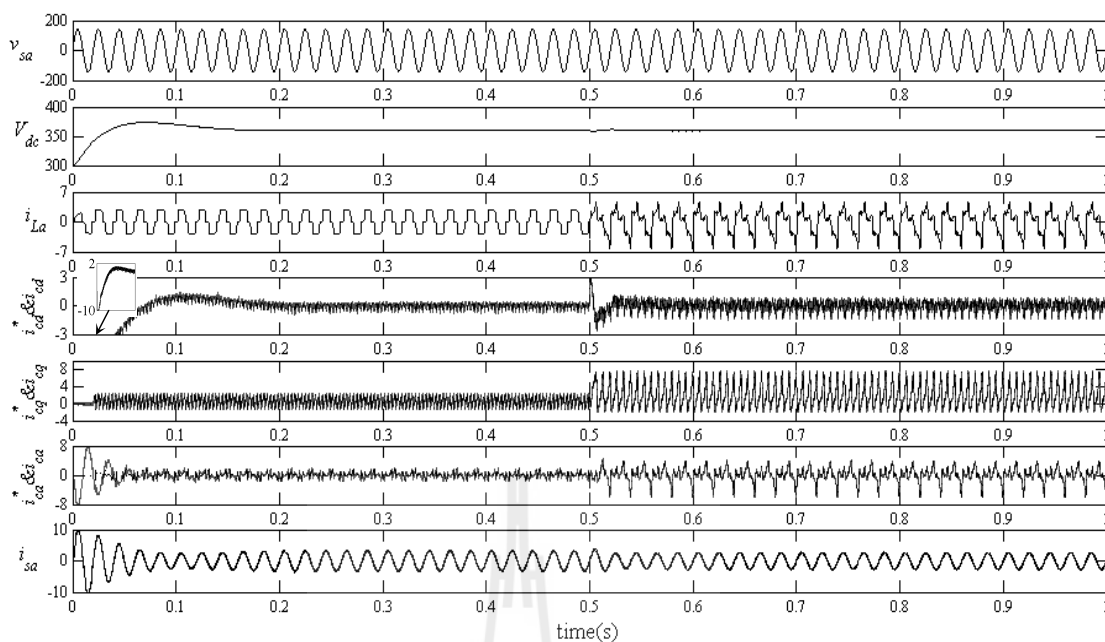




รูปที่ 9.14 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีโดยไม่มีพีชชีช่วยกรณีโหลดเปลี่ยนเป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติ



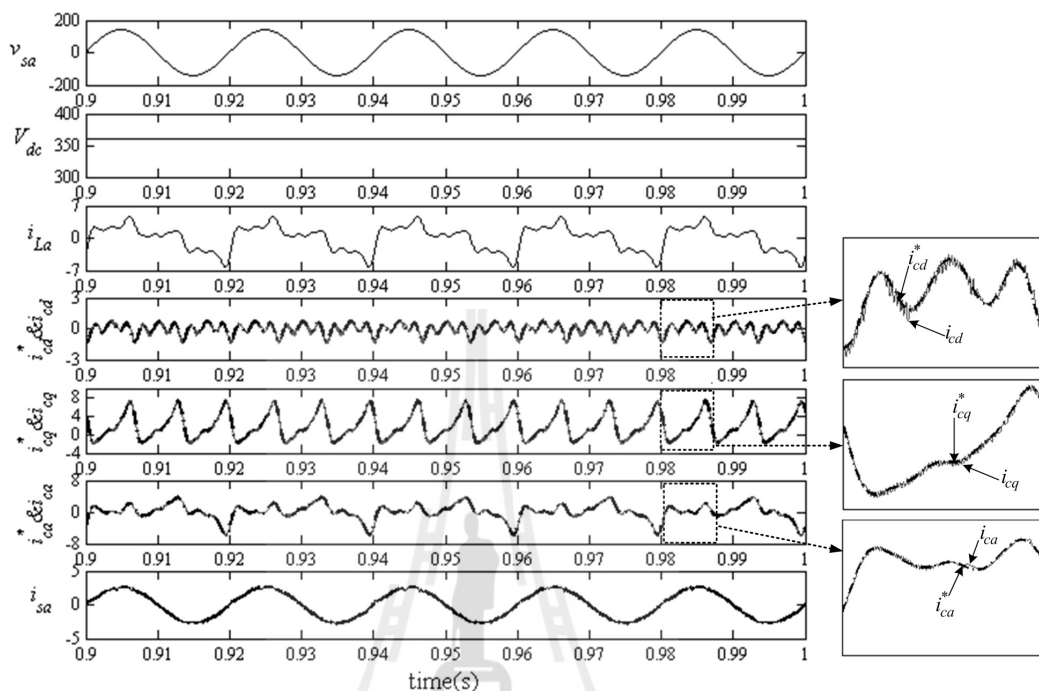
รูปที่ 9.15 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีโดยไม่มีพีชชีช่วยกรณีโหลดกระแสทางอุดมคติ



รูปที่ 9.16 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว  
กรณีโหลดเปลี่ยนเป็น โหลดกระแสทางอุดมคติ

จากผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีโดยไม่มีพีชชีช่วยกรณีที่โหลดเปลี่ยนจากโหลดที่พิจารณาเดิมเป็นโหลดกระแสทางอุดมคติดังรูปที่ 9.14 สามารถแสดงผลในช่วงสภาวะคงตัวของ โหลดที่เปลี่ยนใหม่ที่เวลา 0.9 ถึง 1.0 วินาที ได้ดังรูปที่ 9.15 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีชชีที่ออกแบบสำหรับโหลดที่พิจารณาไม่สามารถควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดี ( $i_{cd}$ ) ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง ( $i_{cd}^*$ ) ของโหลดใหม่ตลอดทั้งรูปสัญญาณ โดยเมื่อขยายรูปกราฟการเปรียบเทียบระหว่างกระแสชดเชยกับกระแสอ้างอิงบนแกนดังกล่าวจะเห็นได้ว่า กระแสชดเชยบนแกนดีหลุดออกจากการเกาะตามกระแสอ้างอิงในช่วงที่รูปสัญญาณมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด ในขณะที่กระแสชดเชยบนแกนคิว ( $i_{cq}$ ) สามารถเกาะตามกระแสอ้างอิง ( $i_{cq}^*$ ) ได้ดีตลอดทั้งรูปสัญญาณ จากผลการควบคุมดังกล่าว จึงทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟไม่สามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะของกระแสอ้างอิงบนแกนสามเฟสตลอดทั้งรูปสัญญาณเช่นกันดังผลแสดงการเปรียบเทียบของกระแสอ้างอิงกับกระแสชดเชยของเฟส a ( $i_{ca}^*$  &  $i_{ca}$ ) ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบ พบว่า กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_{sa}$ ) ภายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์ที่ไม่บริสุทธิ์โดยจะมีลักษณะรูปสัญญาณเป็นรอยบากเป็นช่วง ๆ โดยวัดค่า %THD ของเฟส a ภายหลังการชดเชยได้ค่าเท่ากับ 6.60% ในขณะที่ก่อนการชดเชยที่มีค่าเท่ากับ 75.51% (ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟสสำหรับ

การควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีในกรณีโหลดกระแสทางอุดมคติได้แสดงไว้ในตารางที่ 9.3)



รูปที่ 9.17 ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวกรณีโหลดกระแสทางอุดมคติ

จากผลการจำลองสถานการณ์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีปรับตัวกรณีที่โหลดเปลี่ยนเป็นโหลดกระแสทางอุดมคติดังรูปที่ 9.16 สามารถแสดงผลในช่วงสถานะคงตัวที่เวลา 0.9 ถึง 1.0 วินาที ได้ดังรูปที่ 9.17 โดยจะสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวสามารถควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) ให้มีลักษณะที่คล้ายตามรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิว ( $i_{cd}^*, i_{cq}^*$ ) โดยในช่วงที่รูปสัญญาณกระแสอ้างอิงมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด พบว่า กระแสชดเชยสามารถเกาะกระแสอ้างอิงได้ดีซึ่งสามารถดูได้จากรูปขยายของทั้งสองแกน ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้กระแสชดเชยบนแกนสามเฟสของวงจรรองกำลังแยกที่พีมีลักษณะตามกระแสอ้างอิงได้ดีเช่นกันดังผลของเฟส  $a$  ( $i_{ca}^*$  &  $i_{ca}$ ) จากผลดังกล่าว จึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_{sa}$ ) ภายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้นจากก่อนการชดเชยและมีความเป็นไซน์มากกว่ากรณีระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีชชี โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่

แหล่งจ่ายหลังการชดเชยสำหรับการควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวมีค่าเท่ากับ 3.99% (ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟสสามารถดูได้จากตารางที่ 9.3 เช่นกัน)

นอกจากนี้สำหรับผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟตั้งแต่เวลา 0 ถึง 1 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 9.14 และ 9.16 สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมฟัซซียังคงมีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าตามแรงดันอ้างอิง ( $V_{dc}^*$ ) ได้ โดยเท่ากับ 360 V ซึ่งใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 0.18 วินาทีเช่นเดิม อีกทั้งยังสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดเปลี่ยนเป็นโหลดกระแสทางอุดมคติอย่างฉับพลันที่เวลา 0.5 วินาที พบว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงดังกล่าวยังมีค่าประมาณคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 9.3 การเปรียบเทียบค่า %THD กรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกระแสไฟฟ้า (โหลดกระแสทางอุดมคติที่กำหนดตามสมการที่ (8.5))

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย ( $i_s$ )		
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย	
		Fuzzy controller	Adaptive fuzzy controller
a	75.51%	6.60%	3.99%
b	75.38%	5.73%	3.95%
c	75.46%	7.60%	3.44%
เฉลี่ย	75.45%	6.70%	3.79%

การเปรียบเทียบค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยกรณีโหลดเป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติ ระหว่างการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีโดยไม่มีฟัซซีช่วยกับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.3 จากตารางดังกล่าว พบว่า การควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวให้ค่า %THD เฉลี่ยเท่ากับ 3.79% ซึ่งน้อยกว่าการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้เพียงตัวควบคุมฟัซซีโดยไม่มีฟัซซีช่วย โดยค่า %THD เฉลี่ยของการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้เพียงตัวควบคุมฟัซซีมีค่าเท่ากับ 6.70% จากผลดังกล่าว หมายความว่า ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวมีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ดีกว่าตัวควบคุมฟัซซีในกรณีโหลดเปลี่ยนแปลงนี้

จากผลจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟกรณีกำหนดให้โหลดมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและรูปร่างกระแสไฟฟ้าตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 9.4.1 และ 9.4.2 พบว่า ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวและตัวควบคุมฟัซซีมีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชย

ของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ดีใกล้เคียงกันในกรณีที่โหลดเปลี่ยนขนาดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและ  
 น้อยลง แต่ในกรณีที่โหลดเปลี่ยนรูปร่างกระแสไฟฟ้าเป็น โหลดกระแสทางอุดมคติ พบว่า การ  
 ควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้เพียงตัวควบคุมพีซีซีโดยไม่มีพีซีซีช่วยมีสมรรถนะที่ไม่ดีพอต่อการ  
 ควบคุมกระแสชดเชยที่มีรูปร่างเปลี่ยนแปลง ในขณะที่ตัวควบคุมพีซีซีแบบปรับตัวสามารถปรับ  
 การควบคุมกระแสชดเชยได้ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีซีซี จากผลดังกล่าวจึงแสดงให้เห็นถึง  
 ประโยชน์และข้อดีของการใช้ตัวควบคุมพีซีซีแบบปรับตัวที่สามารถให้ประสิทธิผลการควบคุม  
 กระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ดีและมีความยืดหยุ่นในการควบคุมมากกว่าการใช้ตัว  
 ควบคุมพีซีซี

## 9.5 สรุป

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงไปจาก  
 โหลดที่พิจารณาเดิม จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องอาศัยการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลัง  
 แอกทีฟที่สามารถปรับตัวได้ ทั้งนี้เพื่อให้การควบคุมกระแสชดเชยมีประสิทธิผลที่ดีโดยไม่ต้องทำ  
 การออกแบบตัวควบคุมใหม่ ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุม  
 พีซีซีแบบปรับตัว ซึ่งประกอบด้วย ตัวควบคุมพีซีซีและพีซีซีช่วย ผลการจำลองสถานการณ์การ  
 เปรียบเทียบระหว่างการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซีแบบปรับตัวและการใช้เพียงตัว  
 ควบคุมพีซีซี โดยมีพีซีซีช่วยกรณีกำหนดให้โหลดมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและรูปร่าง  
 กระแสไฟฟ้า พบว่า การควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้เพียงตัวควบคุมพีซีซีมีสมรรถนะการควบคุมที่ดี  
 ในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า แต่ไม่สามารถให้สมรรถนะการควบคุมที่ดี  
 พอในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกระแสไฟฟ้า ในขณะที่การควบคุมกระแสชดเชยด้วย  
 ตัวควบคุมพีซีซีแบบปรับตัวสามารถให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีในทุกกรณี โหลดที่  
 ทดสอบเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุม  
 พีซีซีแบบปรับตัวมีประสิทธิผลที่ดีและยืดหยุ่นกว่าการใช้ตัวควบคุมพีซีซีเมื่อโหลดของระบบมีการ  
 เปลี่ยนแปลง

## บทที่ 10

### ระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟ

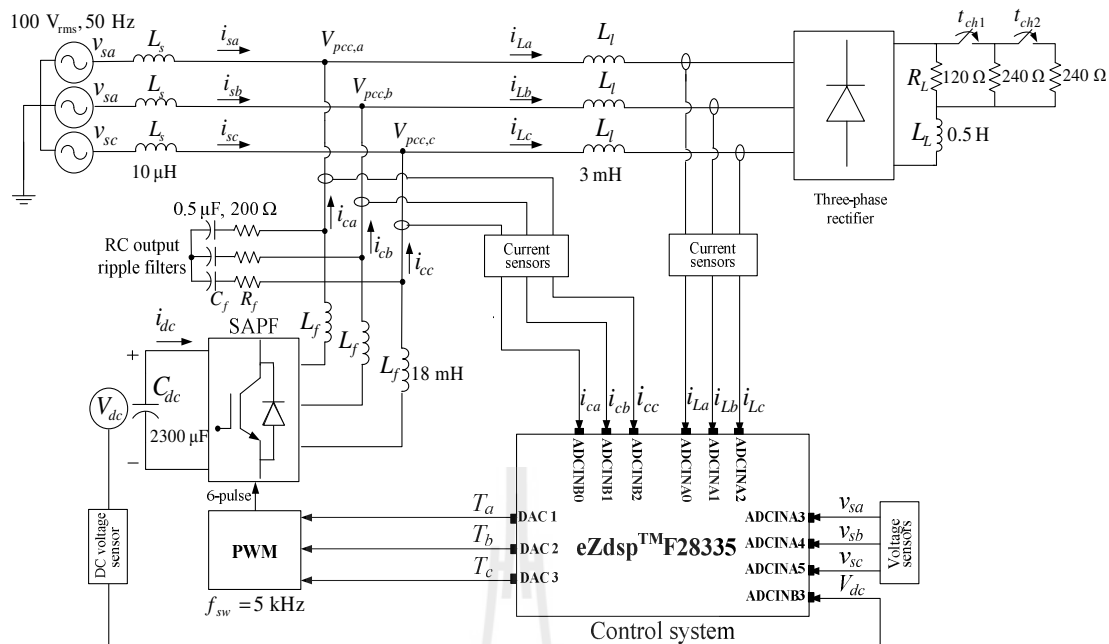
#### 10.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะนำเสนอการสร้างสรรค์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟ เพื่อดำเนินการทดสอบในทางปฏิบัติ โดยการทดสอบดังกล่าวจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (ตามที่ได้แนะนำในบทที่ 4) กับการใช้ตัวควบคุมพีซีซีที่ออกแบบด้วยวิธีการใหม่ (ตามที่ได้แนะนำในบทที่ 8) และกรณีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซีกับการใช้ตัวควบคุมพีซีซีแบบปรับตัว (ตามที่ได้แนะนำในบทที่ 9) โดยโพลของระบบที่ใช้สำหรับการทดสอบ คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า การสร้างสรรค์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟรวมถึงระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรงจะอธิบายในหัวข้อที่ 10.2 และการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมกระแสชดเชยของทั้งสองกรณีจะนำเสนอในหัวข้อที่ 10.3 ดังนี้

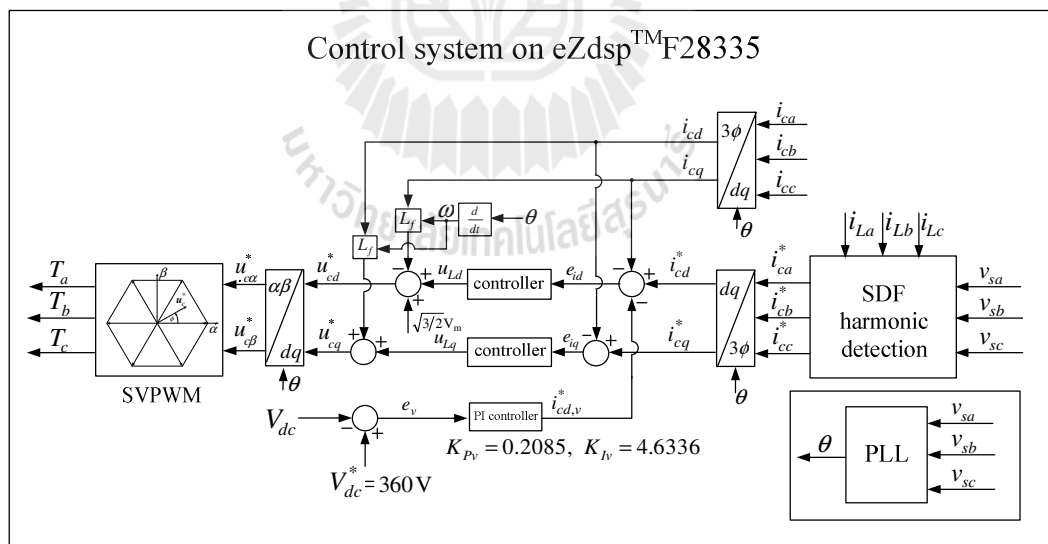
#### 10.2 การสร้างสรรค์ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟ

ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟที่พิจารณาสร้างเป็นระบบฮาร์ดแวร์ คือ ระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 9.4 ในบทที่ 9 จากระบบดังกล่าว เมื่อนำมาเขียนแสดงใหม่สำหรับใช้ในการอธิบายการสร้างฮาร์ดแวร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10.1 โดยในส่วนของระบบควบคุมประกอบด้วย การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิวจะดำเนินการคำนวณทางดิจิทัล โดยใช้บอร์ด eZdsp™ F28335 ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 10.2

สำหรับผลการดำเนินการสร้างสรรค์ระบบดังรูปที่ 10.1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10.3 จากรูปดังกล่าว การดำเนินสร้างระบบได้ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 14 ชุดอุปกรณ์หลัก ดังนี้

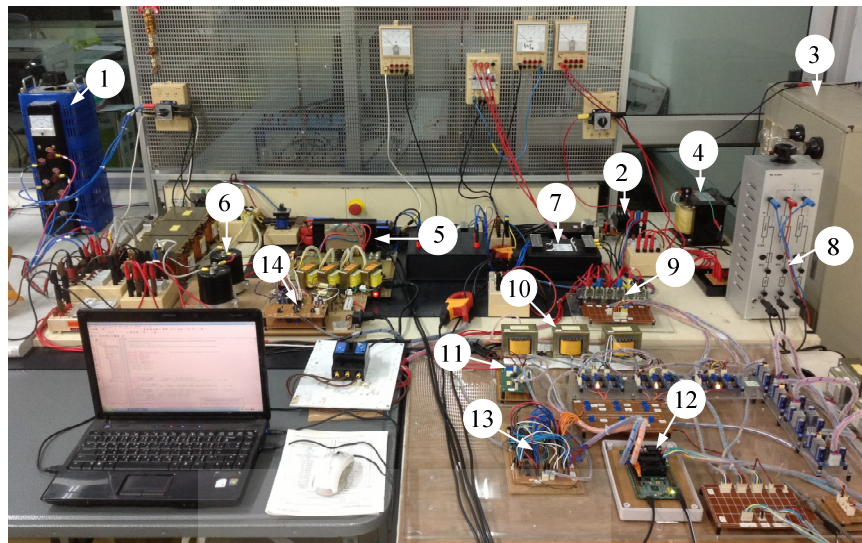


รูปที่ 10.1 ระบบที่พิจารณาสร้างเป็นระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิก  
ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 10.2 การคำนวณระบบควบคุมภายในบอร์ด eZdsp™ F28335





- ① Three-phase transformer ② Three-phase rectifier ③ Resistor  $R_L$  ④ Inductor  $L_L$   
 ⑤ SAPF ⑥ Capacitor  $C_{dc}$  ⑦ Inductor  $L_f$  ⑧ RC output ripple filters ⑨ Current sensors  
 ⑩ Voltage sensors ⑪ DC Voltage sensor ⑫ eZdsp™F28335 ⑬ DAC ⑭ PWM

รูปที่ 10.3 ระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

### 10.2.1 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้สร้างระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

อุปกรณ์ที่ 1 หม้อแปลงสามเฟส (Three-phase transformer) แบบปรับค่าได้ รุ่น IBC-VR3000-3 ของบริษัทผู้ผลิต Takamura ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต 415 V และด้านเอาต์พุตสามารถปรับใช้งานได้ในช่วง 0 ถึง 450 V โดยหม้อแปลงดังกล่าว จะถูกใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสสำหรับระบบที่พิจารณาที่มีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายต่อเฟสเท่ากับ  $100 \text{ V}_{\text{rms}}$  ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz สำหรับรูปร่างของหม้อแปลงดังกล่าวสามารถดูได้จากรูปที่ 10.4 ดังนี้



รูปที่ 10.4 หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้ รุ่น IBC-VR3000-3

อุปกรณ์ที่ 2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ไดโอด (Three-phase rectifier) รุ่น VS-36MT160 ของบริษัทผู้ผลิต Vishay โดยมีพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 35 A และพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1600 V ทำหน้าที่เป็นโหลดวงจรเรียงกระแสของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยรูปร่างของอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10.5 ดังนี้



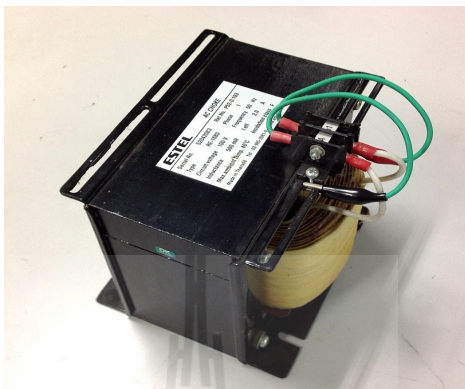
รูปที่ 10.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ไดโอด รุ่น VS-26MT160

อุปกรณ์ที่ 3 ชุดโหลดหลอดไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีรูปร่างแสดงดังรูปที่ 10.6 ทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นตัวต้านทาน  $R_L$  สำหรับนำไปใช้เป็นโหลดค่าความต้านทานเท่ากับ 120  $\Omega$  80  $\Omega$  (120  $\Omega$ //240  $\Omega$ ) และ 60  $\Omega$  (120  $\Omega$ //240  $\Omega$ //240  $\Omega$ ) ที่ปรากฏในรูปที่ 10.1 ของวงจรเรียงกระแสสามเฟส



รูปที่ 10.6 ชุดโหลดหลอดไฟฟ้ากระแสตรง

อุปกรณ์ที่ 4 ตัวเหนี่ยวนำ  $L_L$  ขนาดเท่ากับ 0.5 H พิกัดกระแสไฟฟ้า 10 A สำหรับนำไปใช้เป็นโหลดค่าความเหนี่ยวนำของวงจรเรียงกระแสสามเฟส ซึ่งแสดงรูปร่างของอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 10.7



รูปที่ 10.7 ตัวเหนี่ยวนำ  $L_L$  ขนาดเท่ากับ 0.5 H

อุปกรณ์ที่ 5 วงจรไอจีบีทีอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า รุ่น 6MBP50RA120-55 ของบริษัทผู้ผลิต Fuji ดังรูปที่ 10.8 มีพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 50 A และพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1200 V ทำหน้าที่เป็นวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน (SAPF) เพื่อใช้ฉีดกระแสชดเชยสำหรับกำจัดฮาร์มอนิกในระบบที่พิจารณา



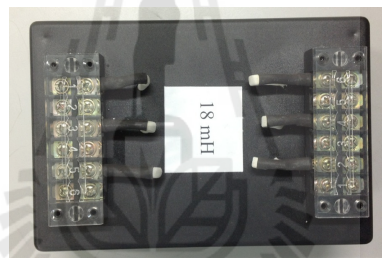
รูปที่ 10.8 วงจรไอจีบีทีอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า รุ่น 6MBP50RA120-55

อุปกรณ์ที่ 6 ตัวเก็บประจุ  $C_{dc}$  ดังรูปที่ 10.9 ขนาดความจุไฟฟ้าเท่ากับ 2300  $\mu\text{F}$  (ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 4600  $\mu\text{F}$  สองตัวต่อแบบอนุกรมกัน) พิกัดแรงดันไฟฟ้า 800 V ทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานให้กับวงจรรอกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 10.9 ตัวเก็บประจุ  $C_{dc}$  ขนาดเท่ากับ 2300  $\mu\text{F}$

อุปกรณ์ที่ 7 ตัวเหนี่ยวนำ  $L_f$  ขนาดเท่ากับ 18 mH พิกัดกระแสไฟฟ้า 10 A ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำเฟส  $ab$  และ  $c$  ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งสามารถแสดงรูปร่างอุปกรณ์ ดังรูปที่ 10.10



รูปที่ 10.10 ตัวเหนี่ยวนำ  $L_f$  ขนาดเท่ากับ 18 mH

อุปกรณ์ที่ 8 วงจรกรองความพลัวเอาต์พุตแบบความต้านทาน ( $R$ ) อนุกรมกับตัวเก็บประจุ ( $C_f$ ) (RC output ripple filter) ทำหน้าที่กำจัดสัญญาณที่ค่าความถี่การสวิตช์และสัญญาณรบกวนที่มีค่าความถี่สูง เพื่อให้การฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการออกแบบวงจรกรองความพลัวเอาต์พุตข้างต้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีการของ Kim and al et. (Kim H-S. and al et., 1993) ซึ่งสามารถออกแบบค่า  $R_f$  และค่า  $C_f$  ของวงจรได้จากสมการที่ (10.1) และ (10.2) ตามลำดับ ดังนี้

$$C_f \geq \frac{1}{L_f \omega_c^2} \quad (10.1)$$

โดยที่  $\omega_c$  คือ ค่าความถี่ตัดเชิงมุม เท่ากับ  $2\pi f_c$  rad/s

$f_c$  คือ ค่าความถี่ตัด (Hz)

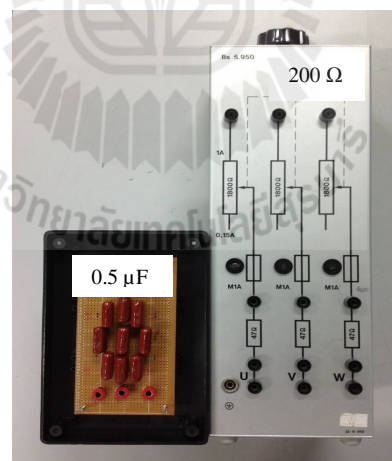
$$R_f \leq 2\zeta \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (10.2)$$

จากสมการที่ (10.1) และ (10.2) กำหนดการออกแบบให้ค่า  $f_c$  เท่ากับ 2500 Hz (ค่า  $\omega_c$  เท่ากับ  $5000\pi$  rad/s) ค่า  $\zeta$  เท่ากับ 0.707 และค่า  $L_f$  เท่ากับ 18 mH ดังนั้น จะได้ผลการคำนวณการออกแบบแสดงดังต่อไปนี้ โดยผู้วิจัยเลือกใช้ค่า  $C_f$  เท่ากับ  $0.5 \mu\text{F}$  และค่า  $R_f$  เท่ากับ  $200 \Omega$

$$C_f \geq \frac{1}{0.018(5000\pi)^2} = 0.23 \mu\text{F} \quad (\text{ผู้วิจัยเลือกใช้ค่า } C_f = 0.5 \mu\text{F})$$

$$R_f \leq 2(0.707) \sqrt{\frac{0.018}{0.5 \times 10^{-6}}} = 268 \Omega \quad (\text{ผู้วิจัยเลือกใช้ค่า } R_f = 200 \Omega)$$

สำหรับรูปร่างของอุปกรณ์ตัวต้านทาน  $R_f$  เท่ากับ  $200 \Omega$  และตัวเก็บประจุ  $C_f$  เท่ากับ  $0.5 \mu\text{F}$  ที่ใช้ในการสร้างระบบฮาร์ดแวร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10.11 ดังนี้



รูปที่ 10.11 ค่าความต้านทานเท่ากับ  $200 \Omega$  และค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ  $0.5 \mu\text{F}$

อุปกรณ์ที่ 9 ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า (Current sensors) ทำหน้าที่ตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหล ( $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ ) สำหรับใช้เป็นอินพุตให้การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF และทำหน้าที่ตรวจวัดค่ากระแสชดเชย ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ ) สำหรับป้อนกลับของระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่คำนวณบนบอร์ด eZdsp™ F28335 โดยงานวิจัย



วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า รุ่น HC-PSG30V4B15 ของบริษัทผู้ผลิต Koshin Electric Corporation ที่มีย่านการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 3 A<sub>rms</sub> จำนวน 6 ชุด เพื่อใช้ในการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า  $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$ ,  $i_{Lc}$ ,  $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$  และ  $i_{cc}$  สำหรับรูปร่างของอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถดูได้จากรูปที่ 10.12



รูปที่ 10.12 ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า รุ่น HC-PSG30V4B15

อุปกรณ์ที่ 10 ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟ้า (Voltage sensors) ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $v_{sa}$ ,  $v_{sb}$ ,  $v_{sc}$ ) สำหรับใช้เป็นอินพุตให้การคำนวณตรวจสอบฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ที่คำนวณบนบอร์ด eZdsp™ F28335 โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสจำนวน 3 ชุด ที่มีรูปร่างแสดงได้ดังรูปที่ 10.13 โดยหม้อแปลงดังกล่าวมีค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 250 V<sub>rms</sub> และพิกัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิเท่ากับ 5 V<sub>rms</sub>



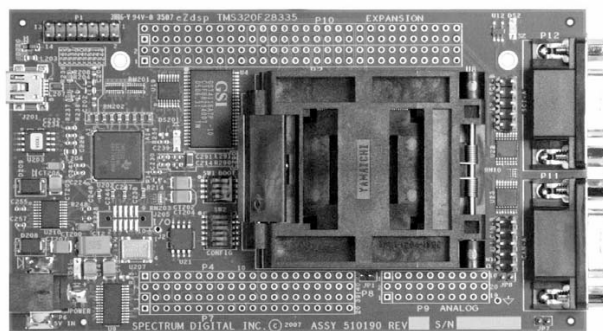
รูปที่ 10.13 ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ 11 ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟ้าดีซี (DC voltage sensors) ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ( $V_{dc}$ ) ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_{dc}$  สำหรับใช้เป็นอินพุตให้กับระบบควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงที่คำนวณบนบอร์ด eZdsp™ F28335 โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อุปกรณ์ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟ้าดีซี รุ่น LV25-P ของบริษัทผู้ผลิต LEM ดังรูปที่ 10.14 โดยอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถตรวจวัดแรงดันได้ในช่วง 10 ถึง 500 V



รูปที่ 10.14 ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

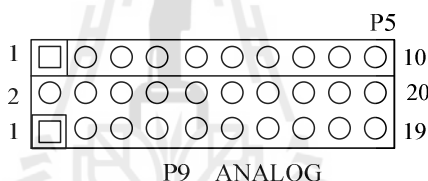
อุปกรณ์ที่ 12 บอร์ด eZdsp™F28335 ของบริษัทผู้ผลิต Spectrum Digital ที่มีโครงสร้างสถาปัตยกรรมของบอร์ดแสดงได้ดังรูปที่ 10.15 ทำหน้าที่คำนวณการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงร่วมกับการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุม 3 ชนิด คือ ตัวควบคุมแบบพีไอ ตัวควบคุมพีซีซี และตัวควบคุมพีซีซีแบบปรับตัว สำหรับบอร์ด eZdsp™F28335 มีความเร็วในการประมวลผลของซีพียู (TMS320C28335) เท่ากับ 150 MHz มีความละเอียดเท่ากับ 32 บิต และสามารถเชื่อมต่อสัญญาณแอนะล็อกได้โดยตรง (analog expansion) จำนวน 2 พอร์ต คือ พอร์ต P5 และ P9 (มีวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ภายในตัวบอร์ด) นอกจากนี้ บอร์ดดังกล่าวยังสามารถเชื่อมต่อใช้งานพอร์ตอินพุตและเอาต์พุต (I/O expansion) ได้จำนวน 5 พอร์ต คือ พอร์ต P2 P4 P7 P8 และ P10 โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้พอร์ตเชื่อมต่อสัญญาณแอนะล็อกในการรับค่าอินพุตกระแสไฟฟ้า ( $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}, i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ ) และค่าแรงดันไฟฟ้า ( $v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}, V_{dc}$ ) สำหรับการคำนวณตามระบบควบคุมของวงจรรองกำลังแอกทีฟในรูปที่ 10.2 และจะใช้พอร์ต P2 สำหรับการส่งข้อมูลดิจิทัลของค่าเอาต์พุตสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์  $T_a, T_b$  และ  $T_c$  ของวิธี SVPWM ไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) เพื่อส่งต่อไปยังวงจรสร้างพัลส์ (PWM) ควบคุมไอจีบีทีของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่เป็นวงจรแอนะล็อกต่อไป โดยรายละเอียดพอร์ตเชื่อมต่อสัญญาณแอนะล็อก (พอร์ต P5 และ P9) และพอร์ต P2 สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 10.15 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของบอร์ด eZdsp™F28335

### พอร์ตเชื่อมต่อสัญญาณแอนะล็อกภายในบอร์ด eZdsp™ F28335

บอร์ด eZdsp™ F28335 สามารถเชื่อมต่อสัญญาณอินพุตแอนะล็อกได้จำนวน 16 ช่องสัญญาณ ซึ่งแต่ละช่องสัญญาณมีความแยกชัด (resolution) ขนาด 12 บิต โดยจะกระจายอยู่ใน 2 พอร์ต คือ พอร์ต P5 และ P9 โดยการจัดเรียงตำแหน่งพิน (pin) ของพอร์ต P5 จำนวน 10 พิน และ พอร์ต P9 จำนวน 20 พิน สามารถดูได้จากรูปที่ 10.16 และรายละเอียดของแต่ละตำแหน่งพินได้แสดงไว้ดังตารางที่ 10.1 การคำนวณระบบควบคุมของวงจรรอกำลังแอกทีฟ ได้แก่ การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF การควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟ จะต้องใช้พอร์ตแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลทั้งหมด 10 ช่องสัญญาณ เพื่อรับสัญญาณอินพุตการคำนวณ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ ) ค่าแรงดันไฟฟ้าสามเฟส ( $v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$ ) ค่ากระแสชดเชย ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ ) และค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้งานพิน 2 4 6 8 10 และ 12 ของพอร์ต P9 (ADCINA0 ถึง ADCINA5) และเลือกใช้งานพิน 1 3 5 และ 7 ของพอร์ต P5 (ADCINB0 ถึง ADCINB3) ตามลำดับ



รูปที่ 10.16 ช่องสัญญาณอินพุตแอนะล็อกของบอร์ด eZdsp™ F28335

ตารางที่ 10.1 รายละเอียดช่องสัญญาณอินพุตแอนะล็อกในพอร์ต P5 และ P9

P5 Pin#	ADC signal	P9 Pin#	ADC signal	P9 Pin#	ADC signal
1	ADCINB0	1	GND	2	ADCINA0
2	ADCINB1	3	GND	4	ADCINA1
3	ADCINB2	5	GND	6	ADCINA2
4	ADCINB3	7	GND	8	ADCINA3
5	ADCINB4	9	GND	10	ADCINA4
6	ADCINB5	11	GND	12	ADCINA5
7	ADCINB6	13	GND	14	ADCINA6
8	ADCINB7	15	GND	16	ADCINA7
9	ADCREFM	17	GND	18	ADCLO*
10	ADCREFP	19	GND	20	No connect

\* Connect ADCLO to AGND or ADCLO of target system for proper ADC operation.



ตารางที่ 10.2 รายละเอียดแต่ละพินของพอร์ต P2 ในบอร์ด eZdsp™ F28335

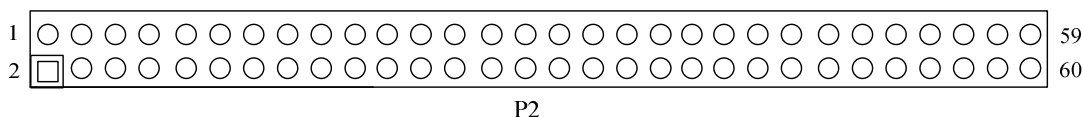
Pin#	Signal	Pin#	Signal
1	+3.3V/+5V/NC *	2	+3.3/+5V/NC *
3	GPIO79_XD0	4	GPIO78_XD1
5	GPIO77_XD2	6	GPIO76_XD3
7	GPIO75_XD4	8	GPIO74_XD5
9	GPIO73_XD6	10	GPIO72_XD7
11	GPIO71_XD8	12	GPIO70_XD9
13	GPIO69_XD10	14	GPIO68_XD11
15	GPIO67_XD12	16	GPIO66_XD13
17	GPIO65_XD14	18	GPIO64_XD15
19	GPIO40_XA0_XWE1n	20	GPIO41_XA1
21	GPIO42_XA2	22	GPIO43_XA3
23	GPIO44_XA4	24	GPIO45_XA5
25	GPIO46_XA6	26	GPIO47_XA7
27	GPIO80_XA8	28	GPIO81_XA9
29	GPIO82_XA10	30	GPIO83_XA11
31	GPIO84_XA12	32	GPIO85_XA13
33	GPIO86_XA14	34	GPIO87_XA15
35	GND	36	GND
37	GPIO36_SCIRXDA-XZCS0n	38	GPIO37_ECAP2_XZCS7n
39	GPIO34_ECAP1_XREADY	40	B_GPIO28_SCIRXDA_XZCS6n
41	GPIO35_SCIRXDA_XRNW	42	10K Pull-up
43	GPIO38_WE0n	44	XRDn
45	+3.3V	46	No connect
47	DSP_RS <sub>n</sub>	48	XCLKOUT
49	GND	50	GND
51	GND	52	GND
53	GPIO39_XA16	54	GPIO31_CANTXA_XA17
55	GPIO30_CANRXA_XA18	56	GPIO14_TZ3 <sub>n</sub> _XHOLD <sub>n</sub> _SCITXB_MCLKX B
57	GPIO15_XHOLD <sub>n</sub> _SCIRXDB_MFSXB	58	GPIO29_SCITXDA_XA19
59	No connect	60	No connect

\* Default is No Connect (NC). User can jumper to +3.3V or +5V on backside of eZdsp with JR5.

หมายเหตุ: พินที่สามารถกำหนดใช้เป็นช่องอินพุตหรือเอาต์พุตได้คือพินที่ขึ้นต้นด้วย GPIO เท่านั้น

### พอร์ตเชื่อมต่ออินพุตและเอาต์พุต P2

พอร์ต P2 ของบอร์ด eZdsp™ F28335 มีจำนวนช่องอินพุตและเอาต์พุต (GPIO) ที่ใช้ได้ทั้งหมด 44 ช่อง ในจำนวนพินทั้งหมด 60 พิน ซึ่งการจัดเรียงตำแหน่งของแต่ละพินสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10.17 และรายละเอียดการเชื่อมต่อของแต่ละพินสามารถดูได้จากตารางที่ 10.2



รูปที่ 10.17 พอร์ต P2 ของบอร์ด eZdsp™ F28335

อุปกรณ์ที่ 13 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิทัลของค่าเอาต์พุตสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์  $T_a$ ,  $T_b$  และ  $T_c$  จากวิธี SVPWM ที่ได้จากการคำนวณด้วยบอร์ด eZdsp™ F28335 เป็นค่าเอาต์พุตสัญญาณแบบแอนะล็อก เพื่อส่งต่อไปยังวงจรสร้างพัลส์ (PWM) ควบคุมไอบีบีทีของวงจรรอกกำลังแอกทีฟต่อไป โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก เบอร์ DAC712P ของบริษัทผู้ผลิต Burr-Brown ซึ่งมีความแยกชัด 16 บิต จำนวน 3 ตัว โดยรูปร่างของไอซีดังกล่าว สามารถดูได้จากรูปที่ 10.18 ดังนี้

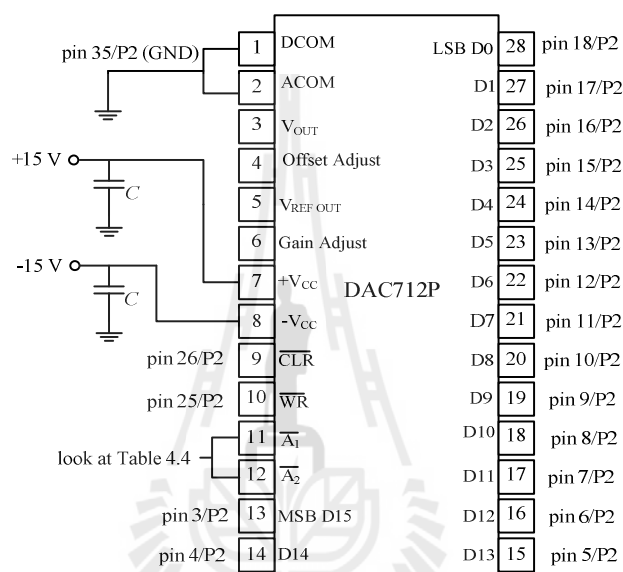


รูปที่ 10.18 ไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก เบอร์ DAC712P

### การเชื่อมต่อไอซี DAC712P กับพอร์ต P2 ของบอร์ด eZdsp™ F28335

การเชื่อมต่อไอซี DAC712P ทั้งสามตัวเข้ากับพอร์ต P2 ของบอร์ด eZdsp™ F28335 จะเหมือนกันดังแสดงไว้ในรูปที่ 10.19 ยกเว้นขาที่ 11 และ 12 ( $\bar{A}_0$  และ  $\bar{A}_1$ ) ซึ่งเป็นขาที่ใช้กำหนดกระบวนการทำงานเฉพาะไอซีแต่ละตัว โดยการเชื่อมต่อขาที่ 11 และ 12 ของไอซี DAC712P แต่ละตัวกับบอร์ดกับพอร์ต P2 สามารถดูได้จากตารางที่ 10.3 สำหรับขั้นตอนการสั่งการทำงานของไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกตัวที่ 1 ถึง 3 สามารถทำได้โดยการใช้คำสั่งดิจิทัลเวิร์ด 8 บิต (พิน 19 ถึงพิน 26 ของพอร์ต P2) ของบอร์ด eZdsp™ F28335 โดยมีลำดับขั้นตอนแสดงได้ดัง

ตารางที่ 10.4 ถึง 10.6 ตามลำดับ โดยขั้นตอนที่ 1 คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับไอซี DAC712P ขั้นตอนที่ 2 เป็นการโหลดข้อมูลขนาด 16 บิต ผ่านทางพิน 3 ถึงพิน 18 ของพอร์ต P2 ซึ่งไอซีตัวที่ 1 คือ ข้อมูลสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์  $T_a$  ไอซีตัวที่ 2 คือ ข้อมูลสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์  $T_b$  และไอซีตัวที่ 3 คือ ข้อมูลสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์  $T_c$  ขั้นตอนที่ 3 คือ การบ่งบอกถึงการสิ้นสุดการโหลดข้อมูล ขั้นตอนที่ 4 ถึง 6 คือ ขั้นตอนสำหรับการโหลดอินพุตแลตช์ (load input latch) และขั้นตอนที่ 7 ถึง 9 คือ การโหลดดีทิวเอแลตช์ (load D/A latch) ของไอซี DAC712P



รูปที่ 10.19 การเชื่อมต่อไอซี DAC712P กับพอร์ต P2 บอร์ด eZdsp™ F28335

ตารางที่ 10.3 การเชื่อมต่อขาที่ 11 และ 12 ของไอซี DAC712P ทั้งสามตัว

กับบอร์ด eZdsp™ F28335

ไอซี DAC712P		พิน/พอร์ต ของบอร์ด eZdsp™ F28335 ที่ใช้เชื่อมต่อ
ตัวที่ 1	$\overline{A}_0$	19/P2
	$\overline{A}_1$	20/P2
ตัวที่ 2	$\overline{A}_0$	21/P2
	$\overline{A}_1$	22/P2
ตัวที่ 3	$\overline{A}_0$	23/P2
	$\overline{A}_1$	24/P2

ตารางที่ 10.4 ขั้นตอนการสั่งการควบคุมสำหรับไอซี DAC712P ตัวที่ 1

ขั้นตอนการสั่งการควบคุมของไอซี DAC712P ตัวที่ 1	พิน 26	พิน 25	พิน 24	พิน 23	พิน 22	พิน 21	พิน 20	พิน 19
ขั้นที่ 1	1	1	1	1	1	1	1	1
ขั้นที่ 2	โหลดข้อมูลสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์ $T_a$ ผ่านพิน 3 ถึงพิน 18							
ขั้นที่ 3	1	1	1	1	1	1	1	1
ขั้นที่ 4	1	1	1	1	1	1	1	0
ขั้นที่ 5	1	0	1	1	1	1	1	0
ขั้นที่ 6	1	1	1	1	1	1	1	0
ขั้นที่ 7	1	1	1	1	1	1	0	1
ขั้นที่ 8	1	0	1	1	1	1	0	1
ขั้นที่ 9	1	1	1	1	1	1	0	1

ตารางที่ 10.5 ขั้นตอนการสั่งการควบคุมสำหรับไอซี DAC712P ตัวที่ 2

ขั้นตอนการสั่งการควบคุมของไอซี DAC712P ตัวที่ 2	พิน 26	พิน 25	พิน 24	พิน 23	พิน 22	พิน 21	พิน 20	พิน 19
ขั้นที่ 1	1	1	1	1	1	1	1	1
ขั้นที่ 2	โหลดข้อมูลสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์ $T_b$ ผ่านพิน 3 ถึงพิน 18							
ขั้นที่ 3	1	1	1	1	1	1	1	1
ขั้นที่ 4	1	1	1	1	1	0	1	1
ขั้นที่ 5	1	0	1	1	1	0	1	1
ขั้นที่ 6	1	1	1	1	1	0	1	1
ขั้นที่ 7	1	1	1	1	0	1	1	1
ขั้นที่ 8	1	0	1	1	0	1	1	1
ขั้นที่ 9	1	1	1	1	0	1	1	1

ตารางที่ 10.6 ขั้นตอนการสังเคราะห์การควบคุมสำหรับไอซี DAC712P ตัวที่ 3

ขั้นตอนการสังเคราะห์การควบคุมของไอซี DAC712P ตัวที่ 3	พิน 26	พิน 25	พิน 24	พิน 23	พิน 22	พิน 21	พิน 20	พิน 19
ขั้นที่ 1	1	1	1	1	1	1	1	1
ขั้นที่ 2	โหลดข้อมูลสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์ $T_c$ ผ่านพิน 3 ถึงพิน 18							
ขั้นที่ 3	1	1	1	1	1	1	1	1
ขั้นที่ 4	1	1	1	0	1	1	1	1
ขั้นที่ 5	1	0	1	0	1	1	1	1
ขั้นที่ 6	1	1	1	0	1	1	1	1
ขั้นที่ 7	1	1	0	1	1	1	1	1
ขั้นที่ 8	1	0	0	1	1	1	1	1
ขั้นที่ 9	1	1	0	1	1	1	1	1

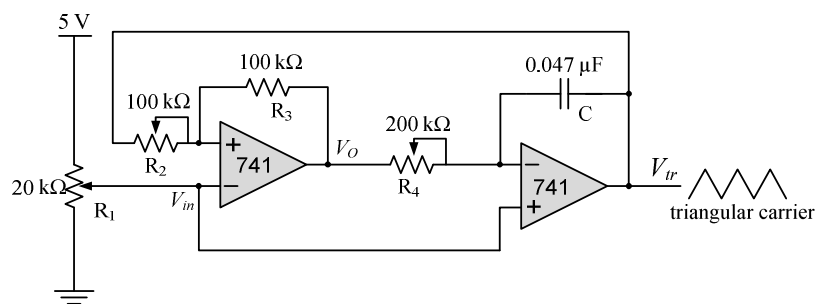
อุปกรณ์ที่ 14 วงจรสร้างพัลส์ (PWM) สำหรับใช้ควบคุมไอจีบีทีของวงจรรอกกำลังแอกทิฟ (โครงสร้างดังรูปที่ 4.17 ในบทที่ 4) ซึ่งประกอบด้วย 2 วงจร คือ วงจรสร้างสัญญาณพาห์รูปสามเหลี่ยม (triangular carrier) ที่สร้างด้วยไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741CN ของบริษัทผู้ผลิต STMicroelectronics แสดงไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 10.20 และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (comparator) ที่สร้างจากไอซีเบอร์ LM311N ของบริษัทผู้ผลิตเดียวกัน สามารถแสดงไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 10.21 โดยรูปร่างจริงของไอซีทั้งสองตัวสามารถดูได้จากรูปที่ 10.22

หมายเหตุ : วงจรสร้างสัญญาณพาห์รูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 10.20 สามารถปรับค่าขนาดและความถี่ของรูปสัญญาณสามเหลี่ยมได้จากการปรับค่าตัวต้านทาน  $R_2$  และ  $R_4$  ตามลำดับ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (10.3) และ (10.4) ดังนี้

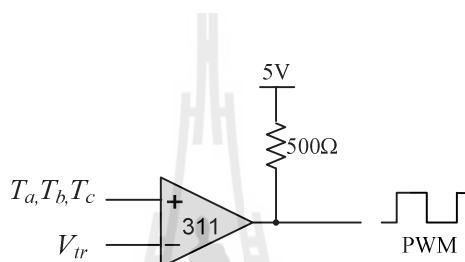
$$V_{tr} = -\frac{1}{R_4 C} \int (V_o - V_{in}) dt + V_{in} \quad (10.3)$$

$$\text{โดยที่ } V_o = R_3 \left[ \frac{V_{in} - V_{tr}}{R_2} \right] + V_{in}$$

$$f_{tr} = \frac{1}{2\pi R_4 C} \quad (10.4)$$



รูปที่ 10.20 โค้ดแกรมวงจรสร้างสัญญาณพาห้รูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 10.21 โค้ดแกรมวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

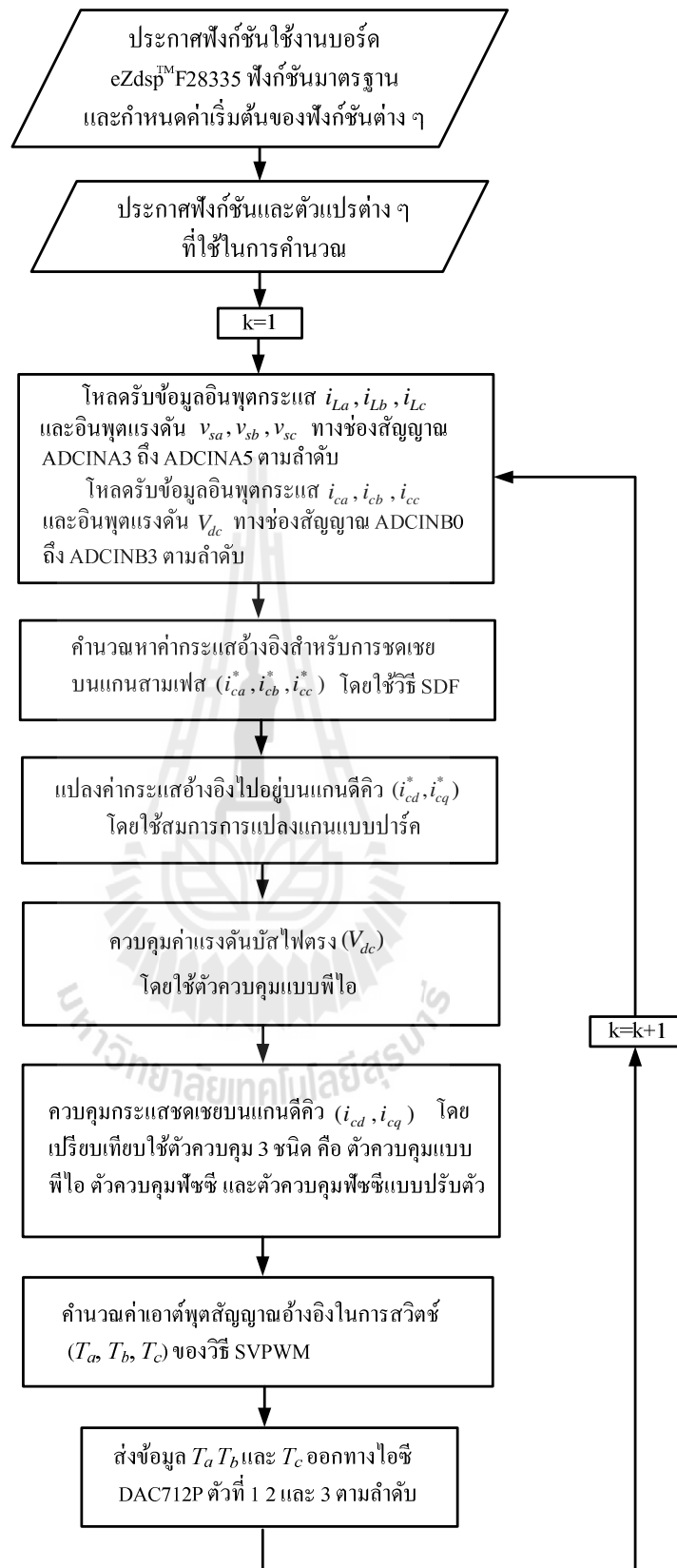


รูปที่ 10.22 ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741CN และไอซีวงจรเปรียบเทียบเบอร์ LM311N

จากการอธิบายอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบกำลังการควบคุมด้วย วงจรกรองกำลังแอกทีฟข้างต้น ลำดับต่อไป คือ การอธิบายการ โปรแกรมคำนวณระบบควบคุม วงจรกรองกำลังแอกทีฟตามรูปที่ 10.2 ภายในบอร์ด eZdsp™ F28335 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 10.2.2 การโปรแกรมคำนวณระบบควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

การคำนวณระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งประกอบด้วย การ คำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF การควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง และการควบคุมกระแส ชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในรูปที่ 10.2 จะถูกโปรแกรมลงบนบอร์ด eZdsp™ F28335 โดยใช้ภาษาซี ซึ่งสามารถแสดงแผนภูมิการ โปรแกรมได้ดังรูปที่ 10.23 จากรูปดังกล่าว การ โปรแกรม ระบบควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟในแต่ส่วน สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 10.23 แผนภูมิการโปรแกรมระบบควบคุมของวงจรองกำลังแอกทีฟ

ส่วนที่ 1 คือ การประกาศเรียกฟังก์ชันใช้งานบอร์ด eZdsp™F28335 ฟังก์ชันมาตรฐานของการโปรแกรมด้วยภาษาซี และรวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น ฟังก์ชัน ADC เป็นต้น

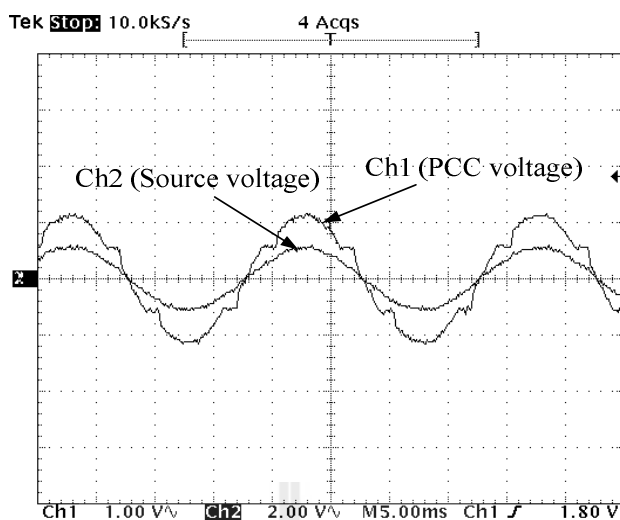
ส่วนที่ 2 คือ การกำหนดฟังก์ชันและตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณตามระบบควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟ

ส่วนที่ 3 คือ การโหลดรับข้อมูลอินพุตที่ใช้ในการคำนวณตามระบบควบคุมของวงจรรองกำลังแอกทีฟในรูปที่ 10.2 ได้แก่ ค่ากระแส  $i_{La}$   $i_{Lb}$  และ  $i_{Lc}$  ผ่านทางช่องสัญญาณแอนะล็อก ADCINA0 ถึง ADCINA2 ตามลำดับ ค่าแรงดัน  $v_{sa}$   $v_{sb}$  และ  $v_{sc}$  ผ่านทางช่องสัญญาณ ADCINA3 ถึง ADCINA5 ตามลำดับ ค่ากระแส  $i_{ca}$   $i_{cb}$  และ  $i_{cc}$  ผ่านช่องสัญญาณ ADCINB0 ถึง ADCINB3 ตามลำดับ และค่าแรงดัน  $V_{dc}$  ผ่านช่องสัญญาณ ADCINB3

ส่วนที่ 4 คือ การคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยสามเฟส ( $i_{ca}^*$ ,  $i_{cb}^*$ ,  $i_{cc}^*$ ) ให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟ โดยใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ซึ่งขั้นตอนการตรวจจับสามารถดูได้จากหัวข้อที่ 3.3 ในบทที่ 3

ส่วนที่ 5 คือ การแปลงค่ากระแสอ้างอิงไปอยู่บนแกนคิกิว ( $i_{cd}^*$ ,  $i_{cq}^*$ ) โดยใช้สมการการแปลงแกนแบบพาร์คดังสมการที่ (4.25) ในบทที่ 4 แต่ในกรณีการสร้างฮาร์ดแวร์ในบทนี้ จะกำหนดให้มุม  $\theta$  ที่ใช้สำหรับการหมุนแปลงแกน มีค่าเท่ากับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $v_{sa}$ ,  $v_{sb}$ ,  $v_{sc}$ ) แทนการกำหนดมุมที่แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อทำการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC พบว่า แรงดันไฟฟ้าง่ายปรากฏความเฟี้ยนฮาร์มอนิกที่แรงดันเนื่องจากผลของการต่อเข้ากับโหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟส ซึ่งแรงดันที่เฟี้ยนดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อการคำนวณแปลงแกนที่อาจผิดเพี้ยนได้ นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC พบว่า ไม่มีความต่างเฟส ซึ่งสามารถดูได้จากผลของกรณีเฟส  $a$  ดังรูปที่ 10.24 ด้วยเหตุดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้เลือกกำหนดให้มุม  $\theta$  สำหรับการหมุนแปลงแกนมีค่าเท่ากับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย โดยการคำนวณค่ามุม  $\theta$  ดังกล่าว ในทางปฏิบัติจะใช้เทคนิคเฟสล็อกลูป (Phase lock Loop: PLL) ซึ่งจะมีความรวดเร็วในการคำนวณมากกว่าการคำนวณโดยใช้ฟังก์ชัน arctangent โดยตรง สำหรับรายละเอียดการคำนวณมุม  $\theta$  ด้วยเทคนิค PLLสามารถอธิบายได้ดังนี้



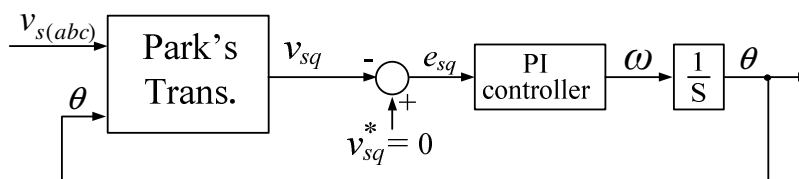


รูปที่ 10.24 ผลการเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายและแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC

#### การคำนวณ $\theta$ ด้วยเทคนิคเฟสล็อกกลูป

การคำนวณหามุม  $\theta$  ของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายโดยใช้เทคนิคเฟสล็อกกลูป หรือ PLL สามารถแสดงโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการคำนวณได้ดังรูปที่ 10.25 จากรูปดังกล่าว อินพุตที่ใช้ในการคำนวณ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟส ( $v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$ ) และค่าเอาต์พุต คือ ค่ามุม  $\theta$  ของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย โดยกระบวนการคำนวณค่าเอาต์พุตดังกล่าว เริ่มต้นจากการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟสไปอยู่บนแกนดีคิวโดยอาศัยสมการแปลงแกนแบบปาร์ก (หมุนแปลงแกนด้วยมุม  $\theta$  เอาต์พุตย้อนกลับ) หลังจากนั้น คือ การคำนวณหาค่าความผิดพลาด  $e_{sq}$  หรือผลต่างระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายบนแกนคิว ( $v_{sq}$ ) กับค่าแรงดันอ้างอิง ( $v_{sq}^*$ ) ซึ่งค่าแรงดันอ้างอิงดังกล่าวจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 (ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณแปลงแกนค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายจากแกนสามเฟสไปอยู่บนแกนดีคิวโดยกำหนดให้มุม  $\theta$  สำหรับการหมุนแปลงแกนมีค่าเท่ากับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย จะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายบนแกนดีมีค่าเฉพาะขนาด ( $|V|$ ) เท่ากับ  $\sqrt{3/2}V_m$  และบนแกนคิวมีค่าเท่ากับ 0 เสมอ) ลำดับถัดมา คือ การควบคุมค่าความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายโดยการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และลำดับสุดท้าย คือ การคำนวณมุม  $\theta$  ของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการที่ (10.5)

$$\theta = \int \omega dt \quad (10.5)$$



รูปที่ 10.25 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณ PLL

สำหรับการออกแบบค่า  $K_p$  และ  $K_I$  ของตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับการควบคุมค่าความถี่เชิงมุมของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการเหมาะสมที่สุดแบบสมมาตร (symmetrical optimum) ดังสมการที่ (10.6) และ (10.7) (Leonhard, 1976) ดังนี้

$$K_p = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\omega_n}{V_m} \quad (10.6)$$

$$K_I = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\omega_n^3 T}{V_m} \quad (10.7)$$

โดยที่  $\omega_n$  คือ ค่าความถี่ธรรมชาติกรณีการควบคุมค่าความถี่เชิงมุม

ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2\pi f_s$  rad/s

$f_s$  คือ ค่าความถี่มูลฐานของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (Hz)

จากสมการที่ (10.6) และ (10.7) เมื่อแทนค่า  $V_m = 100\sqrt{2}$  V ค่า  $\omega_n$  เท่ากับ  $100\pi$  rad/s (ระบบที่พิจารณา มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ  $100$  V<sub>rms</sub> และค่าความถี่มูลฐานเท่ากับ  $50$  Hz) และช่วงเวลาชักตัวอย่าง ( $T$ ) กรณีหนึ่งรอบการคำนวณของโปรแกรมซึ่งมีค่าเท่ากับ  $32$  ไมโครวินาที สุดท้ายจะได้ผลการคำนวณค่า  $K_p$  เท่ากับ  $1.81$  และค่า  $K_I$  เท่ากับ  $5.71$  ดังนี้

$$K_p = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{100\pi}{100\sqrt{2}} = 1.81$$

$$K_I = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{(100\pi)^3 (32 \times 10^{-6})}{100\sqrt{2}} = 5.73$$

ส่วนที่ 6 คือ การคำนวณเกี่ยวกับควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง ( $V_{dc}$ ) โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอตามที่ได้ออกแบบในหัวข้อที่ 4.4 บทที่ 4

ส่วนที่ 7 คือ การคำนวณที่เกี่ยวกับการควบคุมกระแสขดลวดบนแกนคิกิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) โดยในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุม 3 ชนิด คือ ตัวควบคุมแบบพีไอ ตัวควบคุมพีซี และตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัว

ส่วนที่ 8 คือ การคำนวณค่าเอาต์พุตสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์ ( $T_a, T_b, T_c$ ) ของวิธี SVPWM

ส่วนที่ 9 คือ การส่งข้อมูลค่าเอาต์พุตสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์  $T_a, T_b$  และ  $T_c$  ออกทางช่องสัญญาณไอซี DAC712P ตัวที่ 1 ถึง 3 ตามลำดับ

การอธิบายแผนภูมิการโปรแกรมข้างต้น คือ การคำนวณระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพียงรอบแรกเท่านั้น โดยการคำนวณในรอบต่อไป จะเริ่มต้นทำการรับข้อมูลอินพุตค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าค่าใหม่ (การโปรแกรมในส่วนที่ 3) และหลังจากนั้นจึงดำเนินการคำนวณซ้ำในแต่ละส่วนใหม่ตลอดการควบคุม ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรมทั้งหมดต่อหนึ่งรอบการคำนวณมีค่าเท่ากับ 32 ไมโครวินาที ดังแสดงไดอะแกรมเวลาที่ใช้ในการคำนวณโปรแกรมดังรูปที่ 10.26 ดังนี้

หมายเหตุ: โค้ดโปรแกรมภาษาซีการควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถดูได้จากภาคผนวก ง.

One cycle calculation

ADC	SDF	PLL	Park's trans.	Current control and DC voltage control	SVPWM	DAC
1.5 $\mu$ s	2.8 $\mu$ s	3.5 $\mu$ s	4.4 $\mu$ s	9 $\mu$ s	2.4 $\mu$ s	7.4 $\mu$ s

Total time: 32  $\mu$ s

รูปที่ 10.26 ไดอะแกรมเวลาที่ใช้ในการคำนวณโปรแกรมระบบควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

### 10.3 การทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

การทดสอบในทางปฏิบัติของระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่สร้างขึ้น จะกำหนดให้โหลดของระบบไฟฟ้า คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อเข้ากับโหลดตัวต้านทาน  $R_L$  อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ  $L_L$  ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า 3 ระดับ คือ ค่ายอดกระแสไฟฟ้าที่โหลดเท่ากับ 2 A (โหลด  $R_L=120\ \Omega$  และ  $L_L=0.5\ \text{H}$ ) 3 A (โหลด  $R_L=80\ \Omega$  และ  $L_L=0.5\ \text{H}$ ) และ 4 A (โหลด  $R_L=60\ \Omega$  และ  $L_L=0.5\ \text{H}$ ) การทดสอบระบบดังกล่าวจะทำให้การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ได้แก่ ตัวควบคุมแบบพีโอ (การออกแบบใช้วิธีการดั้งเดิมตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 4) ตัวควบคุมพีชชี (การออกแบบใช้วิธีการใหม่ซึ่งนำเสนอในบทที่ 8) และตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว (การออกแบบสามารถดูได้จากบทที่ 9) โดยการเปรียบเทียบดังกล่าวจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างการใช้ตัวควบคุมแบบพีโอกับการใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับกรณีโหลดที่มีขนาดกระแสไฟฟ้าต่างกัน 3 ระดับ และกรณีการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีชชีกับการใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวสำหรับกรณีที่โหลดของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า (กำหนดการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าที่โหลดเช่นเดียวกับการทดสอบในกรณีแรก) ซึ่งผลการทดสอบทั้งสองกรณีดังกล่าว สามารถดูได้จากหัวข้อต่อไป

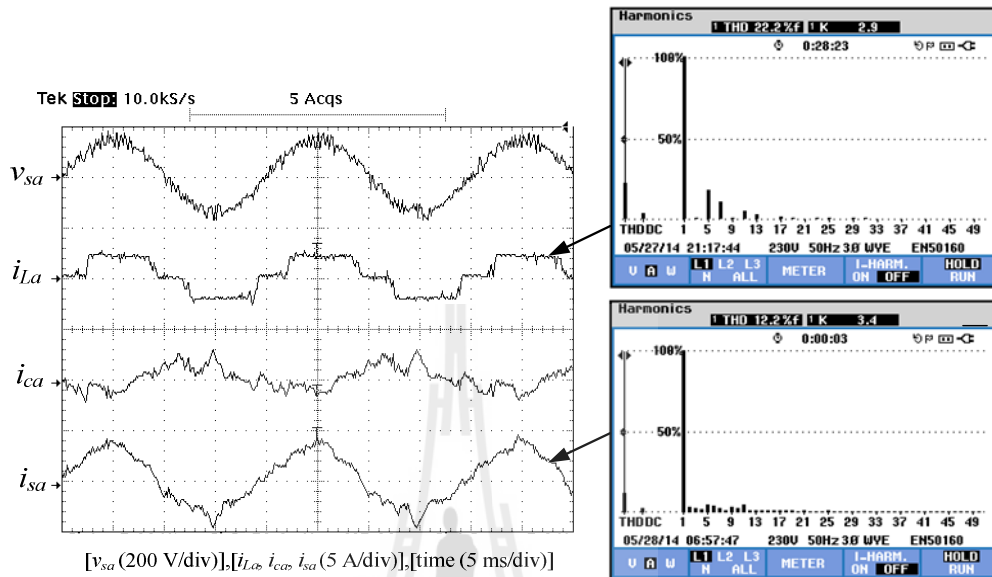
#### 10.3.1 กรณีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างการใช้ตัวควบคุมแบบพีโอกับการใช้ตัวควบคุมพีชชี

การทดสอบระบบฮาร์ดแวร์ดังรูปที่ 10.3 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟระหว่างการใช้ตัวควบคุมแบบพีโอกับการใช้ตัวควบคุมพีชชี จะทดสอบเปรียบเทียบในสามกรณีโหลดที่มีขนาดกระแสไฟฟ้าต่างกัน คือ กรณีที่โหลด  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $120\ \Omega$   $80\ \Omega$  และ  $60\ \Omega$  โดยตัวควบคุมแบบพีโอดังกล่าวได้ออกแบบโดยใช้วิธีการดั้งเดิมตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 4.6 บทที่ 4 คือ  $K_{Pi}$  เท่ากับ 399.7990 และ  $K_{Ii}$  เท่ากับ  $4.4413 \times 10^6$  (ซึ่งทุกกรณีโหลดจะได้ผลการออกแบบที่เหมือนกัน) ส่วนตัวควบคุมพีชชีจะใช้การออกแบบด้วยวิธีการใหม่ตามที่นำเสนอในบทที่ 8 หัวข้อที่ 8.3 8.2 และ 8.4 ตามลำดับกรณีโหลด ซึ่งการทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงผลแต่ละกรณีโหลดได้ดังต่อไปนี้

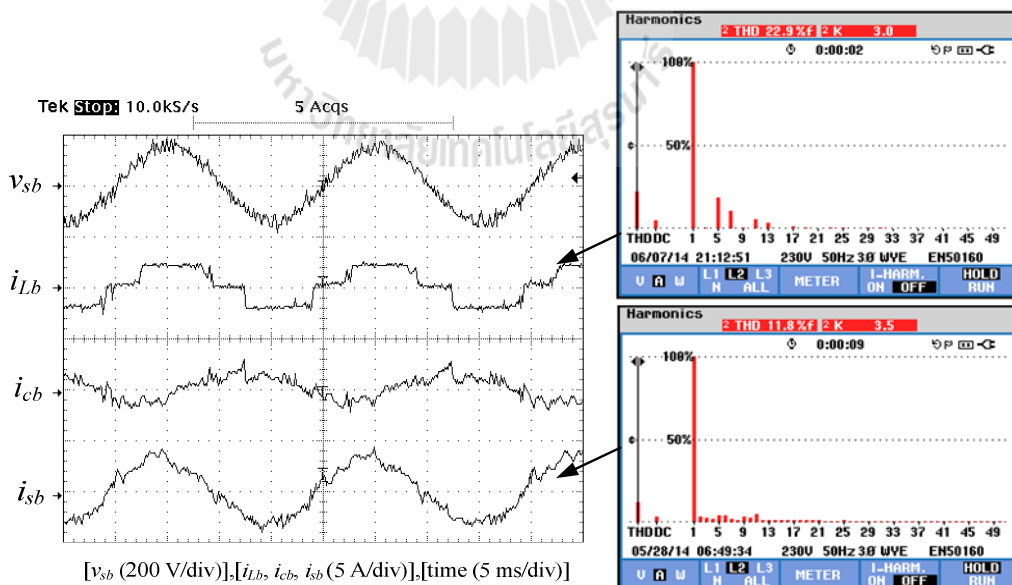
##### ผลการทดสอบกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $120\ \Omega$

การทดสอบระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $120\ \Omega$  โดยระบบที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบพีโอสามารถแสดงผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ได้ดังรูปที่ 10.27 ถึง 10.29 ตามลำดับ และ

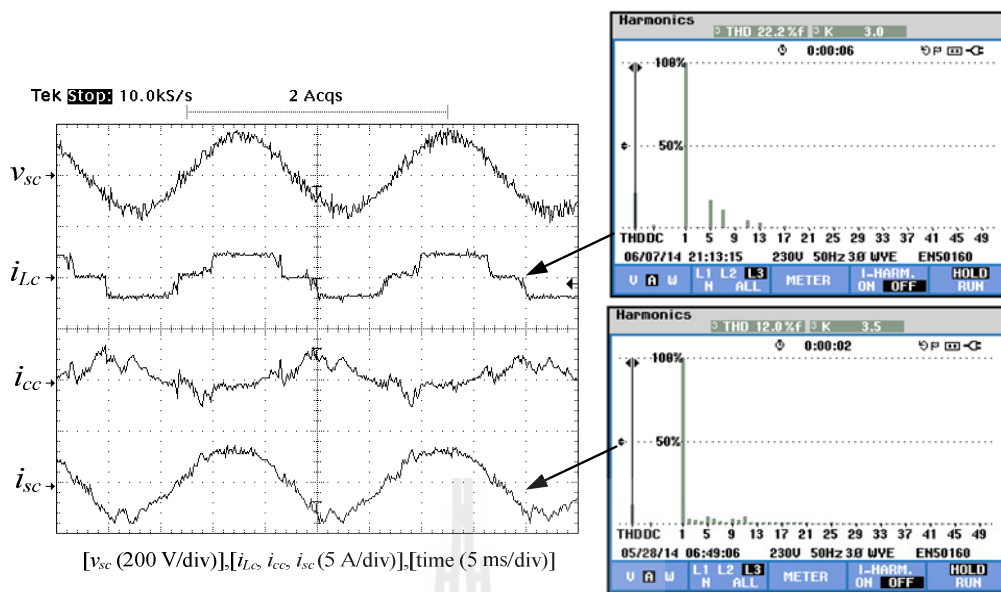
สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีสามารถแสดงผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ได้ดังรูปที่ 10.30 ถึง 10.32 ตามลำดับ



รูปที่ 10.27 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $a$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $120 \Omega$



รูปที่ 10.28 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $b$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $120 \Omega$



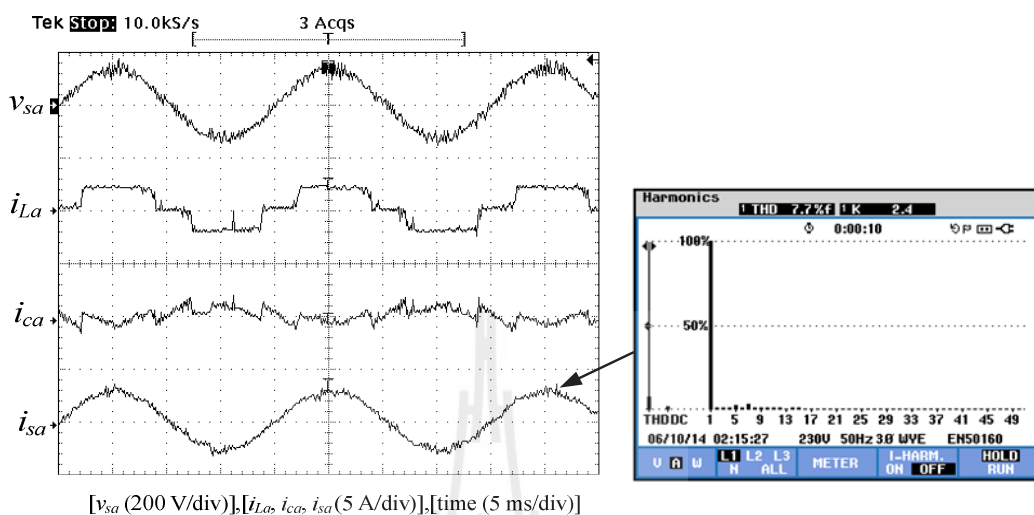
รูปที่ 10.29 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $c$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $120 \Omega$

จากรูปที่ 10.27 ถึง 10.29 สังเกตได้ว่า ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลัง แยกทีพีที่ควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิมให้ ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกของทั้งสามเฟสไม่ดี โดยสามารถดูได้จากผลการวัดกระแสชดเชย ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ ) ของวงจรกรองกำลังแยกทีพีที่ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) มีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชยซึ่งจะมีลักษณะรูป สัญญาณเช่นเดียวกับกระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ ) โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย หลังการชดเชยสำหรับเฟส  $a, b$  และ  $c$  มีค่าเท่ากับ 12.2% 11.8% และ 12.0% ตามลำดับ ส่วนค่า %THD ของกระแสดังกล่าวก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 22.2% 22.9% และ 22.2% ตามลำดับ จากผล ดังกล่าวจะพบว่า ค่า %THD หลังการชดเชยมีค่าลดลงเพียงประมาณ 3% เท่านั้น ซึ่งหมายความว่า ตัวควบคุมแบบพีไอมีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแยกทีพีที่ไม่ดีพอ

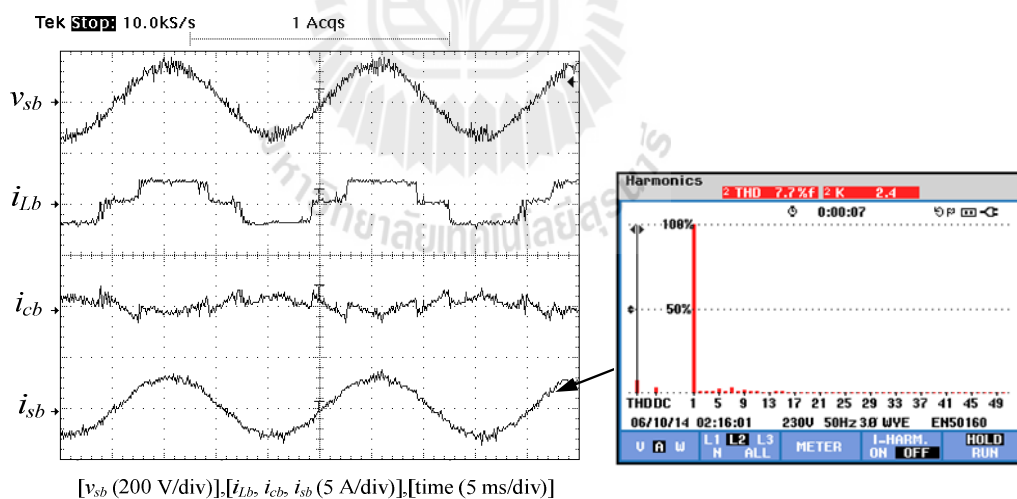
หมายเหตุ: การตรวจวัดค่า %THD สำหรับในงานทดสอบทางปฏิบัติได้ใช้เครื่องมือวัด Fluke รุ่น 434 ซึ่งจะแสดงผลรูปกราฟสเปกตรัมและค่า %THD ดังที่แสดงไว้ด้านข้างของผลการทดสอบ

จากรูปที่ 10.30 ถึง 10.32 สังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแยกทีพีที่ควบคุมกระแส ชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีตามที่ออกแบบด้วยวิธีการใหม่สามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัด ฮาร์มอนิกที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอ โดยสามารถดูได้จากผลของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลัง การชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) ที่มีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้นจากก่อนการชดเชย และมากกว่า

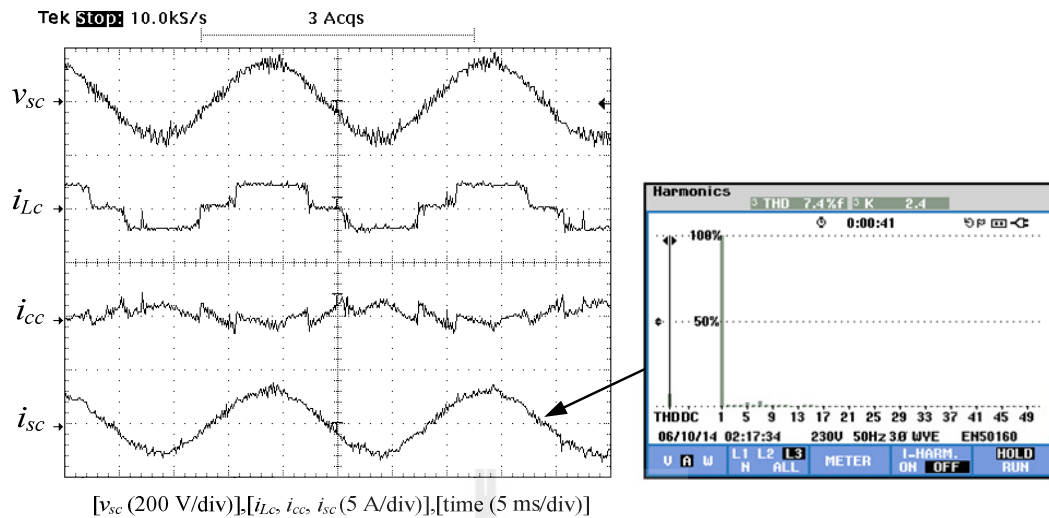
กรณีการควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยสามารถวัดค่า %THD หลังการชดเชยของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ได้เท่ากับ 7.7% 7.7% และ 7.4% ตามลำดับ



รูปที่ 10.30 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $a$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมพีซีกรณี โหลด  $R_L$  เท่ากับ 120  $\Omega$

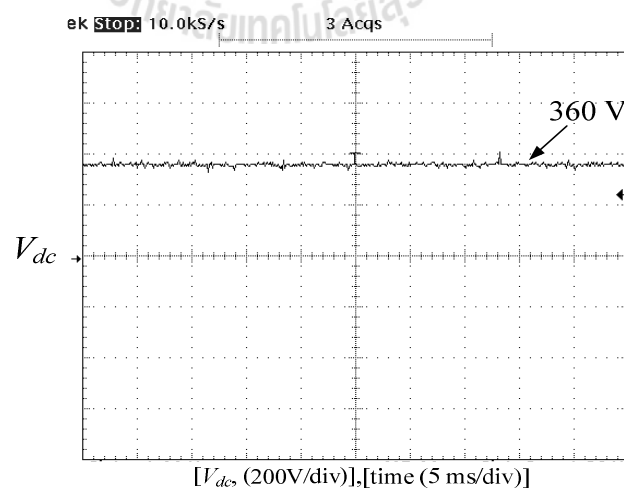


รูปที่ 10.31 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $b$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมพีซีกรณี โหลด  $R_L$  เท่ากับ 120  $\Omega$



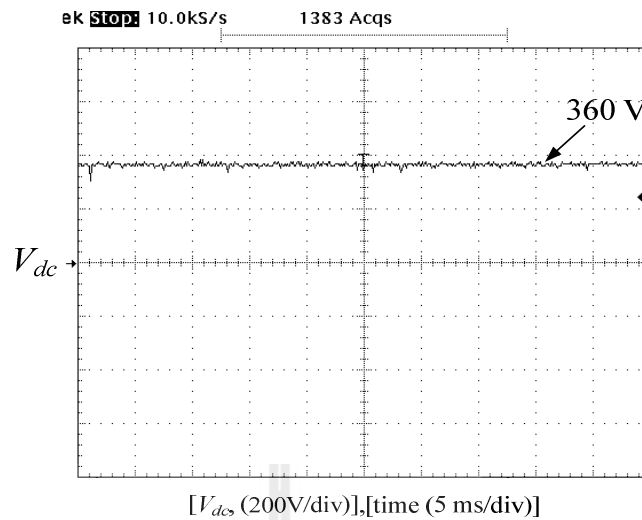
รูปที่ 10.32 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $c$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $120 \Omega$

สำหรับผลการทดสอบค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10.33 และรูปที่ 10.34 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 4 ( $K_{pv} = 0.2085$ ,  $K_{iv} = 4.6336$ ) สามารถควบคุมให้ค่าแรงดันบัสไฟตรงที่วัดตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_{dc}$  มีค่าเท่ากับ  $360 \text{ V}$  ตามค่าแรงดันอ้างอิง ( $V_{dc}^*$ ) ในกรณีโหลดทดสอบนี้



รูปที่ 10.33 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $120 \Omega$



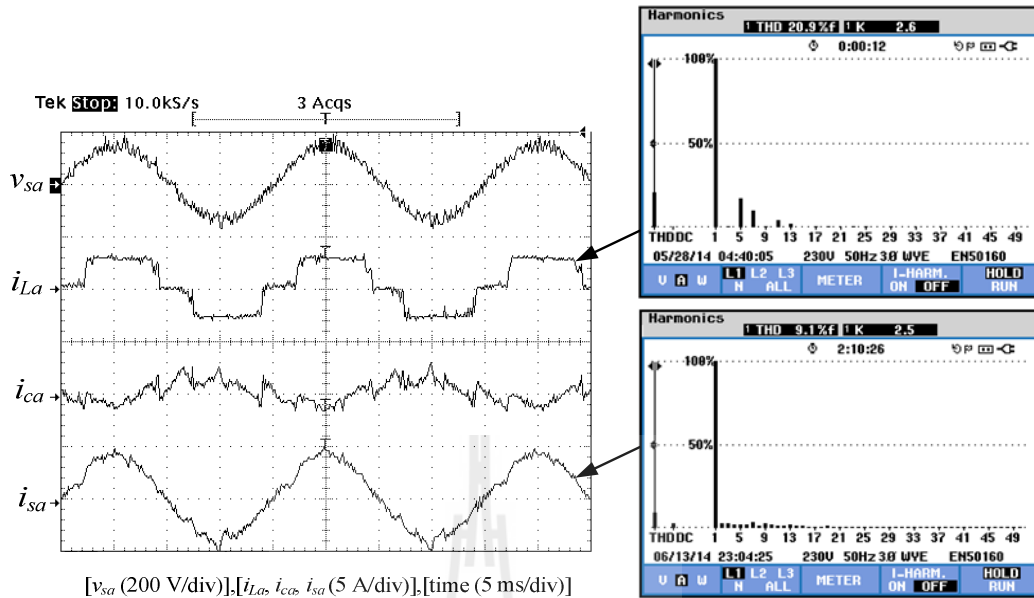


รูปที่ 10.34 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมพีซีกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $120 \Omega$

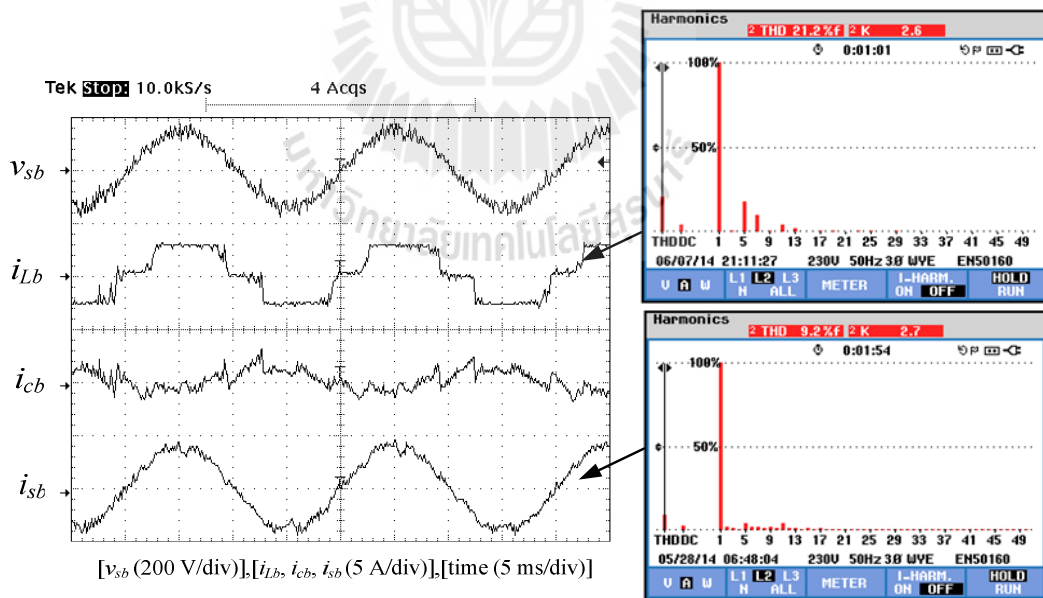
#### ผลการทดสอบกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $80 \Omega$

การทดสอบระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟในกรณีที่กำหนดให้โหลด  $R_L$  เท่ากับ  $80 \Omega$  สามารถแสดงผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  สำหรับระบบที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบพีไอได้ดังรูปที่ 10.35 ถึง 10.37 ตามลำดับ ส่วนผลการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งสามเฟสสำหรับระบบที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซี สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10.38 ถึง 10.40 ตามลำดับเฟส

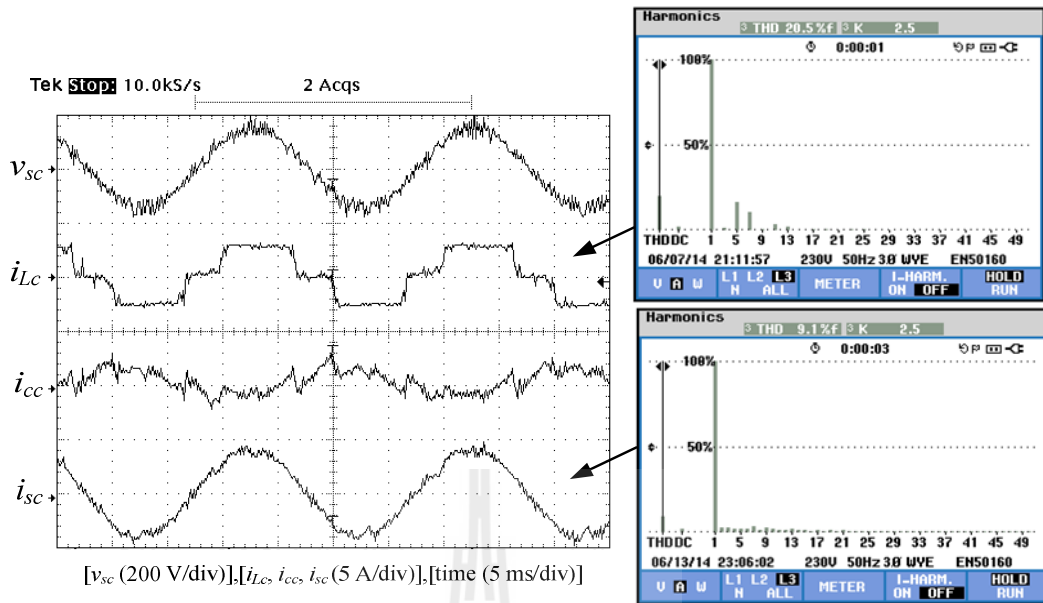
จากรูปที่ 10.35 ถึง 10.37 สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมกระแสชดเชย ( $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$ ,  $i_{cc}$ ) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้ และส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชย ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ) มีลักษณะรูปสัญญาณเป็นไซน์เพิ่มขึ้นจากการชดเชย อย่างไรก็ตาม การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกน้อยกว่าการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีซี ซึ่งสามารถดูได้จากผลการทดสอบดังรูปที่ 10.38 ถึง 10.40 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีลักษณะรูปสัญญาณเป็นไซน์มากกว่ากรณีการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ สำหรับค่า  $\%THD$  ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยสำหรับระบบที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบพีไอมีค่าเท่ากับ 9.1% 9.2% และ 9.1% ตามลำดับเฟส ในขณะที่การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีให้ค่า  $\%THD$  น้อยกว่า ที่ค่าเท่ากับ 7.1% 7.0% และ 7.0% ตามลำดับเฟส โดยก่อนการชดเชยวัดค่า  $\%THD$  ของกระแสดังกล่าวในกรณีโหลดนี้ มีค่าเท่ากับ 20.9% 21.2% และ 20.5%



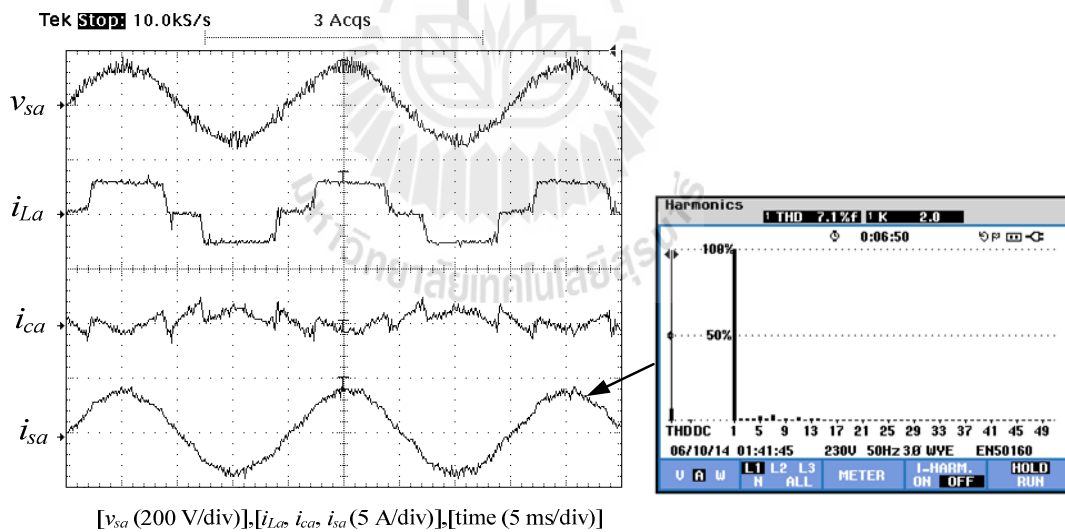
รูปที่ 10.35 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $a$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณี โหลด  $R_L$  เท่ากับ 80  $\Omega$



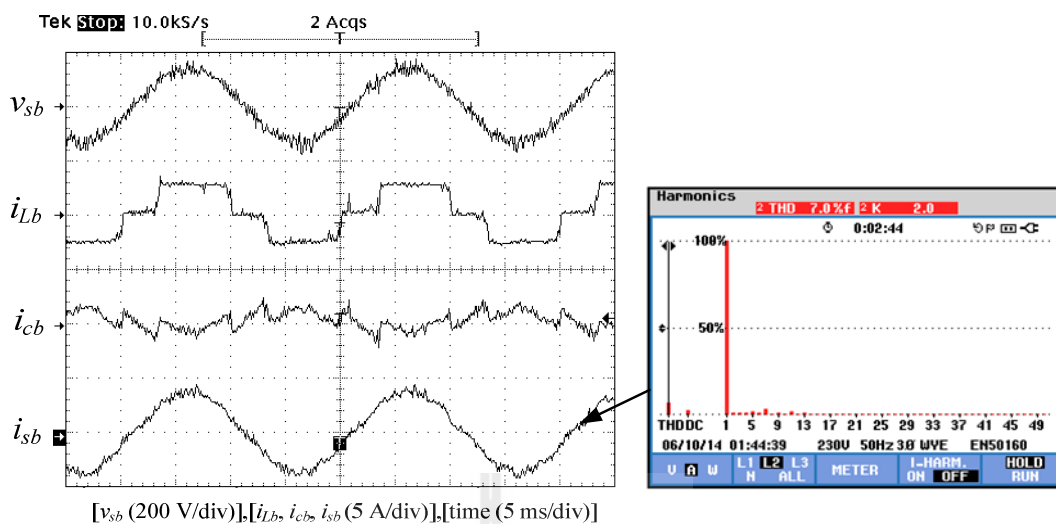
รูปที่ 10.36 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $b$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณี โหลด  $R_L$  เท่ากับ 80  $\Omega$



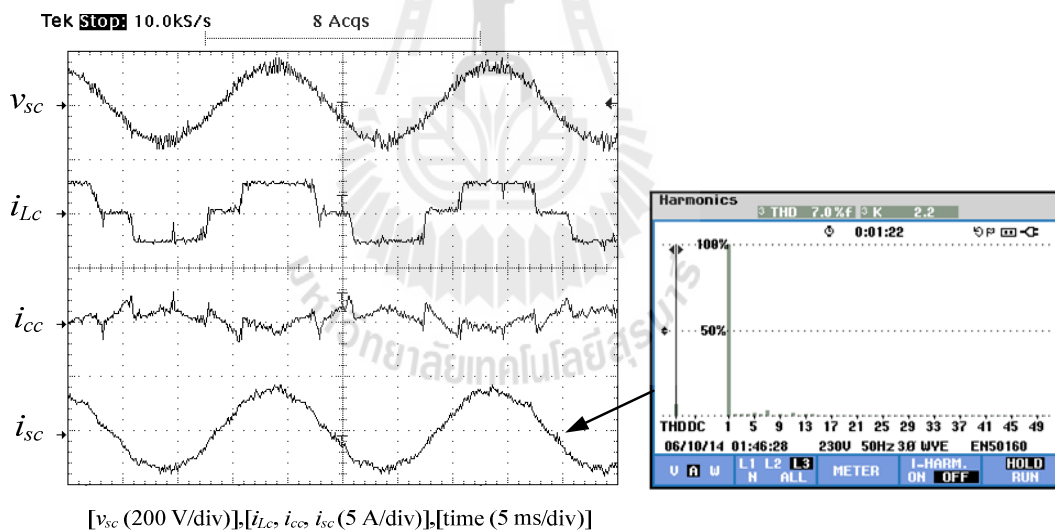
รูปที่ 10.37 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส c สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
 ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ 80  $\Omega$



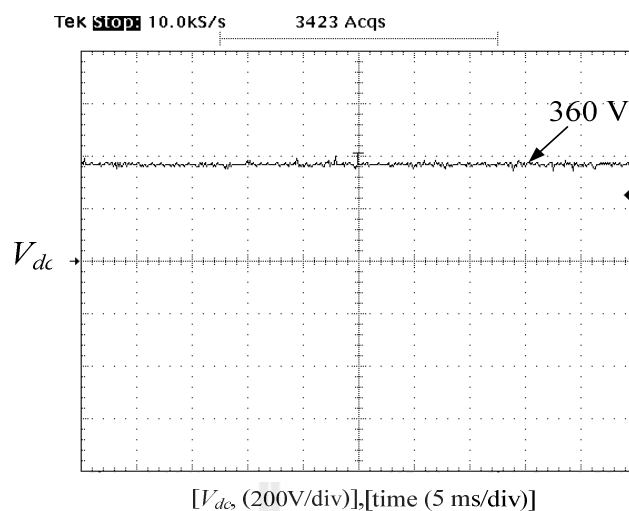
รูปที่ 10.38 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส a สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
 ที่ใช้ตัวควบคุมพีซีกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ 80  $\Omega$



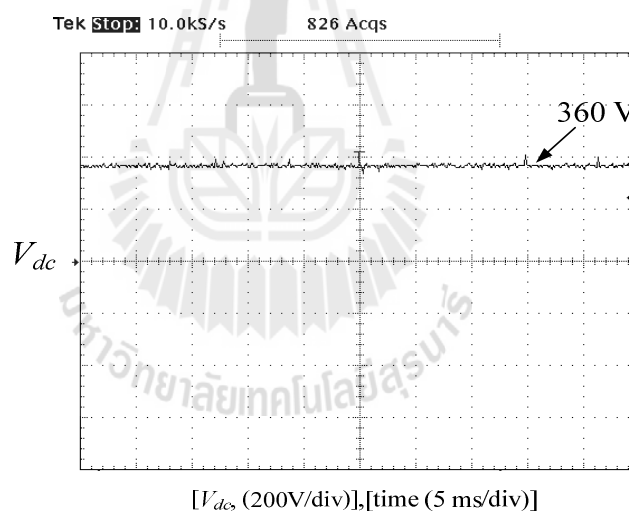
รูปที่ 10.39 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกของเฟส  $b$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
 ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $80 \Omega$



รูปที่ 10.40 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกของเฟส  $c$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
 ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $80 \Omega$



รูปที่ 10.41 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $80 \Omega$



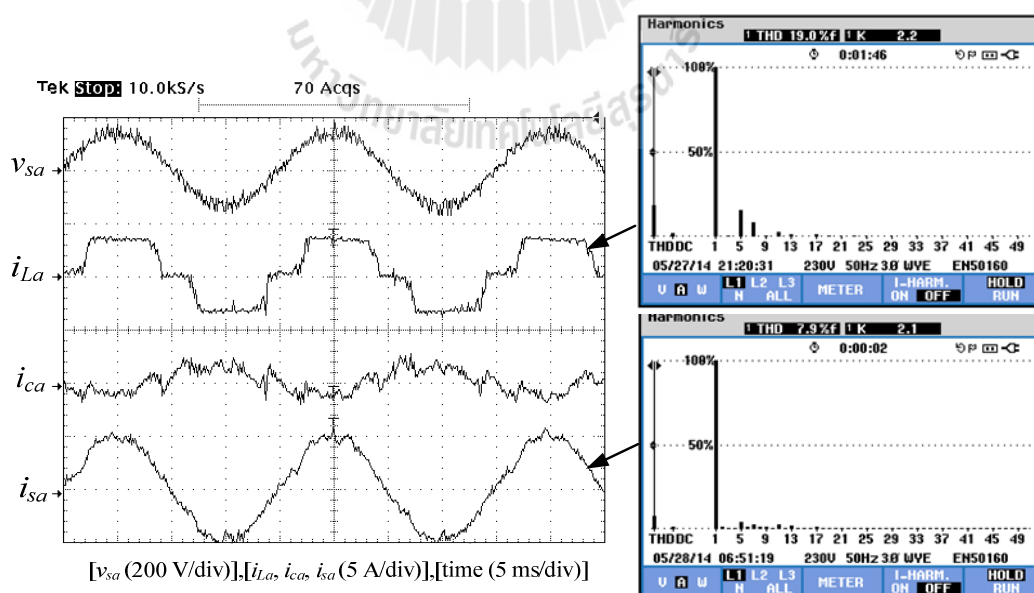
รูปที่ 10.42 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมพีซีกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $80 \Omega$

นอกจากนี้ สำหรับผลการทดสอบค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ของวงจรรองกำลัง แอ็กทีฟ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10.41 (สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ) และรูปที่ 10.42 (การควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีซี) จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมแบบพีไอยังคงมีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าตามแรงดันอ้างอิง ( $V_{dc}^*$ ) ได้เท่ากับ 360 V เช่นกันสำหรับในกรณีนี้

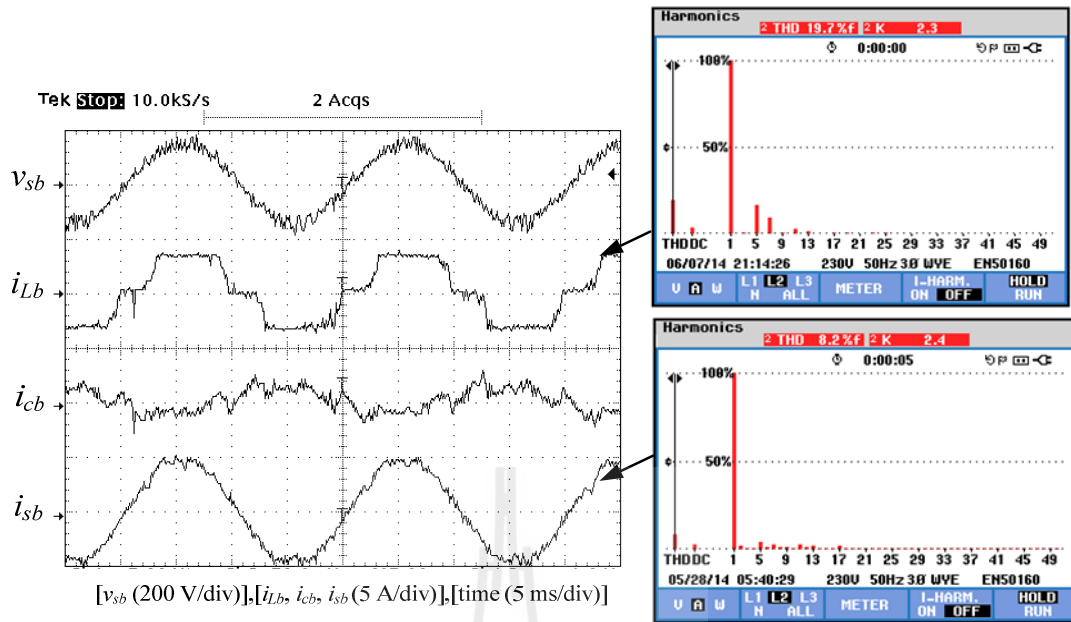
### ผลการทดสอบกรณีโหลด $R_L$ เท่ากับ $60 \Omega$

ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบฮาร์ดแวร์กรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $60 \Omega$  โดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ และที่ใช้ตัวควบคุมพีซี สามารถแสดงผลการทดสอบของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ได้ดังรูปที่ 10.43 ถึง 10.45 และรูปที่ 10.46 ถึง 10.48 ตามลำดับ ดังนี้

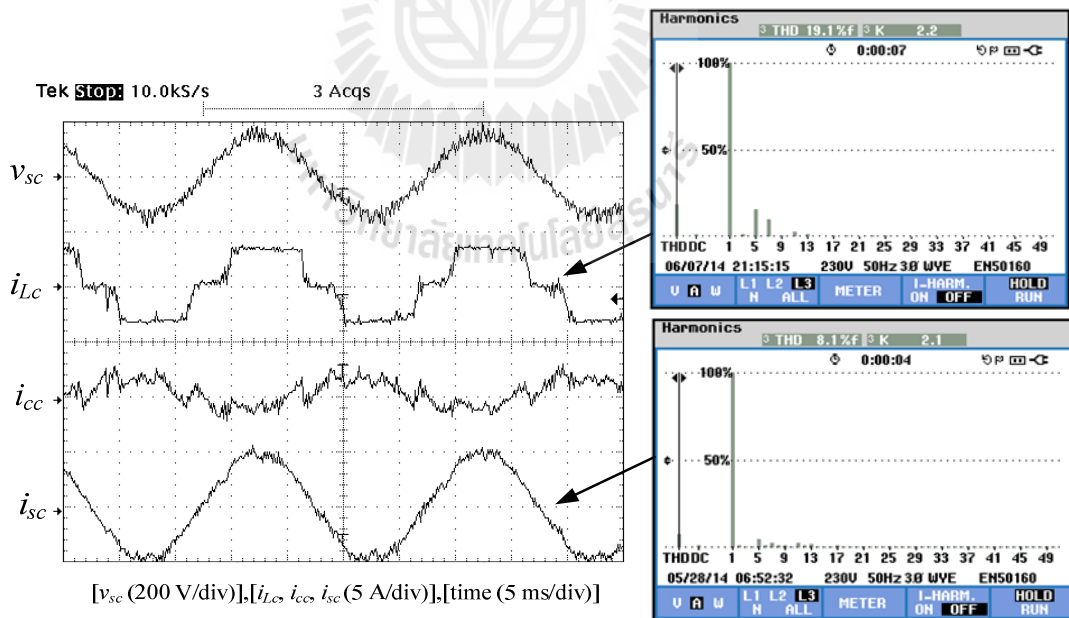
จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งสามเฟสดังรูปที่ 10.43 ถึง 10.45 สังเกตได้ว่า ในกรณีโหลดนี้ระบบที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบพีไอมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าสองโหลดที่ผ่านมา โดยเมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟฉีดกระแสชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$ ,  $i_{cc}$ ) เข้าระบบ พบว่า ผลของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ) มีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้นจากก่อนการชดเชย โดยวัดค่า  $\%THD$  ของกระแสดังกล่าวของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ได้ค่าเท่ากับ 7.9% 7.9% และ 7.8% ตามลำดับ ซึ่งค่า  $\%THD$  ดังกล่าวมีค่าลดลงจากก่อนการชดเชยที่มีค่าเท่ากับ 19.0% 19.7% และ 19.1% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกกรณีระบบที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีดังรูปที่ 10.46 ถึง 10.48 สังเกตได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ) สำหรับระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีซีมีลักษณะเป็นรูปไซน์มากกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งได้ส่งผลค่า  $\%THD$  ของกระแสดังกล่าวที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าน้อยกว่า ที่ค่าเท่ากับ 5.7% 5.7% และ 5.6% ตามลำดับเฟส



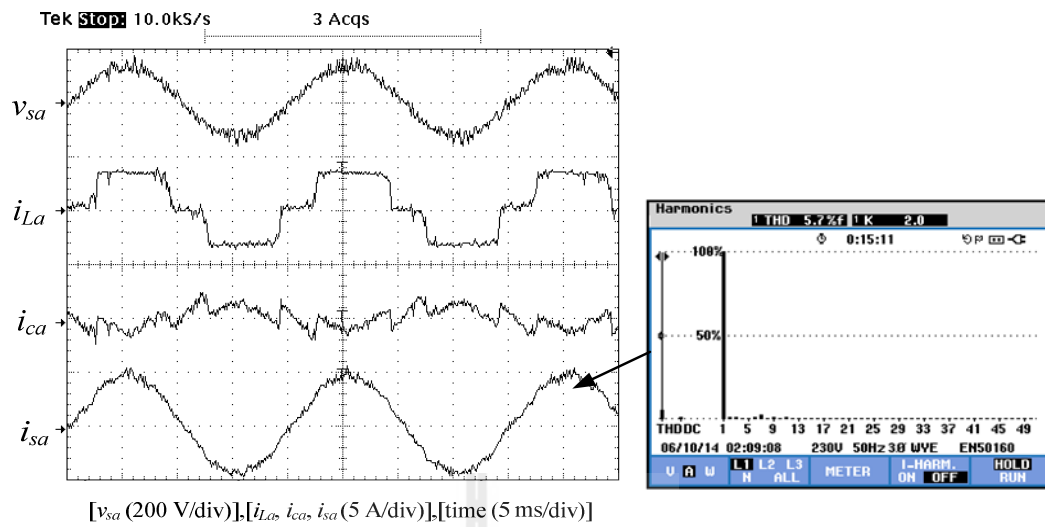
รูปที่ 10.43 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $a$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $60 \Omega$



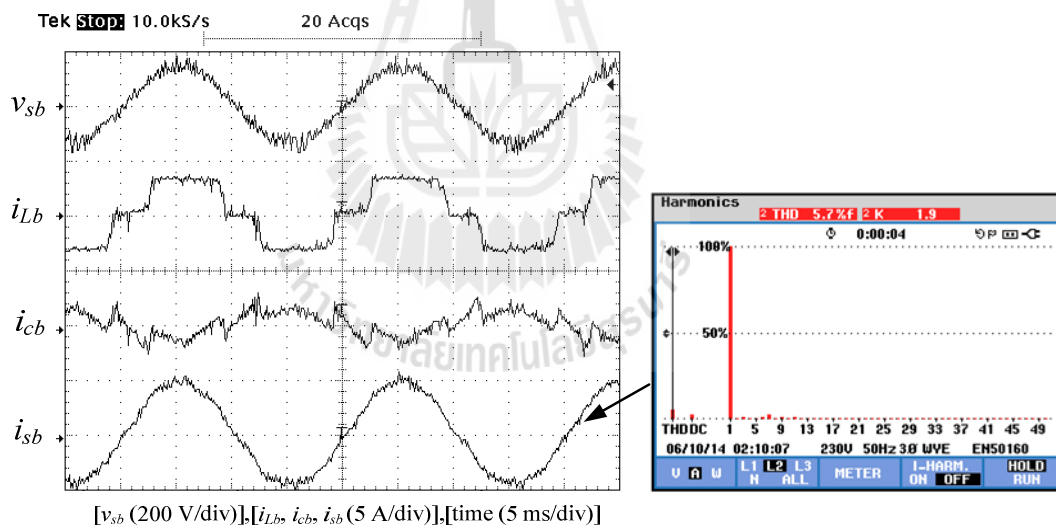
รูปที่ 10.44 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $b$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ 60  $\Omega$



รูปที่ 10.45 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $c$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ 60  $\Omega$

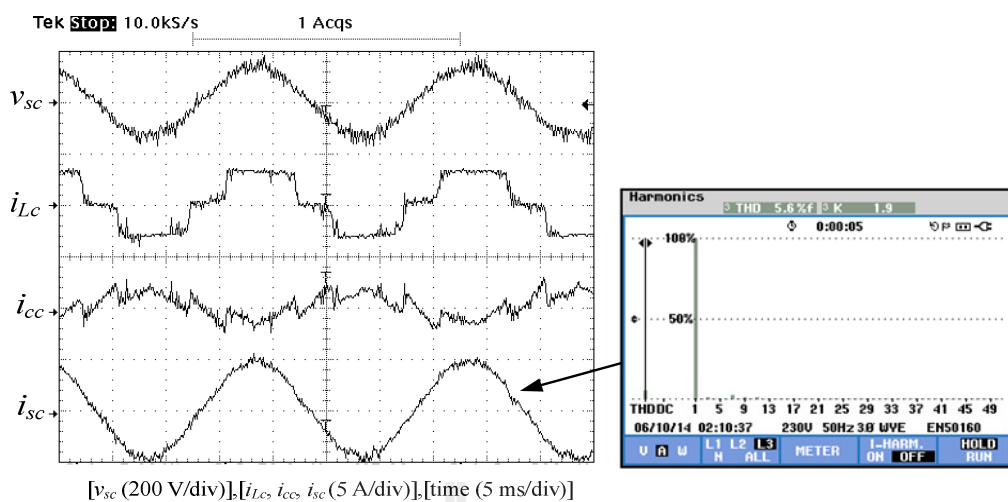


รูปที่ 10.46 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $a$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีไหล  $R_L$  เท่ากับ  $60 \Omega$



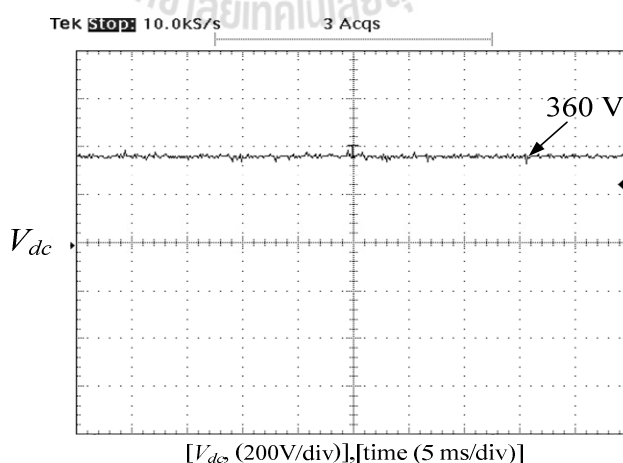
รูปที่ 10.47 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $b$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีไหล  $R_L$  เท่ากับ  $60 \Omega$



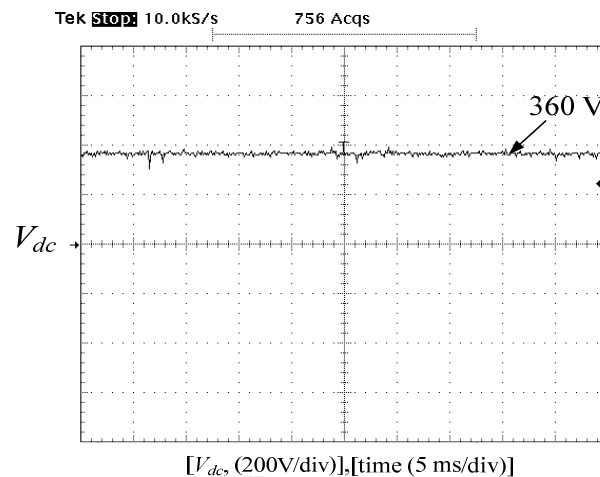


รูปที่ 10.48 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $c$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $60 \Omega$

ผลการทดสอบค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $60 \Omega$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10.49 และ 10.50 จากรูปดังกล่าว จะสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ  $360 \text{ V}$  ตรงตามค่าแรงดันอ้างอิงได้ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ในกรณีโหลดนี้ตัวควบคุมแบบพีไอยังคงที่มีสมรรถนะที่ดีและเพียงพอต่อการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 10.49 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $60 \Omega$



รูปที่ 10.50 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย  
ที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซีกรณีโหลด  $R_L$  เท่ากับ 60  $\Omega$

ตารางที่ 10.7 ผลค่า %THD จากการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกกรณีที่โหลดมีขนาดกระแสไฟฟ้า  
ต่างกัน

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_s$ )								
	โหลด $R_L = 120 \Omega$ , $L_L = 0.5 \text{ H}$			โหลด $R_L = 80 \Omega$ , $L_L = 0.5 \text{ H}$			โหลด $R_L = 60 \Omega$ , $L_L = 0.5 \text{ H}$		
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย		ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย		ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย	
		PI controller	Fuzzy controller		PI controller	Fuzzy controller		PI controller	Fuzzy controller
a	22.2%	12.2%	7.7%	20.9%	9.1%	7.1%	19.0%	7.9%	5.7%
b	22.9%	11.8%	7.7%	21.2%	9.2%	7.0%	19.7%	8.2%	5.7%
c	22.2%	12.0%	7.4%	20.5%	9.1%	7.0%	19.1%	8.1%	5.6%
เฉลี่ย	22.4%	12.0%	7.6%	20.9%	9.1%	7.0%	19.4%	8.1%	5.7%

จากผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกที่ฟั้งสามกรณีโหลดที่มีขนาดกระแสไฟฟ้าต่างกัน ข้างต้น สามารถสรุปผลค่า %THD เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและการใช้ตัวควบคุมพีซีซีได้ดังตารางที่ 10.7 จากตารางดังกล่าว พบว่า ค่า %THD เฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟสสำหรับระบบที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีซีในกรณีที่โหลด  $R_L$  เท่ากับ 120  $\Omega$  80  $\Omega$  และ 60  $\Omega$  มีค่าเท่ากับ 7.6% 7.0% และ 5.7% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากรณีระบบที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ให้ค่า %THD เฉลี่ย เท่ากับ 12.0% 9.1% และ 7.9%

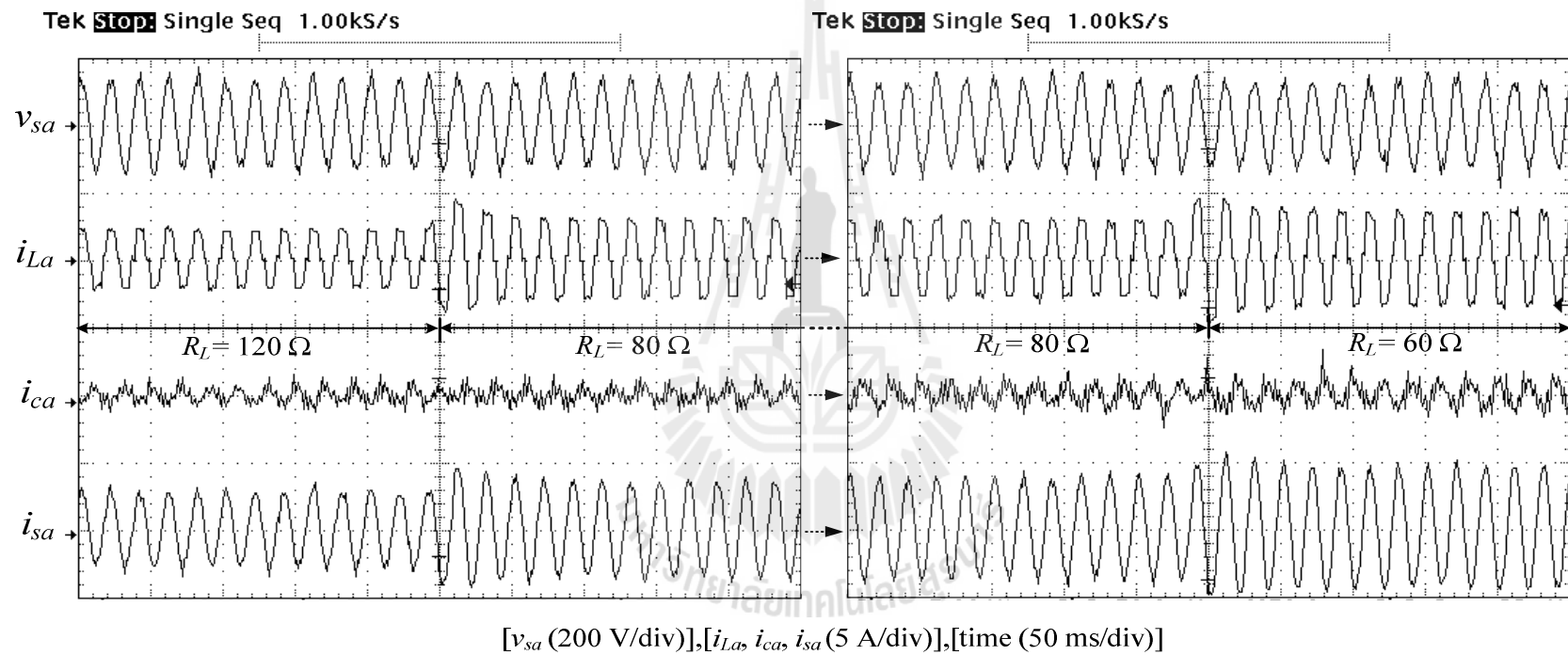
ตามลำดับ จากผลดังกล่าว หมายความว่า ตัวควบคุมพีชชีมีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอทั้งสามกรณีโหลดทดสอบข้างต้น

### 10.3.2 กรณีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีชชีกับการใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว

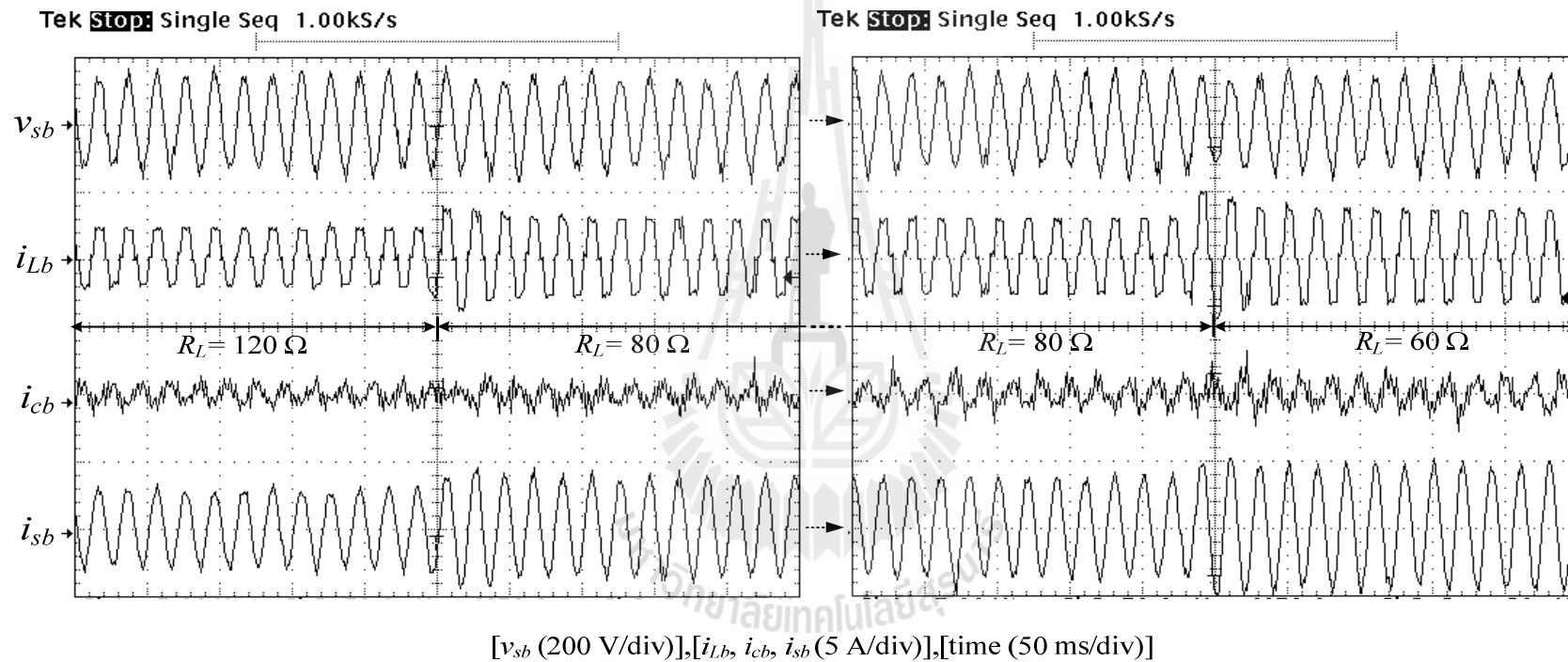
การทดสอบระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีชชีกับการใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวในหัวข้อนี้ จะทำการทดสอบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าไปจากโหลดที่พิจารณาทั้งกรณีเพิ่มขึ้นและน้อยลง โดยโหลดที่พิจารณาคือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลด  $R_L$  เท่ากับ  $80 \Omega$  อนุกรมกับ  $L_L$  เท่ากับ  $0.5 \text{ H}$  ส่วนกรณีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลงจะกำหนดให้โหลด  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $120 \Omega$  และกรณีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะกำหนดให้โหลด  $R_L$  เท่ากับ  $60 \Omega$  โดยตัวควบคุมพีชชีที่ใช้ในการทดสอบ คือ ตัวควบคุมพีชชีที่ออกแบบมาสำหรับกรณีโหลดที่พิจารณาโดยใช้วิธีการใหม่ตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 8.2 บทที่ 8 โดยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีชชีนี้จะใช้เท่าเดิมถึงแม้ว่าโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลง ส่วนตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวจะใช้ออกแบบด้วยวิธีการใหม่ตามที่นำเสนอในบทที่ 9 ผลการทดสอบระบบดังกล่าวสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชี และที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวสามารถอภิปรายได้ดังต่อไปนี้

ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชชีสำหรับเฟส  $a$ ,  $b$  และ  $c$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10.51 ถึง 10.53 และผลการทดสอบสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10.57 ถึง 10.59 โดยในช่วงเวลาที่โหลด  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $80 \Omega$  (โหลดพิจารณา) พบว่า ค่ายอดของกระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$ ,  $i_{Lc}$ ) มีค่าประมาณเท่ากับ  $3 \text{ A}$  ส่วนในช่วงที่โหลด  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $120 \Omega$  ค่ายอดของกระแสไฟฟ้าที่โหลดมีค่าน้อยลงเหลือประมาณเท่ากับ  $2 \text{ A}$  และในช่วงที่โหลด  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $60 \Omega$  พบว่า ค่ายอดของกระแสไฟฟ้าที่โหลดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณเท่ากับ  $4 \text{ A}$

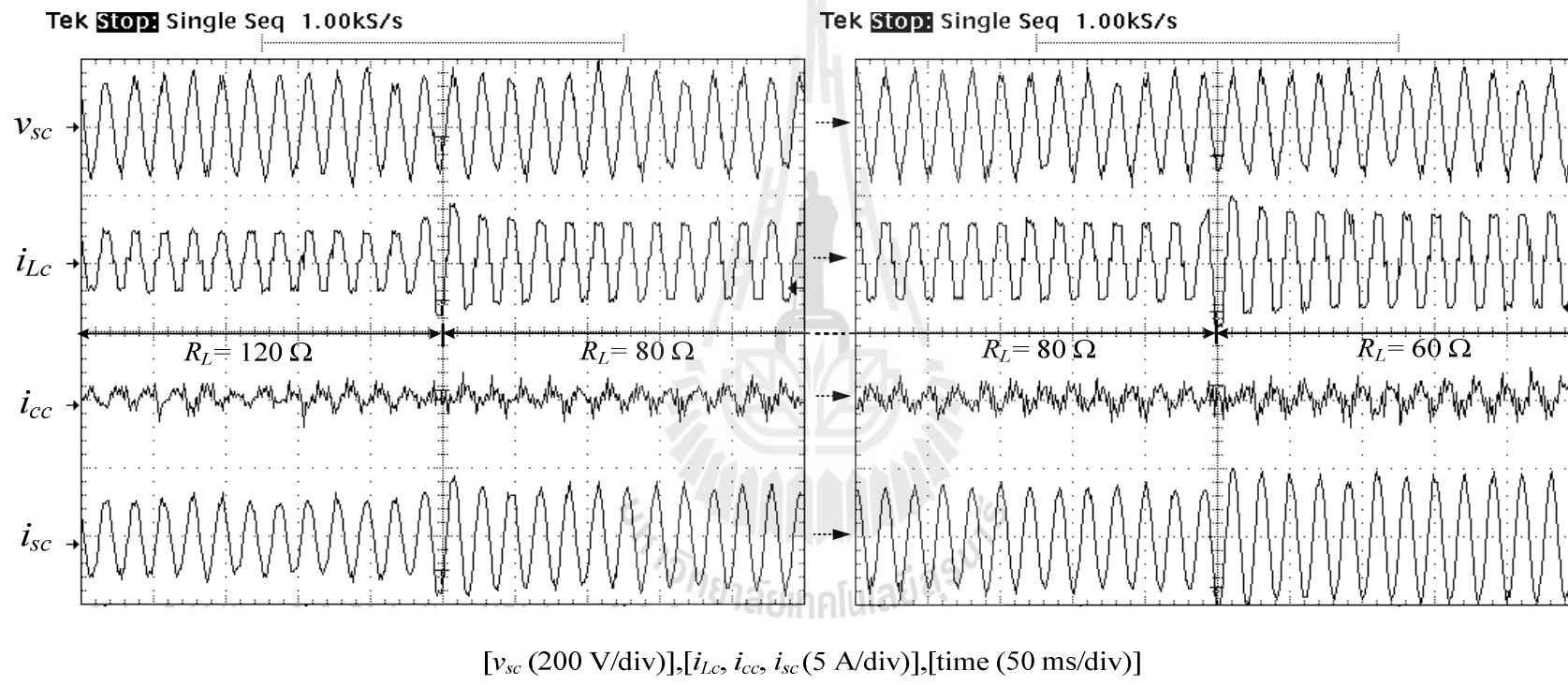
จากรูปที่ 10.51 ถึง 10.53 เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น สังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชชี สามารถฉีดกระแสชดเชย ( $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$ ,  $i_{cc}$ ) ได้สอดคล้องตามขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป และส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ) มีขนาดแปรเปลี่ยนตามขนาดกระแสไฟฟ้าที่โหลดด้วยเช่นกัน ซึ่งจากผลการกำจัดฮาร์มอนิกดังกล่าว สามารถแสดงผลในสภาวะคงตัวของกรณีโหลดพิจารณาสามารถดูได้จากรูปที่ 10.54 ผลในกรณีที่โหลดมีขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลงดูได้จากรูปที่ 10.55 และผลในกรณีที่โหลดมีขนาดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสามารถดูได้จากรูปที่ 10.56



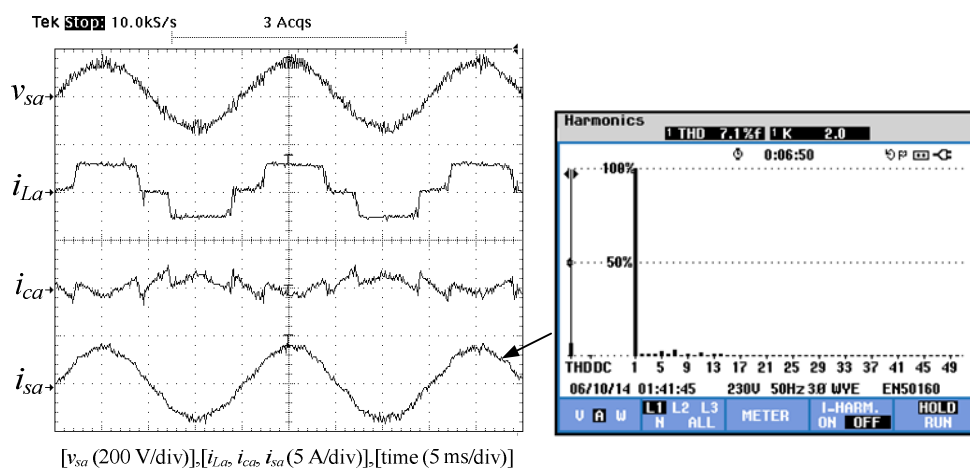
รูปที่ 10.51 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกของเฟส  $a$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี  
 กรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า



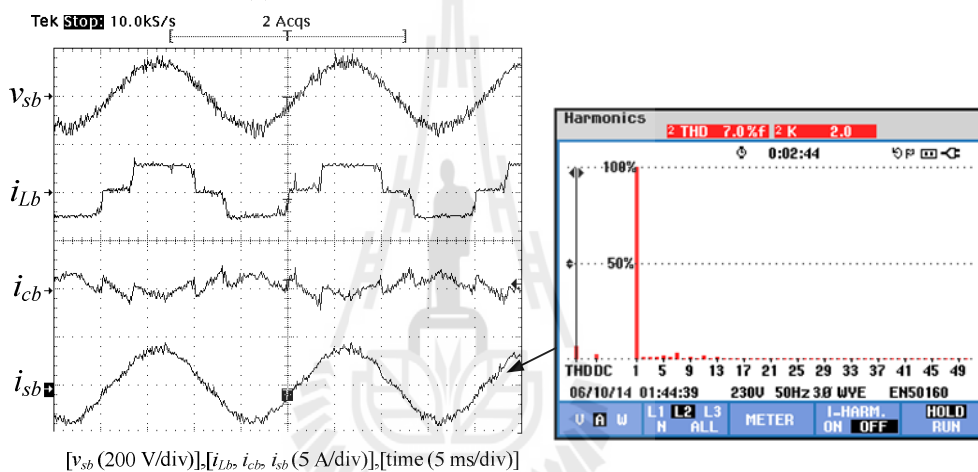
รูปที่ 10.52 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกของเฟส  $b$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี  
กรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า



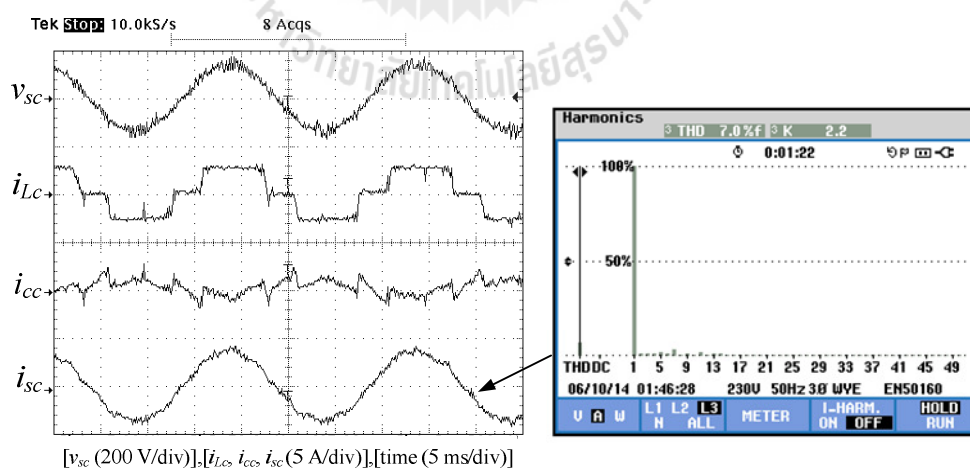
รูปที่ 10.53 ผลการกำจัดการรบกวนของเฟส  $c$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี  
 กรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า



(ก) เฟส a

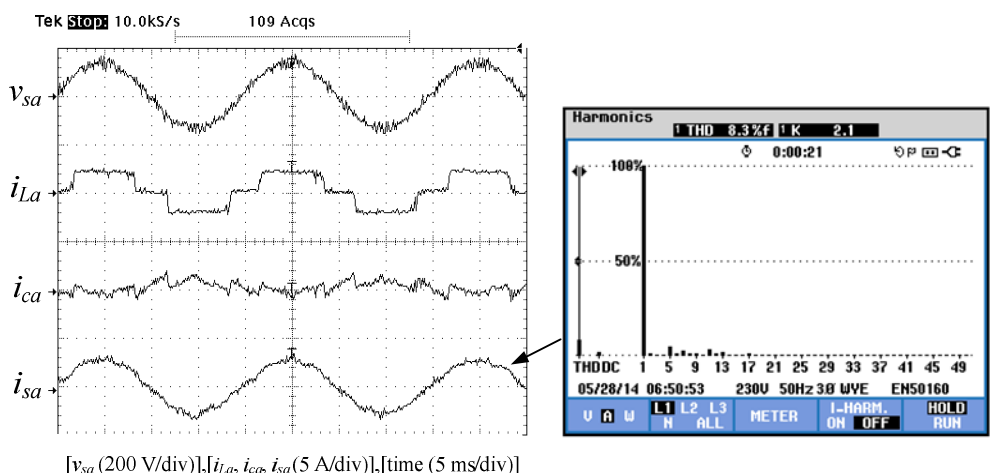


(ข) เฟส b

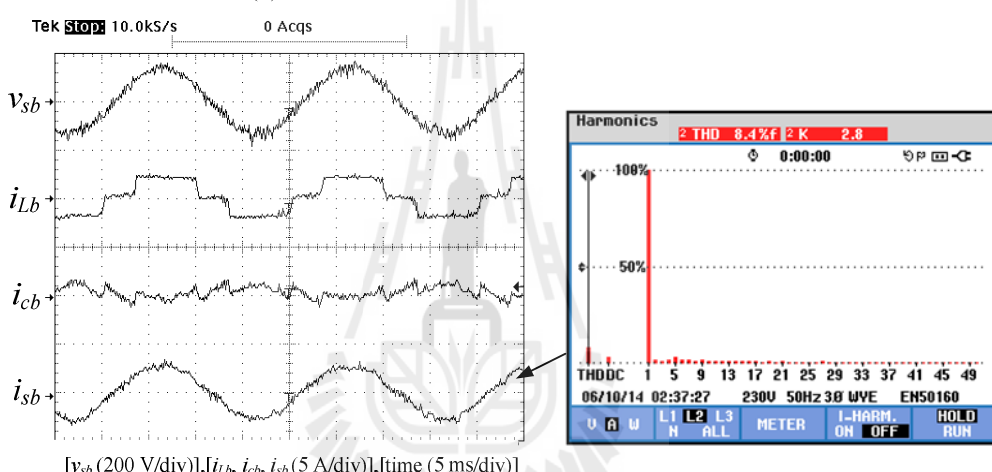


(ค) เฟส c

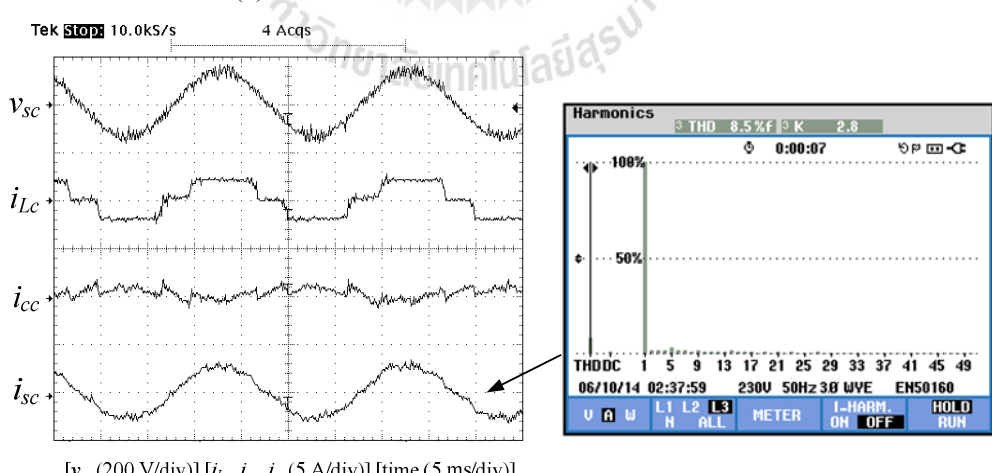
รูปที่ 10.54 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับการควบคุมกระแสคyclicที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี  
กรณีโหลดที่พิจารณา



(ก) เฟส a



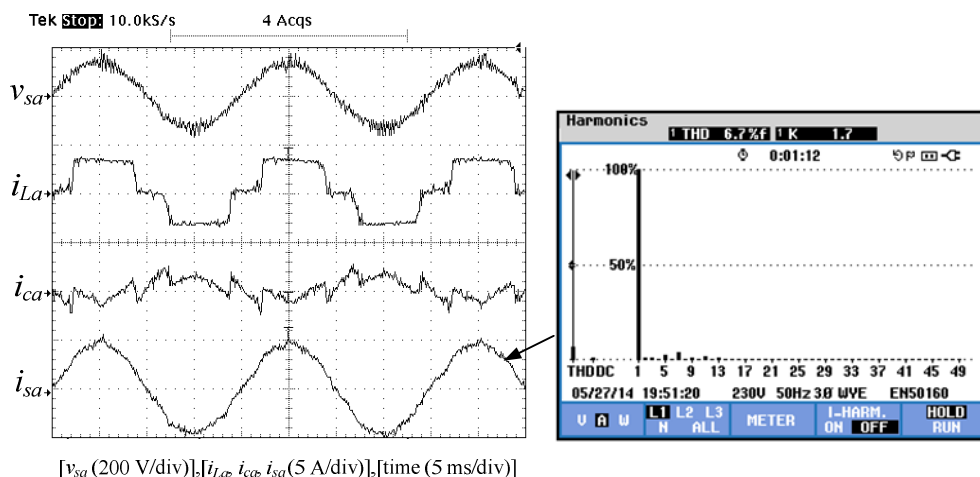
(ข) เฟส b



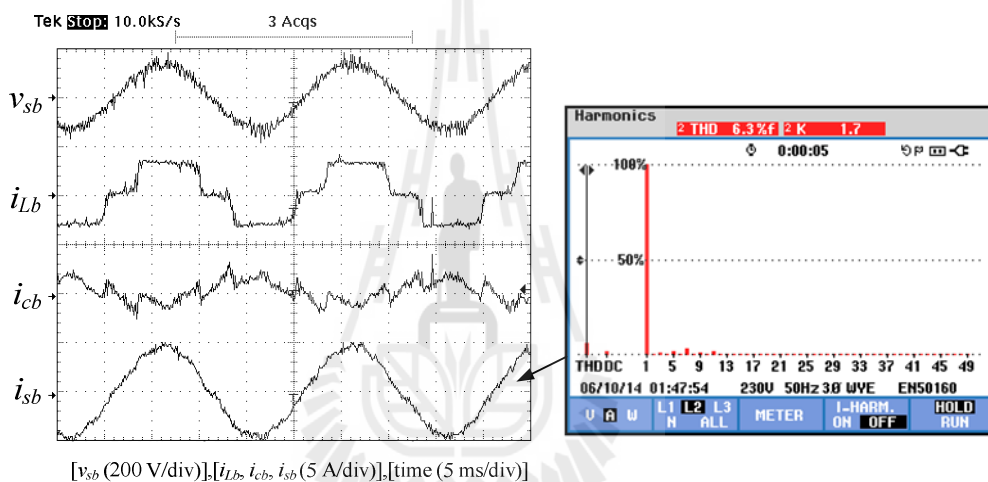
(ค) เฟส c

รูปที่ 10.55 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy ที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลง

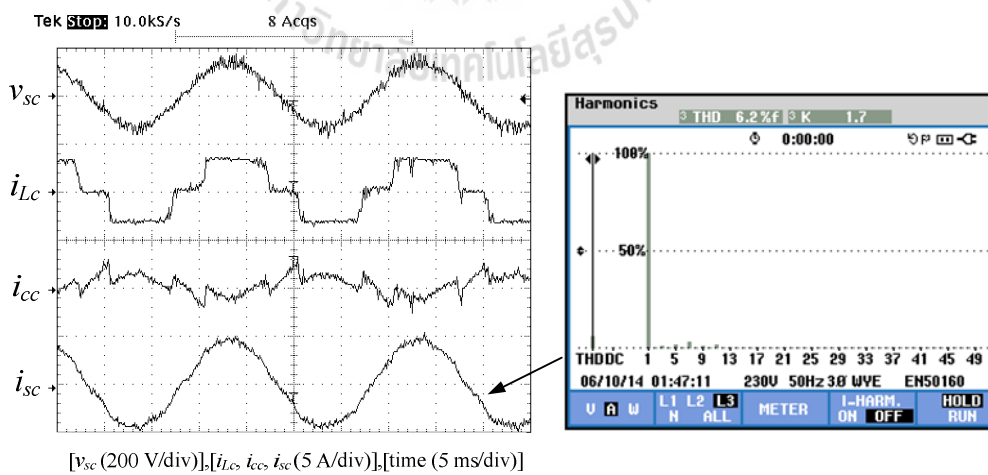




(ก) เฟส a



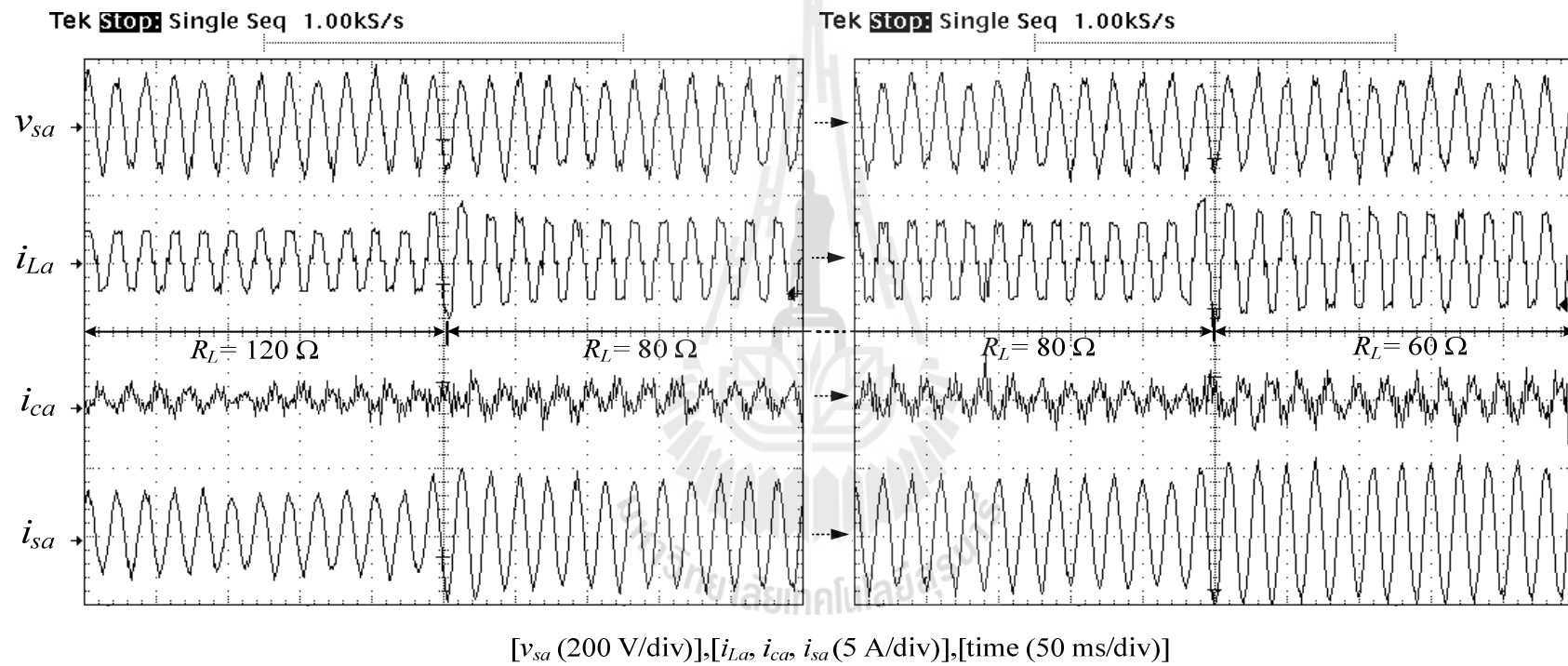
(ข) เฟส b



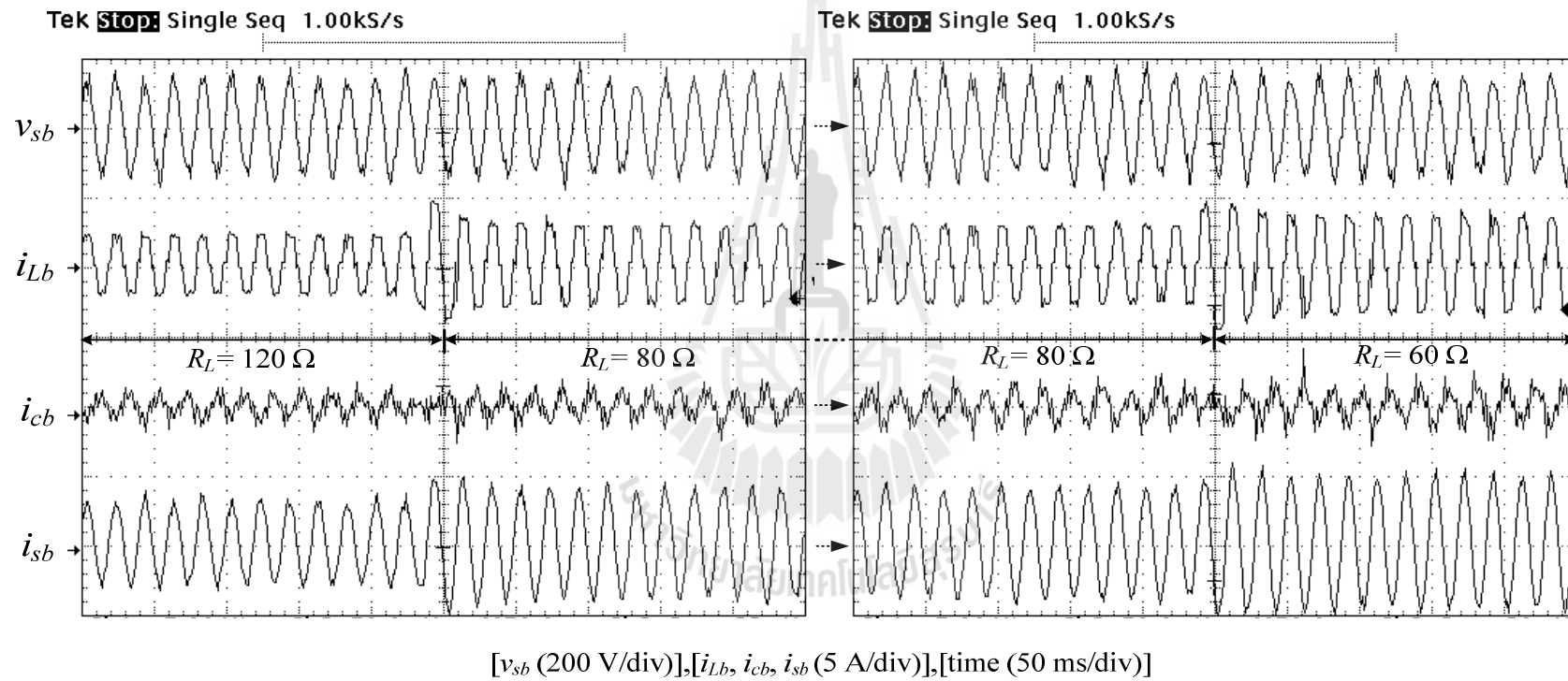
(ค) เฟส c

รูปที่ 10.56 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีซี  
กรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

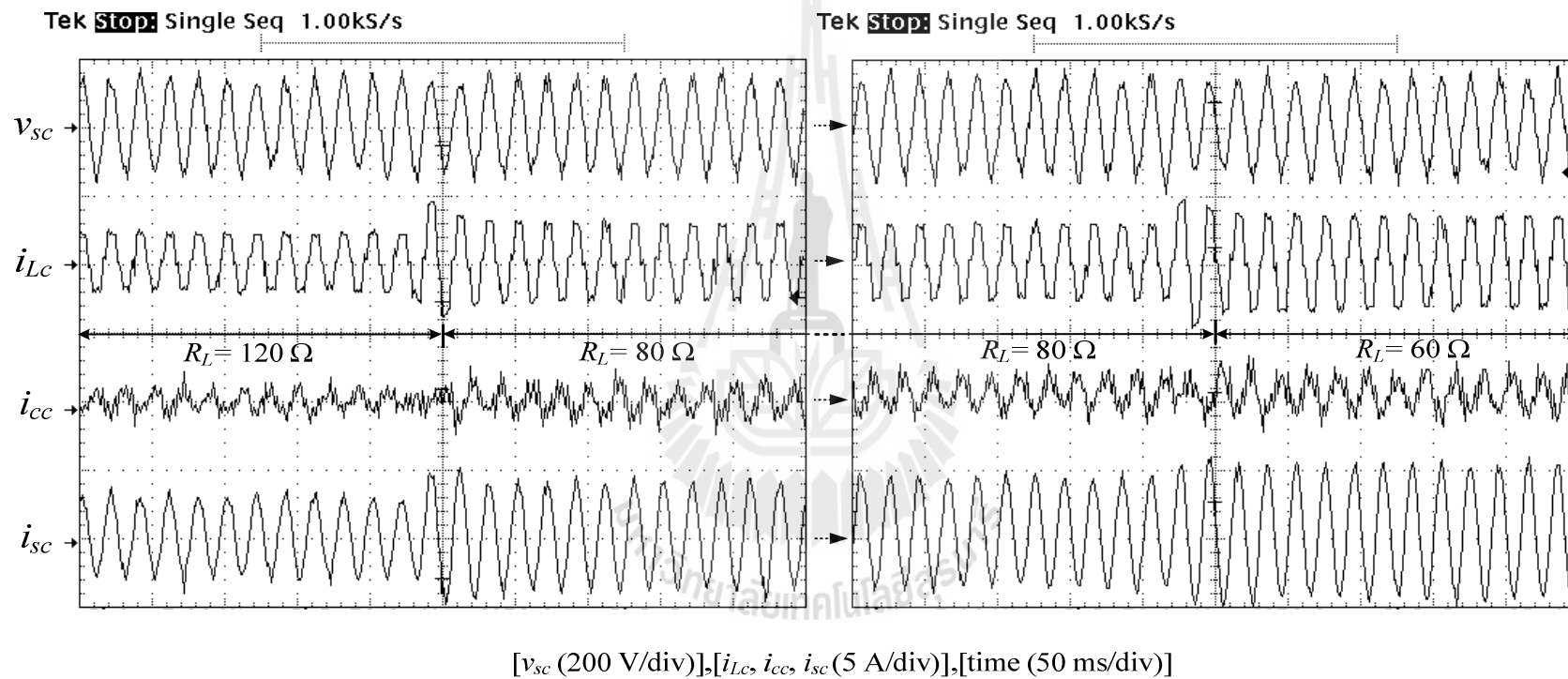
จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีซีกรณีโพลด์ที่พิจารณาดังรูปที่ 10.54 สังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถลดกระแสชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$ ,  $i_{cc}$ ) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่อกระแสชดเชยดังกล่าวถูกฉีดเข้ากับระบบที่จุด PCC ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ) กลับมามีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้น โดยสามารถวัดค่า %THD ของกระแสดังกล่าวสำหรับเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ได้ค่าเท่ากับ 7.1% 7.0% และ 7.0% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย (ค่า %THD ก่อนการชดเชยของกรณีโพลด์นี้มีค่าเท่ากับ 20.9% 21.2% และ 20.5% ตามลำดับเฟส) สำหรับรูปที่ 10.55 คือ ผลการกำจัดฮาร์มอนิกกรณีโพลด์มีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลง ซึ่งจากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีซีซียังสามารถควบคุมกระแสชดเชยทั้งสามเฟสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้ และส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยในกรณีโพลด์นี้ สามารถวัดค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ได้เท่ากับ 8.3% 8.4% และ 8.5% ตามลำดับ (ค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 22.2% 22.9% และ 22.2% ตามลำดับเฟส) นอกจากนี้ จากรูปที่ 10.56 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกโดยการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีซีซีกรณีโพลด์มีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่า กระแสชดเชยทั้งสามเฟสได้ส่งผลกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยกลับมามีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้นที่ค่า %THD เท่ากับ 6.7% 6.3% และ 6.2% ตามลำดับเฟส (ค่า %THD ก่อนการชดเชยสำหรับกรณีโพลด์นี้มีค่าเท่ากับ 19.0% 19.7% และ 19.1% ตามลำดับเฟส)



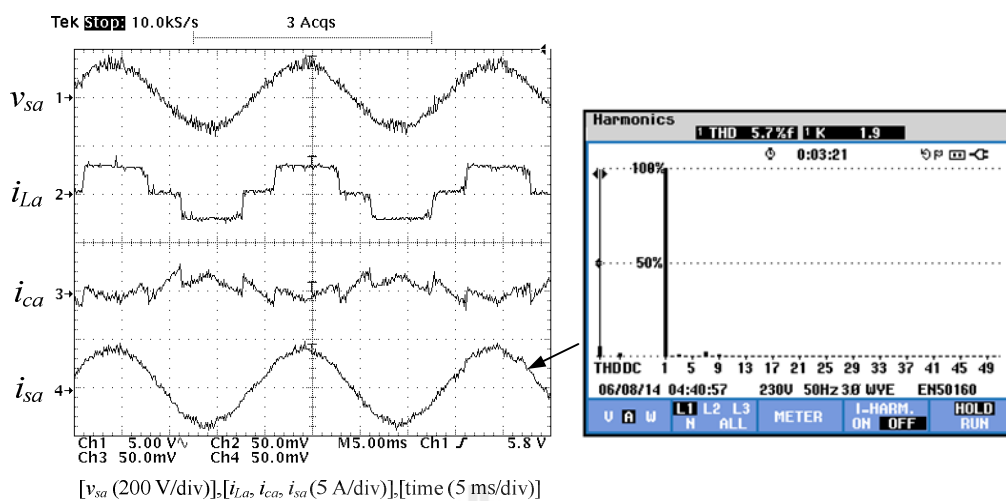
รูปที่ 10.57 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกของเฟส  $a$  สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัว  
กรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า



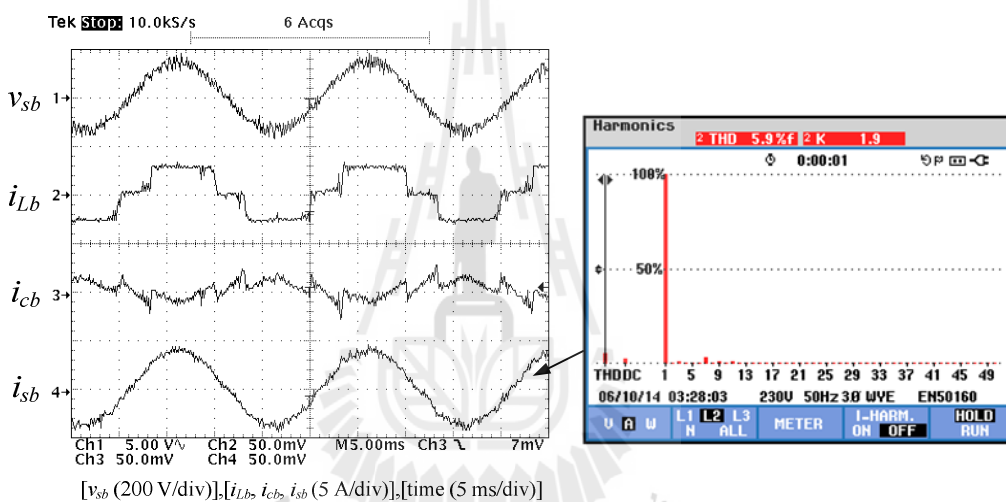
รูปที่ 10.58 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส  $b$  สำหรับการควบคุมกระแสขดลวดที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัว  
กรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า



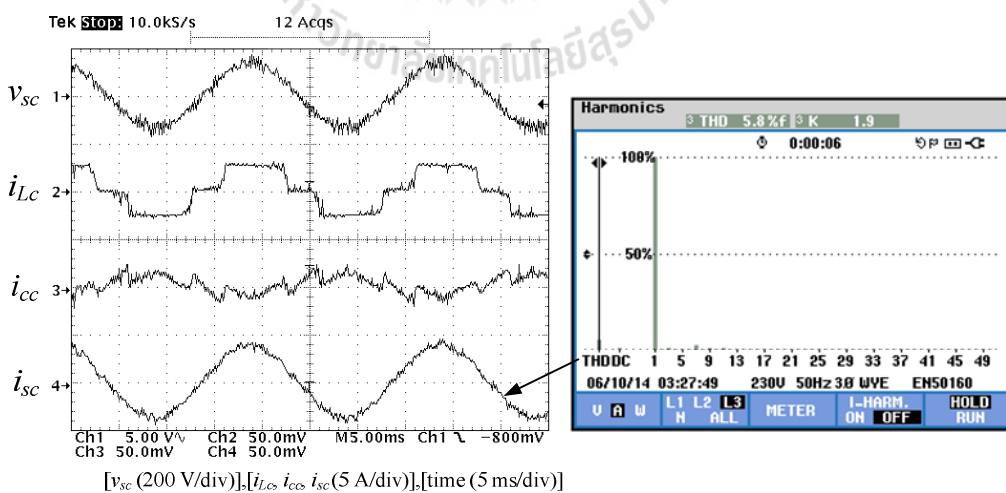
รูปที่ 10.59 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกของเฟส  $c$  สำหรับการควบคุมกระแสขดเซย์ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัว  
 กรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า



(ก) เฟส a

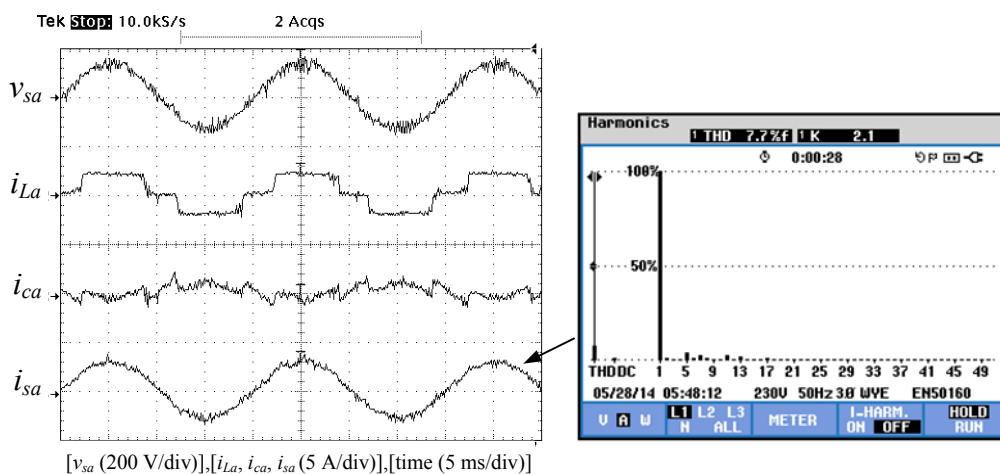


(ข) เฟส b

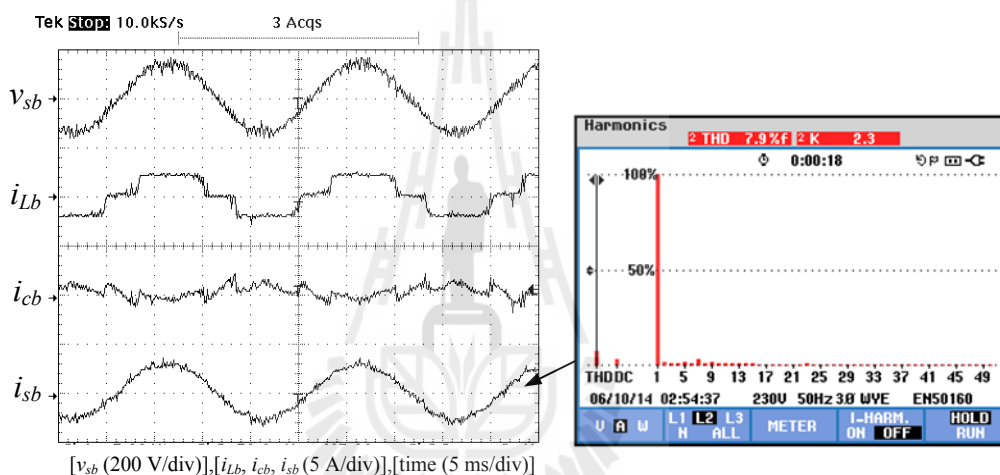


(ค) เฟส c

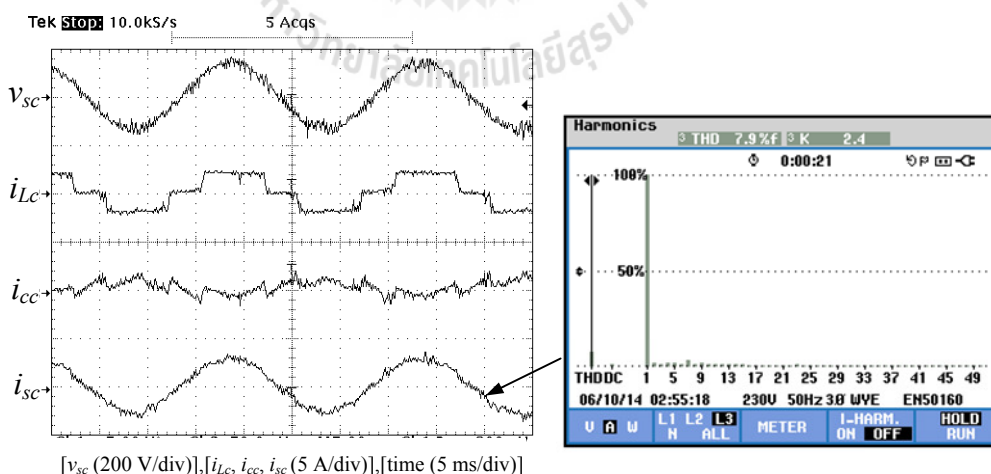
รูปที่ 10.60 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัวกรณีโหลดที่พิจารณา



(ก) เฟส a

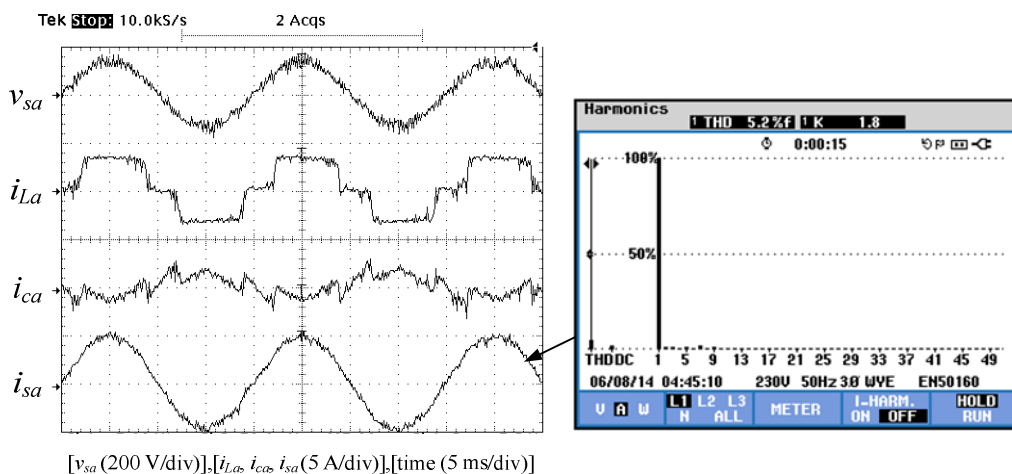


(ข) เฟส b

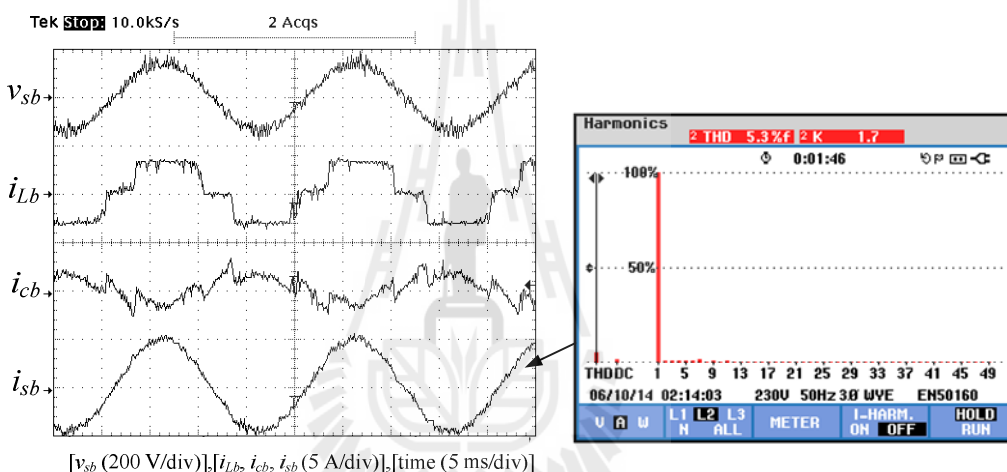


(ค) เฟส c

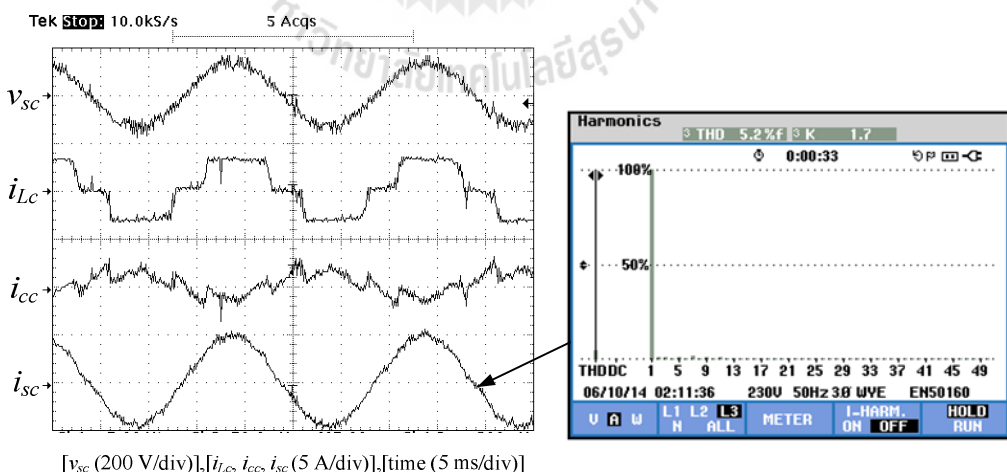
รูปที่ 10.61 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับการควบคุมกระแสขดลวดที่ใช้ตัวควบคุมพัลส์  
แบบปรับตัวกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลง



(ก) เฟส a



(ข) เฟส b



(ค) เฟส c

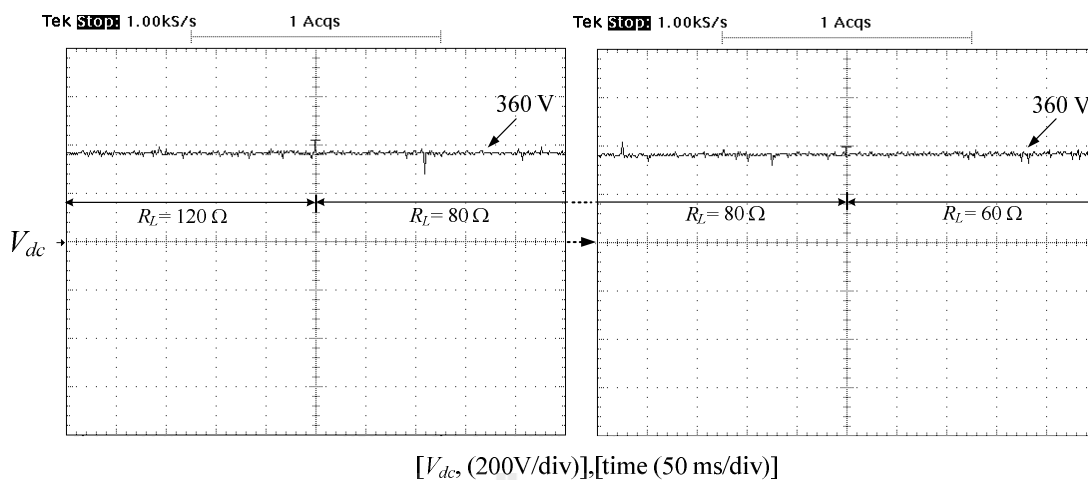
รูปที่ 10.62 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับการควบคุมกระแสขดลวดเซซีที่ใช้ตัวควบคุมพีซี แบบปรับตัวกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น



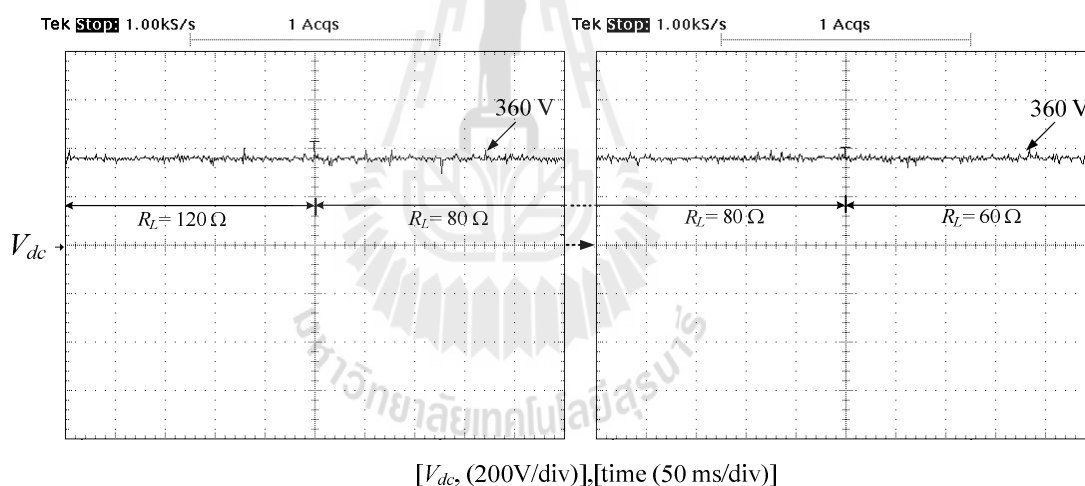
สำหรับผลการกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัวทั้งสามเฟสกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 10.57 ถึง 10.59 สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัวสามารถควบคุมให้กระแสชดเชย ( $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$ ,  $i_{cc}$ ) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีขนาดแปรเปลี่ยนสอดคล้องตามขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ โหลดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยกระแสชดเชยดังกล่าวได้ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ) มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามโหลดด้วยเช่นกัน ซึ่งสามารถดูได้จากผลการกำจัดฮาร์โมนิกในสภาวะคงตัวของแต่ละกรณีโหลดดังรูปที่ 10.60 ถึง 10.62

จากรูปที่ 10.60 ถึง 10.62 สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัวสามารถควบคุมกระแสชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$ ,  $i_{cc}$ ) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสามกรณีโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกระแสชดเชยดังกล่าวได้ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยทั้งสามเฟส ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ) กลับมามีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย ซึ่งในกรณีโหลดที่พิจารณา (รูปที่ 10.60) สามารถวัดค่า %THD หลังการชดเชยของเฟส  $a$   $b$  และ  $c$  ได้เท่ากับ 5.7% 5.9% และ 5.8% กรณีที่โหลดเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าน้อยลง (รูปที่ 10.61) วัดค่า %THD หลังการชดเชยได้เท่ากับ 7.7% 7.9% และ 7.9% และกรณีที่โหลดเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 10.62) สามารถวัดค่า %THD หลังการชดเชยได้เท่ากับ 5.2% 5.3% และ 5.2% ตามลำดับเฟส

นอกจากนี้ ผลการทดสอบค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10.63 (การควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีซี และรูปที่ 10.64 (การควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัว) จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงให้มีความตามค่าแรงดันอ้างอิงได้ทั้งสามกรณีโหลด โดยเท่ากับ 360 V นอกจากนี้ เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างฉับพลันจากโหลด  $R_L$  เท่ากับ 120  $\Omega$  เป็น 80  $\Omega$  และเปลี่ยนแปลงอีกครั้งจากโหลด  $R_L$  เท่ากับ 80  $\Omega$  เป็น 60  $\Omega$  สังเกตได้ว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงดังกล่าวมีค่าประมาณคงที่ทั้งสองกรณีการเปลี่ยนแปลงโหลด



รูปที่ 10.63 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี  
กรณีทีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 10.64 ผลค่าแรงดันบัสไฟตรงสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี  
แบบปรับตัวกรณีทีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า

จากผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบฮาร์ดแวร์ในกรณีทีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าข้างต้น สามารถสรุปผลค่า %THD ในแต่ละกรณีโหลดเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมพีชซีกับตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัว แสดงได้ดังตารางที่ 10.8 ดังนี้

ตารางที่ 10.8 ผลค่า %THD จากการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_s$ )								
	โหลด $R_L = 120 \Omega$ , $L_L = 0.5 \text{ H}$ (ค่าขดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2 A)			โหลด $R_L = 80 \Omega$ , $L_L = 0.5 \text{ H}$ (ค่าขดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3 A)			โหลด $R_L = 60 \Omega$ , $L_L = 0.5 \text{ H}$ (ค่าขดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4 A)		
	ก่อนการ ชดเชย	หลังการชดเชย		ก่อนการ ชดเชย	หลังการชดเชย		ก่อนการ ชดเชย	หลังการชดเชย	
		Fuzzy controller	Adaptive fuzzy controller		Fuzzy controller	Adaptive fuzzy controller		Fuzzy controller	Adaptive fuzzy controller
a	22.2%	8.3%	7.7%	20.9%	7.1%	5.7%	19.0%	6.7%	5.2%
b	22.9%	8.4%	7.9%	21.2%	7.0%	5.9%	19.7%	6.3%	5.3%
c	22.2%	8.5%	7.9%	20.5%	7.0%	5.8%	19.1%	6.2%	5.2%
เฉลี่ย	22.4%	8.4%	7.8%	20.9%	7.0%	5.8%	19.4%	6.4%	5.2%

จากตารางที่ 10.8 พบว่า ค่า %THD เฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสามเฟส สำหรับระบบที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชชีกรณี โหลดที่พิจารณา ( $R_L$  เท่ากับ 80  $\Omega$ ) มีค่าเท่ากับ 7.0% กรณีโหลดเปลี่ยนเป็น  $R_L$  เท่ากับ 120  $\Omega$  ค่า %THD เฉลี่ยเท่ากับ 8.4% และกรณีโหลดเปลี่ยนเป็น  $R_L$  เท่ากับ 60  $\Omega$  ค่า %THD เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 6.4% ส่วนระบบที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว พบว่า ให้ค่า %THD เฉลี่ยน้อยกว่าการใช้ตัวควบคุมพีชชีเล็กน้อยทั้งสามกรณี โหลด คือ 5.8% 7.8% และ 5.2% ตามลำดับ จากผลดังกล่าว หมายความว่า ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวและตัวควบคุมพีชชีที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่ มีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ดีใกล้เคียงกันในการทดสอบเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าที่โหลดทั้งสามกรณี

#### 10.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟ การทดสอบระบบดังกล่าวได้แบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกับการใช้ตัวควบคุมพีชชีในกรณีที่โหลดของระบบมีขนาดกระแสไฟฟ้าต่างกัน และกรณีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีกับการใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า โดยผลการทดสอบในกรณีแรก พบว่า

ตัวควบคุมพืชที่มีสมรรถนะการควบคุมกระแสน้ำที่ต่ำกว่าตัวควบคุมแบบพีไอในทุกกรณี โหลดขนาดกระแสไฟฟ้า ส่วนผลการทดสอบเปรียบเทียบในกรณีที่สอง พบว่า ตัวควบคุมพืชและตัวควบคุมพืชแบบปรับตัวมีสมรรถนะการควบคุมกระแสน้ำที่ใกล้เคียงกัน โดยตัวควบคุมพืชแบบปรับตัวให้ผลค่า  $%THD$  ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยน้อยกว่าตัวควบคุมพืชเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ทั้งสองชนิดตัวควบคุมสามารถส่งผลให้ค่า  $%THD$  หลังการชดเชยมีค่าลดลงจากก่อนการชดเชยทั้งคู่ นอกจากนี้ผลการทดสอบค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ พบว่า ตัวควบคุมแบบพีไอมีสมรรถนะที่เพียงพอต่อการควบคุมให้แรงดันบัสไฟตรงมีค่าตามแรงดันอ้างอิงได้ในทุกกรณีการทดสอบ



## บทที่ 11

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 11.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล รวมถึงการสร้างระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟสำหรับการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสซึ่งได้วิธีใหม่ที่เรียกว่าวิธีฟูรีเยร์เอสดี โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มต้นจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟในส่วนต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ส่วน ได้แก่ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรองกำลังแอกทีฟ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบวิธีสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และระบบควบคุมของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีชชี ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรองกำลังแอกทีฟและตัวควบคุมพีชชี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีบอร์ด DSP สำหรับใช้สร้างฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งผลงานวิจัยทั้งหมดดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส หรือวิธีเอสดี เป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีสมรรถนะสูงในการตรวจจับฮาร์มอนิก อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบไฟฟ้าได้ภายหลังการชดเชย รูปแบบการคำนวณของวิธีดังกล่าวมีความหลากหลายซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ตามวัตถุประสงค์ของการชดเชย ได้แก่ วิธีเอสดีแบบกระแสเท่ากัน วิธีเอสดีแบบกำลังเท่ากัน และวิธีเอสดีแบบอิมพีแดนซ์เท่ากัน ซึ่งแต่ละวิธีได้อาศัยการคำนวณที่ง่ายและเหมาะกับการโปรแกรมทางดิจิทัลเป็นอย่างยิ่ง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาวิธีการตรวจจับซิงโครนัสให้มีสมรรถนะการตรวจจับที่ดียิ่งกว่าเดิมโดยใช้หลักการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อนเข้ามาช่วยในส่วนของการแยกปริมาณฮาร์มอนิกแทนการใช้วงจรรอง และเรียกวิธีดังกล่าวใหม่ว่า วิธีฟูรีเยร์เอสดี โดยรายละเอียดการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดีได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัลไฟตรงของ วงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนตีคว ซึ่งการออกแบบระบบควบคุมดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 โดยการ ออกแบบระบบควบคุมดังกล่าวได้นำเสนอการออกแบบร่วมกับการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและ เทคนิคการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์ที่ดับเบิลยูเอ็ม

การควบคุมแบบฟัซซีเป็นวิธีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับระบบควบคุมที่มีความซับซ้อน คลุมเครือ ไม่เป็นเชิงเส้น และหลายอินพุต และไม่จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ที่แม่นยำของระบบในการออกแบบตัวควบคุม ทฤษฎีต่าง ๆ ของฟัซซี ได้แก่ ฟัซซีเซต การดำเนินการทางฟัซซีเซต ฟังก์ชันสมาชิก ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา กฎของฟัซซี และการ อนุมานฟัซซี ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 นอกจากนี้ในบทดังกล่าวยังได้นำเสนอการออกแบบ โครงสร้างต่าง ๆ ของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับนำไปใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลัง แอกทีฟบนแกนตีควร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ที่ดับเบิลยูเอ็มแทนการใช้ตัว ควบคุมแบบพีไอ

การจำลองสถานการณ์ระบบก้าจัดฮาร์โมนิกที่พิจารณามีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการทำให้วิทยานิพนธ์ โดยการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวจะใช้ในการตรวจสอบ สมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบและผลการก้าจัดฮาร์โมนิกในขั้นปลายก่อนที่จะดำเนินการ สร้างระบบฮาร์ดแวร์ทดสอบจริง ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และอุปกรณ์ ไฟฟ้าในระบบที่พิจารณาที่อาจเกิดขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอเทคนิค การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด eZdsp™ F28335 ซึ่งสามารถให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบฮาร์ดแวร์จริงมากกว่า การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ทั้งหมด โดยรายละเอียดของเทคนิคการจำลองสถานการณ์ แบบฮาร์ดแวร์ในลูปดังกล่าวสามารถดูได้จากบทที่ 6

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับใช้ควบคุม กระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ รวมถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลัง แอกทีฟเพื่อให้มีสมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยที่ดีมากยิ่งขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ การออกแบบโดยใช้วิธีการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ ระบบก้าจัดฮาร์โมนิกที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟและตัวควบคุมฟัซซีที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ดังกล่าว พบว่า ตัวควบคุมฟัซซีมีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลัง แอกทีฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีด้วยวิธีการค้นหา ค่าเหมาะที่สุดแบบตาบู่เชิงปรับตัวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 7 นอกจากนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ยังได้ คิดค้นวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีวิธีใหม่สำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลัง

แอกทีฟเช่นกัน ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้การคำนวณที่ง่าย และไม่จำเป็นต้องอาศัยความชำนาญและประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบกำจัดฮาร์มอนิกกรณีที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีจากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่สามารถให้ประสิทธิผลในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีเช่นกันดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 8

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟในกรณีที่โหลดฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษ้ออกแบบตัวควบคุมกระแสชดเชยที่สามารถปรับตัวได้โดยใช้ตัวควบคุมพีชซีและพีชซีช่วย ซึ่งเรียกรวมกันว่า ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัว โดยผลการจำลองสถานการณ์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกกรณีการทดสอบเปลี่ยนแปลงโหลดพบว่า ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวสามารถควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยืดหยุ่นกว่ากรณีการใช้เพียงตัวควบคุมพีชซีโดยไม่มีพีชซีช่วย โดยผลค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชยด้วยเช่นกัน รายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวรวมถึงการทดสอบดังกล่าว ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 9

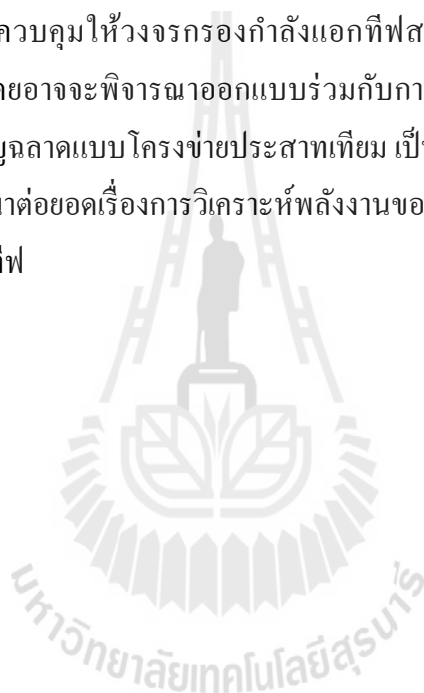
ในบทที่ 10 ได้นำเสนอการสร้างระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ โดยในส่วนของระบบควบคุมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้การคำนวณทางดิจิทัลบนบอร์ด eZdsp™ F28335 การทดสอบระบบฮาร์ดแวร์ดังกล่าวได้แบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกับการใช้ตัวควบคุมพีชซีในกรณีที่โหลดของระบบมีขนาดกระแสไฟฟ้าต่างกัน และกรณีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีกับการใช้ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้า โดยผลการทดสอบในกรณีแรก พบว่า ตัวควบคุมพีชซีสามารถให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ ส่วนผลการทดสอบในกรณีที่สองพบว่า ตัวควบคุมพีชซีและตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวมีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีใกล้เคียงกัน โดยการควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัวให้ผลค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยน้อยกว่าการใช้ตัวควบคุมพีชซีเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ทั้งสองชนิดตัวควบคุมดังกล่าวสามารถให้ผลค่า %THD ลดลงจากก่อนการชดเชยทั้งคู่ โดยผลการทดสอบสามารถดูได้จากบทที่ 10 จากการทดสอบในทางปฏิบัติได้แสดงให้เห็นแล้วว่า ทั้งตัวควบคุมพีชซี และตัวควบคุมพีชซีแบบปรับตัว ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการใหม่ตามที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีและยืดหยุ่นกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

## 11.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดีที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ประสิทธิผลการตรวจจับที่ดีในกรณีที่ไม่พิจารณาผลของความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย อย่างไรก็ตาม ถ้าแรงดันดังกล่าวมีความถี่เพิ่มขึ้นไปจากรูปไซน์ จะส่งผลให้การตรวจจับฮาร์มอนิกมีความถูกต้องน้อยลง ดังนั้น จึงควรมีการพัฒนาต่อยอดแก้ไขปัญหาดังกล่าวเพื่อให้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดีมีประสิทธิผลสูงสุด

2. การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับรองรับกรณีโหลดฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลง สามารถพิจารณาออกแบบโครงสร้างระบบควบคุมในรูปแบบอื่น ๆ ที่สามารถควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยอาจจะพิจารณาออกแบบร่วมกับการใช้ตัวควบคุมชนิดอื่น ๆ เช่น การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมชาญฉลาดแบบโครงข่ายประสาทเทียม เป็นต้น

3. ควรมีการพัฒนาต่อยอดเรื่องการวิเคราะห์พลังงานของระบบที่สอดคล้องกับพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ





## รายการอ้างอิง

- กองพัน อารีรักษ์ และ สราวุฒิ สุจิตจร. (2545). การเปรียบเทียบสมรรถนะของการค้นหาด้วย  
จินเนติกอัลกอริทึมกับวิธีตาบ. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 9: 61-68.
- ปราจรี ประสมศักดิ์. (2553). การประยุกต์ฟuzzyลอจิกสำหรับการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟ  
แบบขนาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชา  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พลสิทธิ์ สานติประพันธ์. (2554). การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน  
ด้วยเทคนิคพีดีบีเปิดยูเอ็มบนแกนดีคิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชา  
วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). ปัญญาเชิงคำนวณ. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี-  
สุรนารี. (1)
- Akagi H., Kanazawa Y., and Nabae A. (1984). Instantaneous Reactive Power  
Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage  
Components. **IEEE Transaction on Industry Applications**. IA-20(3):625-630.
- Akagi H. (1996). New trends in active filters for power conditioning. **IEEE Trans. Ind. Appl.**,  
32(6): 1312–1322.
- Benchaita, L., Saadate, S. and Nia, A.S. (1999). A Comparison of Voltage  
Source and Current Source Shunt Active Filter by Simulation and  
Experimentation. **IEEE Transactions on Power Systems**. 14:837-842.
- Bhende C. N., Mishra S., and Jain S. K. (2006). TS-Fuzzy-Controlled Active Power Filter for  
Load Compensation. **IEEE Transaction on Power Delivery**. 21(3):1459-1465.
- Brozek J.P. (1990). The Effect of Harmonics on Over current Protection Devices. **IEEE  
Conference on Industry Applications Society Annual Meeting**, :1965-1967.
- Chang G.Wand Chen S.K. (2000). An *a-b-c* Reference Frame-Based Control Strategy for the  
Three-phase Four-Wire Shunt Active Power Filter. **IEEE Conference on Harmonics and  
Quality of Power**. 1:26-29.

- Chang G.W., (2002). A New Method for Determining Reference Compensating Currents of Three-Phase Shunt Active Power Filters. **IEEE Journals & Magazines on Power Engineering Review**. :68-70.
- Chang G.W. and Shee T-C. (2002). A Comparative Study of Active Power Filter Reference Compensation Approaches. **IEEE Conference on Power Engineering Society Summer Meeting**. 2:1027-1021.
- Chen C. L., Lin C. E., and Huang C. L. (1994). An Active Filter for Unbalanced Three-phase System Using Synchronous Detection Method. **IEEE Conference on Power Electronics Specialists, PESC '94**. 2:1451-1455.
- Chen Y., Fu B. and Li Q. (2008). Fuzzy Logic Based Auto-modulation of Parameters PI Control for Active Power Filter. **IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation**. :5228-5232.
- Chen D. and Xie S. (2004). Review of the control strategies applied to active power filters. **IEEE Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004)**. :666-670.
- Chengxi L. ,Yuxiang and Shenghua H. (2008). The Development of Active Controllable Energy Feedback Device Based on d-q Model. **IEEE Conference on Electrical Machines and Systems**. :1711-1715.
- Dell'Aquila A., Delvino G., Liserre M., and Zanchetta P. (2000). A New Fuzzy Logic Strategy for Active Power filter. **IEEE Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives**. :392-397.
- Dongmei Y, Qingding G., and Qing H. (2005). A Novel DSP Based Current Controller with Fuzzy Variable-Band Hysteresis for Active Power Filters. **IEEE/PES Conference & Exhibition on Transmission and Distribution**.:1-5.
- EI-Habrouk M. and Darwish M.K. (2001). Design and implementation of a modified Fourier analysis harmonic current computation technique for power active filters using DSPs. **IEE Proc.-Electr. Power Appl**. 148(1):21-28.
- Elmitwally A., Abdelkader S., and Ekateb M. (2000). Performance Evaluation of Fuzzy Controlled Three and Four Wire Shunt Active power Conditioners. **IEEE Conference on Power Engineering Society**. 3:1650-1655.

- Espinoza J.R., Joos G. and Jin H. (1996). Modelling and Implementation of Space Vector PWM Technique Active Filter Applications. **IEEE Workshop on Computers in Power Electronics**.:142-146.
- Fang G., Kwok N. M. and Ha Q. (2008) Automatic Fuzzy Membership Function Tuning Using the Particle Swarm Optimisation. **IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application**. 2:324–328.
- Fei J. and Hou S. (2012). Robust Adaptive Fuzzy Control for Three-Phase Active Power Filter” IEEE 13th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL).:1-6.
- Georgios T., and Georgios A. (2011). Shunt Active Power Filter Control Using Fuzzy Logic Controllers. **IEEE Symposium on Industrial Electronics (ISIE)**. :365-371.
- Glover F. (1989). Tabu search - part i. **ORSA Journal on Computing**, 1:190-206.
- Hayachi Y., Sato N. and Takahashi K. (1991). A Novel Control of a Current Source Active Filter for AC Power System Harmonic Compensation. **IEEE Trans. on Industry App**. 27(2): 380-384.
- Hongdong Y.,Guangkuo S., Lingzhi C.and Hongfeng Z. (2010). DSP-based repetitive control active power filter. **Conference on Future Computer and Communication (ICFCC)**. 1:V1-347-V1-352.
- IEEE std. 519-1992. (1993). **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**.
- Ingram, D.M.E. and Round, S.D. (1997). A Novel Digital Hysteresis Current Controller for an Active Power Filter. **IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems**, 2:744-749.
- Jeong. S-G, and Woo. M-H. (1997). DSP-Based Active Power Filter with Predictive Current Control. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 44: 329-336.
- Jou H-L. (1995). Performance Comparison of the Three-phase Active-Power-Filter Algorithms. **IEE Proc -Gener Transz Dcstrcb**. 142(6): 646-652.
- Jou H-L., Wu J-C. and Wu K-D. (2001). Parallel operation of passive power filter and hybrid power filter for harmonic suppression. **IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution**. 148(1): 8-14.

- Jun L. and Dazhi W. (2009). Study and Simulation of a Novel Hysteresis Current Control Strategy. **IEEE International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation**. :306-309.
- Jianze W., Fenghua P., Qitao W, Yanchao Y. and Du Y. (2004). A Novel Control Method for Shunt Active Power Filters Using SVPWM. **IEEE Conference on Industry Applications**. 1:129-134.
- Kumar K. V., Michael P. A., John J.P. and Kumar S. S. (2010). Simulation and Comparison of SPWM and SVPWM Control for Three Phase Inverter. **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences**. 5(7): 61-74.
- Kumar T.V. and Rao S.S. (2010). Switching State Algorithm for Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM). **IEEE Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010)**. :1-6.
- Kesler M. and Ozdemir E. (2009). Operation of Shunt Active Power Filter Under Unbalanced and Distorted Load Conditions. **IEEE Conference on Electrical and Electronics Engineering(ELECO)**. :I-92 - I-96.
- Kim H-S., Kim T-W. and Choi J-H. (1993). Input Filter Design for Current Source PWM GTO Converter. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'93 – Budapest**. :593-598.
- Lee T-S, Tzeng K-S and Chong M-S. (2006). Fuzzy Iterative Learning Control for Three-Phase Shunt Active Power Filters. **IEEE Symposium on Industrial Electronics**. :882-885.
- Lenwari W., Sumner M. and Zanchetta P. (2006). Design and Analysis of High Performance Current Control for Shunt Active Filters. **IEEE Conference on Power Electronics, Machines and Drives**. :90-95.
- Leonhard W. (1976). Introduction to Control Engineering and Linear control Systems, New Delhi.
- Lin C. E., Chen C. L., and Huang C.L. (1992). Calculating Approach and Implementation for Active Filters in Unbalanced Three-phase System using Synchronous Detection Method. **IEEE Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, Automation, Power Electronics and Motion Control**. 1: 374-380.

- Mahesh K.M., Arindam G., Avinash J., and Hiralal M. S. (2007). A Novel Method of Load Compensation Under Unbalanced and Distorted Voltages. **IEEE Transactions on power Delivery**. 22(1):288-295.
- Mamdani E.H. (1974). Applications of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plant. **Proc. IEEE** .21(12):1585-1588.
- Mendalek N. and Al-Haddad K. (2000). Modeling and Nonlinear Control of Shunt Active Power Filter in the Synchronous Reference Frame. **IEEE Conference on Harmonics and Quality of Power**. 1:30-35.
- Mzhmoum M. and Bruyant N. (2000). DSP based control of shunt active power filters for global or selective harmonics compensation. **IEEE Conference on Harmonics and Quality of Power**. 2:661-666.
- Musa S. Radzi M.A.M. Hisham H. and Abdulwahab N.I. (2014). Fuzzy Logic Controller Based Three Phase Shunt Active Power Filter for Harmonics Reduction. **IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)**. :371-376.
- Narongrit T., Areerak K-L. and Areerak K-N. (2011). Optimal Design of Shunt Active Power Filters Using a Particle Swarm Optimization. **International Review on Modelling & Simulations**. 4: 2871-2878.
- Peng F. Z, and Lai J-S. (1996). Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Power Systems. **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**. 45(1):293-297.
- Prasomsak P., Areerak K-L. and Areerak K-N. (2011). Optimal Fuzzy Logic Controller Design for Shunt Active Power Filters. **International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)**. 4(6): 2858-2870.
- Rahmani S., Mendalek N. and Al-Haddad K. (2010). Experimental Design of a Nonlinear Control Technique for Three-Phase Shunt Active Power Filter”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. :3364-3375.
- Rathnakumar D. LakshmanaPerumal J. and Srinivasan T. (2005). A New Software Implementation of Space Vector PWM. **IEEE conference on Southeast**. :131-136.

- Rice D.C., (1986.) Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics -Their Effect on Power Systems Components. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IA-22(1): pp. 161-177.
- Routimo, M., Salo, M., and Tuusa, H. (2007). Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters. **IEEE Transactions on Power Electronics, Power Electronics**. 22(2): 636-643.
- Santiprapan P., Areerak K-L. and Areerak K-N. (2001). Mathematical Model and Control Strategy on DQ Frame for Shunt Active Power Filtes. **World Academy of Science Engineering and Technology**. 60: 353-361.
- Singh B. and Singh B.N. and Chandra A. (1998). Real Time DSP Based Implementation of a New Control Method of Active Power Filter. **IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering**. 2:794-797.
- Sujitjorn S., Areerak K-L., and Kulwora-wanichpong T. (2007). The DQ Axis With Fourier (DQF) Method for Harmonic Identification. **IEEE Transactions on power Delivery**: 22(1):737-739.
- Taihang D., Yongsheng C., Shuguang S., and Jinwei W. (2009). Design of Active Power Filter Control System Based on DSP. **IEEE Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems**. :585-589.
- Takagi T. and Sugeno M. (1985). Fuzzy Identification of Systems and its Applications to modeling and control. **IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetic**.15:116-132.
- Takeda M., Ikeda K., Teramoto A., and Aritsuka T. (1988). Harmonic Current and Reactive power compensation with an Active filter. **IEEE Conference on Power Electronics Specialists. PESC '88**. 2:1174-1179.
- Thomas, T., Haddad, K., Joos, G. and Jaafari, A. (1998). Design and performance of active power filters. **IEEE Industry Applications Magazine**. 4:38-46.
- Tiyarachakun S., Areerak K-L. and Areerak K-N. (2014). Instantaneous Power Theory with Fourier and Optimal Predictive Controller Design for Shunt Active Power Filter. **Modelling and Simulation in Engineering**. 2014. doi:10.1155/2014/381760.

- Viswanath N. and Kapoor A.K. (2010). Performance Estimation of HCC and SVPWM Current Control Techniques on Shunt Active Power Filters. **IEEE Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES)**. :1-6.
- Wagner V.E., Balda J.C., Griffitki D.C. McEachern A., Baners T.M., Hatmann D.P., Phileggi D.J., Emmanuel A.E., Horton W.F., Reid W.E, Ferraro R.J. and Jewell W.T. (1993). Effects of Harmonic on Equipment. **IEEE Transaction on Power Delivery**. 8(2) :672-680
- Wang L-P, Shi Z-Y, and Yang D-Z. (2010). A Three-phase Active Power Filter Based on the Space Vector Theory. **IEEE Conference on Computer Science & Education**. :1279 - 1282.
- Wu C-J. and Liu G-Y. (1999). Design of Fuzzy Logic Controllers Using Genetic Algorithms. **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics**. 6:104-109.
- Xia L., Taihang D., and Shengxue T. (2011). A Fuzzy logic variable hysteresis band current control technique for three phase shunt active power filter. **IEEE Conference on control, Automation and Systems Engineering (CASE)**. :1-4.
- Yilin Y., Yonghai X. and Xiaoabo L. (2011). Research of improved Iterative DFT method in harmonic current detection. **IEEE Conference on Asia-Pacific Power and Energy Engineering (APPEEC)**. :1-4.
- Yong W., Fuhua Y. and Miao G. (2008). Three-phase Active Power Filter Based on Simplified Space Vector Control. **IEEE Conference on Electrical Machines and Systems, (ICEMS)**. :2008 - 2011.
- Zadeh L.A. (1965). Fuzzy sets. **Information and Control**. 8: 338-353.
- Zadkhash S. and Mokhtari H. (2009). A New Nonlinear Controller for Active Power Filters. **IEEE Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS '09**. :1-6.
- Zhang B., Yi S., and He X. (2000). A Novel Harmonic Current Detection Technique Based on a Generalized dq Coordinate for Active Power Filter and fault Protection of Power System. **IEEE Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM**. :543-547.

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a platform, flanked by two stylized towers or pillars. Below this central emblem is a circular seal containing a gear and a book, with the university's name in Thai script around the perimeter.

ภาคผนวก ก.

โค้ดโปรแกรมการจำลองสถานการณ์แบบจำลองของ  
วงจรรอกำลึงแอกทีฟ



## โค้ดโปรแกรมการจำลองสถานการณ์แบบจำลองของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

### Main function

```

1. clear all
2. tic
3. tsamp = 1e-3;
4. tend = 1;
5. w=2*pi*50;
6. Rf=0.1;
7. Lf=5e-3;
8. Cdc=200e-6;
9. M=1;
10. theta=0; %----Vpcc angle
11. phi=0; %----switching function angle
12. lambda=theta-phi;
13. dsd=sqrt(3/2)*(M/2)*cos(lambda)
14. dsq=sqrt(3/2)*(M/2)*sin(lambda)

15. %////////// ODE solve for APF model //////////
16. %----- Vm=sqrt(2)*220 case -----
17. Vm=sqrt(2)*220;
18. u=Vm;
19. global Rf Lf Cdc w u dsd dsq
20. [t(1:500),x(1:500,:)] = ode23tb('APF_m',[0:tsamp:0.5-tsamp],[zeros(1,3)]);

21. %-----Vm=sqrt(2)*230 case -----
22. Vm=sqrt(2)*230;
23. u=Vm;
24. global u
25. [t(501:1001),x(501:1001,:)] = ode23tb('APF_m',[0.5:tsamp:tend],[x(0.5/tsamp,1:3)]);

26. %----- output model -----
27. y1=x(:,1); %y=Cx+Du; but if C=eye(1)and D=0 then become --> y=x
28. y2=x(:,2);
29. y3=x(:,3);

30. icd=y1;
31. icq=y2;
32. Vdc=y3;
33. %////////// end solve ODE //////////
34. figure(1)
35. plot(t,icd), xlabel('time (s)'), ylabel('i_c_d')
36. figure(2)
37. plot(t,icq), xlabel('time (s)'), ylabel('i_c_q')
38. figure(3)
39. plot(t,Vdc), xlabel('time (s)'), ylabel('V_d_c')
40. toc
41.

```

### Sub function

```

42. function xdot = APF_m(t,x)
43. global Rf Lf Cdc w u dsd dsq

44. A = [-Rf/Lf w dsd/Lf;
45.      -w -Rf/Lf dsq/Lf;
46.      -dsd/Cdc -dsq/Cdc 0];

47. B = [-sqrt(3/2)/Lf;
48.      0;
49.      0];
50. xdot=A*x+B*u;

```

## การอธิบายโค้ดโปรแกรมการจำลองสถานการณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

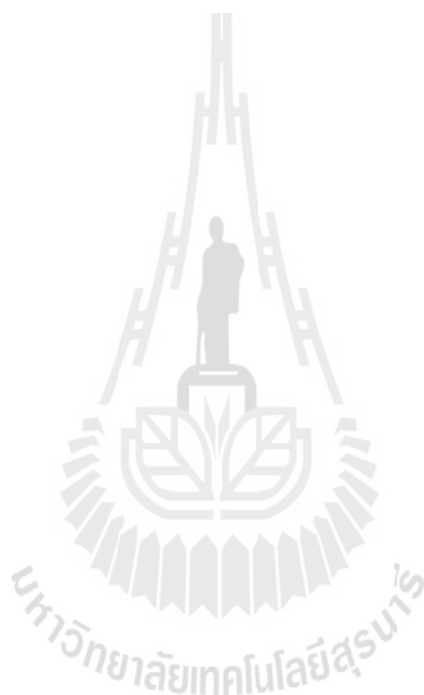
บรรทัดที่ 3 ถึง 13 คือ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลอง

บรรทัดที่ 14 ถึง 24 คือ การแก้สมการสแตจของแบบจำลองโดยใช้คำสั่ง ODE

บรรทัดที่ 25 ถึง 32 คือ เพลทของแบบจำลองวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ( $i_{cd}$ ,  $i_{cq}$ ,  $V_{dc}$ )

บรรทัดที่ 33 ถึง 38 คือ คำสั่งใช้สำหรับการพล็อตรูปกราฟเพลทของแบบจำลอง

บรรทัดที่ 40 ถึง 48 คือ เมตริกซ์ A และ B ของแบบจำลอง





ภาคผนวก ข.

โค้ดโปรแกรมภาษาซีการทดสอบการรับและส่งข้อมูล  
ระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335

## โค้ดโปรแกรมภาษาซีการทดสอบการรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink

### กับบอร์ด eZdsp™ F28335

```
//===== (RTDXTest.c) =====//

//EDIT Copyright 2000-2008 The MathWorks, Inc //
1. #include "target.h"
2. #include <stdio.h>
3. #include <rtdx.h>

4. void RTDXTest(float*in1, float*in2, float*out1, float*out2);    /*function RTDX test*/

5. #define MAX_BUFSIZE 16 /*-- Upper limit on data buffer --*/
6. /*-- define buffers, leave uninitialized, to be supplied by MATLAB --*/
7. float din1[MAX_BUFSIZE];
8. float din2[MAX_BUFSIZE];
9. float dout1[MAX_BUFSIZE];
10. float dout2[MAX_BUFSIZE];

11. int nbuf =1; /*defines actual size, must be less than limit */

12. /*-- defines RTDX channels --*/
13. RTDX_CreateInputChannel (ichan1);    /* Channel from which to receive filter input */
14. RTDX_CreateInputChannel (ichan2);    /* Channel from which to receive filter input */
15. RTDX_CreateOutputChannel(ochan1);    /* Channel to output coefficient updates*/
16. RTDX_CreateOutputChannel(ochan2);    /* Channel to output coefficient updates */

17. /*----- main -----*/
18. void main()
19. {
20.     TARGET_INITIALIZE();    /* Target-specific initialization */

21.     /* Enable channels */
22.     RTDX_enableInput (&ichan1);
23.     RTDX_enableInput (&ichan2);
24.     RTDX_enableOutput(&ochan1);
25.     RTDX_enableOutput(&ochan2);

26.     while (1)
27.     {
28.         /* Read inputs from host */
29.         RTDX_read( &ichan1, din1, nbuf* sizeof(long) );
30.         RTDX_read( &ichan2, din2, nbuf* sizeof(long) );

31.         /* Call function RTDX Test */
32.         RTDXTest(din1, din2,dout1, dout2 );

33.         /* Write outputs to host */
34.         while ( RTDX_writing != NULL )
35.         { /* wait for previous write to complete */
36.             #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
37.                 RTDX_Poll();
38.             #endif
39.         }
40.         RTDX_write( &ochan1, dout1, nbuf* sizeof(long) );

41.         while ( RTDX_writing != NULL )
42.         { /* wait for previous write to complete */
43.             #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
44.                 RTDX_Poll();
45.             #endif
46.         }
47.         RTDX_write( &ochan2, dout2, nbuf* sizeof(long) );
48.     }
49. }
50. /*-----Host and Taget with RTDX comunication -----*/
51. void RTDXTest(float*in1, float*in2,float*out1, float*out2)
```

```

52.     { int t;
53.         for (t = 0; t < nbuf; t++)
54.         {
55.             out1[t] = in1[t] ;
56.             out2[t] = in2[t] ;
57.         }
58.     return;
59. }

```

### การอธิบายโค้ดโปรแกรมภาษาซีของ RTDXTest

บรรทัดที่ 1 ถึง 3 target.h คือ การประกาศไลบรารีสำหรับเรียกใช้งานบอร์ด eZdsp™ F28335 ส่วน RTDX.h คือ การประกาศเรียกใช้ช่องสื่อสารแบบ RTDX และ studio.h คือ การประกาศเรียกใช้ฟังก์ชันพื้นฐานต่าง ๆ ของภาษาซี

บรรทัดที่ 4 คือ การประกาศสร้างฟังก์ชัน RTDXTest

บรรทัดที่ 5 ถึง 10 คือ การประกาศตัวแปรต่าง ๆ สำหรับใช้เก็บค่าข้อมูล

บรรทัดที่ 11 คือ การกำหนดค่าขนาดข้อมูล nbuf เท่ากับ 1

บรรทัดที่ 12 ถึง 16 คือ การกำหนดสร้างช่องอินพุต RTDX ที่ชื่อ ichan1 และ ichan2 และการกำหนดสร้างช่องเอาต์พุต RTDX ที่ชื่อ ochan1 และ ochan 2 สำหรับการรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335

บรรทัดที่ 20 คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นใช้งานของบอร์ด eZdsp™ F28335 ตามฟังก์ชัน TARGET\_INITIALIZE();

บรรทัดที่ 21 ถึง 25 คือ การเปิดใช้งานช่องอินพุต RTDX (ichan1, ichan2) และช่องเอาต์พุต RTDX (ochan1, ochan 2) สำหรับใช้ในการรับส่งข้อมูลผ่านทางช่อง RTDX

บรรทัดที่ 28 ถึง 30 คือ การใช้ฟังก์ชันคำสั่ง RTDX Read เพื่อรับข้อมูลจากโปรแกรม Simulink

บรรทัดที่ 31 ถึง 32 คือ การเรียกใช้งานฟังก์ชัน RTDXTest

บรรทัดที่ 33 ถึง 47 คือ การใช้ฟังก์ชันคำสั่ง RTDX Write เพื่อส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม Simulink

บรรทัดที่ 50 ถึง 59 คือ รายละเอียดการของฟังก์ชัน RTDXTest สำหรับการทดสอบรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 (โดยไม่มีกรปรับแก้ไขข้อมูล)

หมายเหตุ: โค้ดโปรแกรมในข้างต้น ได้ทำการปรับเปลี่ยนแก้ไขมาจาก demo ของบริษัท MathWorks, Inc.



ภาคผนวก ค.

โค้ดโปรแกรมการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับใช้  
ออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีและวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

## โค้ดโปรแกรมการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค้สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมพีชชี

### และวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

```

1. [W]=designfuzzyandAPF(e1,e2,e3,e4,e5,e6,e7,e8,e9,e10,e11,e12,e13,de1,de2,de3,d
    e4,de5,de 6,de7,v1,v2,v3, v4,v5,Vdc, Lf)
2. %=====Receive parameters=====
3. % +++++ parameters of MF error+++++
4. veryneg=[-1+P_1 P_1 P_2];
5. neg=[P_3 P_4 P_5];
6. zero=[P_6 P_7 P_ 8];
7. pos=[P_9 P_10 P_11];
8. verypos=[P_12 P_13 P_13+1];

9. %+++++ parameters of MF error_rate+++++
10. neg_rate=[-1+P_14 P_14 P_15];
11. zero_rate=[P_16 P_17 P_18];
12. pos_rate=[P_19 P_20 P_20+de7];

13. %+++++parameters of MF output+++++
14. verydec=P_21*1000;
15. dec=P_22*1000;
16. cons=P_23*1000;
17. inc=P_24*1000;
18. veryinc=P_25*1000;

19. %+++++APF parameters+++++
20. Vdc = Vdc*1000;
21. Lf =Lf;

22. %=====Read data for calculation=====
23. global icd_ref icq_ref Vpcc_a Vpcc_b Vpcc_c theta V V_tr

24. %== Define initial value parameters of SVPWM and all variable in used ====
25. u_al=0;
26. u_be=0;
27. ta=0;
28. tb=0;
29. to=0;
30. Ta=0;
31. Tb=0;
32. Tc=0;
33. Vref=0;
34. Angle=0;
35. sector=0;
36. Ts=1/(5e3);
37. dT = 1e-5;
38. f = 5000;
39. ica(1)=0;
40. icb(1)=0;
41. icc(1)=0;
42. icd(1)=0;
43. icq(1)=0;
44. e_d(1)=0;
45. e_q(1)=0;
46. de_d(1)=(e_d(1)-0)/dT;
47. de_q(1)=(e_q(1)-0)/dT;
48. w(1)=(theta(1)-0)/dT;

49. %+++++Current control system +++++
50. for k=1:1:2001
51.     if k>1
52.         e_d(k)=((icd_ref(k)-icd(k)));
53.         e_q(k)=((icq_ref(k)-icq(k)));
54.         de_d(k)=(e_d(k)-e_d(k-1))/dT;
55.         de_q(k)=(e_q(k)-e_q(k-1))/dT;
56.         w(k)=(theta(k)-theta(k-1))/dT;
57.     end

```

```

58. %+++++++Fuzzy control+++++++
59. %=====for d axis=====
60. %-----Check error state and find membership value of error-----
61. if e_d(k)<=veryneg(3)
62.     if e_d(k)<=veryneg(2)
63.         mfe1=1;
64.     elseif e_d(k)>veryneg(2)&&e_d(k)<=veryneg(3)
65.         mfe1=(veryneg(3)-e_d(k))/(veryneg(3)-veryneg(2));
66.     end
67. else
68.     mfe1=0;
69. end

70. if e_d(k)<=neg(3)&& e_d(k)>=neg(1)
71.     if e_d(k)==neg(2)
72.         mfe2=1;
73.     elseif e_d(k)>=neg(1)&&e_d(k)<neg(2)
74.         mfe2=(e_d(k)-neg(1))/(neg(2)-neg(1));
75.     elseif e_d(k)>neg(2)&&e_d(k)<=neg(3)
76.         mfe2=(neg(3)-e_d(k))/(neg(3)-neg(2));
77.     end
78. else
79.     mfe2=0;
80. end

81. if e_d(k)<=zero(3)&& e_d(k)>=zero(1)
82.     if e_d(k)==zero(2)
83.         mfe3=1;
84.     elseif e_d(k)>=zero(1)&&e_d(k)<zero(2)
85.         mfe3=(e_d(k)-zero(1))/(zero(2)-zero(1));
86.     elseif e_d(k)>zero(2)&&e_d(k)<=zero(3)
87.         mfe3=(zero(3)-e_d(k))/(zero(3)-zero(2));
88.     end
89. else
90.     mfe3=0;
91. end

92. if e_d(k)<=pos(3)&& e_d(k)>=pos(1)
93.     if e_d(k)==pos(2)
94.         mfe4=1;
95.     elseif e_d(k)>=pos(1)&&e_d(k)<pos(2)
96.         mfe4=(e_d(k)-pos(1))/(pos(2)-pos(1));
97.     elseif e_d(k)>pos(2)&&e_d(k)<=pos(3)
98.         mfe4=(pos(3)-e_d(k))/(pos(3)-pos(2));
99.     end
100. else
101.     mfe4=0;
102. end

103.     if e_d(k)>=verypos(1)
104.     if e_d(k)>=verypos(2)
105.         mfe5=1;
106.     elseif e_d(k)>=verypos(1)&&e_d(k)<verypos(2)
107.         mfe5=(e_d(k)-verypos(1))/(verypos(2)-verypos(1));
108.     end
109.     else
110.     mfe5=0;
111.     end

112. %-----Check error state and find membership value of error_rate -----
113.     if de_d(k)<=neg_rate(3)
114.     if de_d(k)<=neg_rate(2)
115.         mfer1=1;
116.     elseif de_d(k)>neg_rate(2)&&de_d(k)<=neg_rate(3)
117.         mfer1=(neg_rate(3)-de_d(k))/(neg_rate(3)-neg_rate(2));
118.     end
119.     else
120.     mfer1=0;
121.     end

122.     if de_d(k)<=zero_rate(3)&& de_d(k)>=zero_rate(1)
123.     if de_d(k)==zero_rate(2)

```



```

124.             mfer2=1;
125.         elseif de_d(k)>=zero_rate(1)&&de_d(k)<zero_rate(2)
126.             mfer2=(de_d(k)-zero_rate(1))/(zero_rate(2)-zero_rate(1));
127.         elseif de_d(k)>zero_rate(2)&&de_d(k)<=zero_rate(3)
128.             mfer2=(zero_rate(3)-de_d(k))/(zero_rate(3)-zero_rate(2));
129.         end
130.     else
131.         mfer2=0;
132.     end

133.         if de_d(k) >=pos_rate(1)
134.         if de_d(k)>=pos_rate(2)
135.             mfer3=1;
136.         elseif de_d(k)>=pos_rate(1)&&de_d(k)<pos_rate(2)
137.             mfer3=(de_d(k)-pos_rate(1))/(pos_rate(2)-pos_rate(1));
138.         end
139.     else
140.         mfer3=0;
141.     end

142. %-----Fuzzy Rule (7) for compensating current control-----
143. %rule 1
144.     if mfe1>0
145.         mf1=mfe1;
146.         V1=verydec*mfe1;
147.     else
148.         mf1=0;
149.         V1=0;
150.     end

151. %rule 2
152.     if mfe2>0
153.         mf2=mfe2;
154.         V2=dec*mfe2;
155.     else
156.         mf2=0;
157.         V2=0;
158.     end

159. %rule 3
160.     if mfe3>0 && mfer1>0
161.         if mfe3<=mfer1
162.             mf3=mfe3;
163.         else
164.             mf3=mfer1;
165.         end
166.         V7=inc*mf3;
167.     else
168.         mf3=0;
169.         V3=0;
170.     end

171. %rule 4
172.     if mfe3>0 && mfer2>0
173.         if mfe3<=mfer2
174.             mf4=mfe3;
175.         else
176.             mf4=mfer2;
177.         end
178.         V4=cons*mf4;
179.     else
180.         mf4=0;
181.         V4=0;
182.     end

183. %rule 5
184.     if mfe3>0 && mfer3>0
185.         if mfe3<=mfer3
186.             mf5=mfe3;
187.         else
188.             mf5=mfer3;
189.         end

```

```

190.             V5=dec*mf5;
191.     else
192.     mf5=0;
193.     V5=0;
194.     end

195. %rule 6
196.     if mfe4>0
197.         mf6=mfe4;
198.         V6=inc*mf6;
199.     else
200.         mf6=0;
201.         V6=0;
202.     end

203. %rule 7
204.     if mfe5>0
205.         mf7=mfe5;
206.         V7=veryinc*mf7;
207.     else
208.         mf7=0;
209.         V7=0;
210.     end

211. % -----deFuzzification// output calculate weighted average(WA)-----
212.     num=(V1+V2+V3+V4+V5+V6+V7);
213.     den=(mf1+mf2+mf3+mf4+mf5+mf6+mf7);
214.     if den==0
215.         den=1e-12;
216.     end
217.     udl=num/den;

218. %=====for q axis=====
219. %-----Check error state and find membership value of error-----
220.     if e_q(k)<=veryneg(3)
221.     if e_q(k)<=veryneg(2)
222.         mfe1=1;
223.     elseif e_q(k)>veryneg(2)&&e_q(k)<=veryneg(3)
224.         mfe1=(veryneg(3)-e_q(k))/(veryneg(3)-veryneg(2));
225.     end
226.     else
227.     mfe1=0;
228.     end

229.     if e_q(k)<=neg(3)&& e_q(k)>=neg(1)
230.     if e_q(k)==neg(2)
231.         mfe2=1;
232.     elseif e_q(k)>=neg(1)&&e_q(k)<neg(2)
233.         mfe2=(e_q(k)-neg(1))/(neg(2)-neg(1));
234.     elseif e_q(k)>neg(2)&&e_q(k)<=neg(3)
235.         mfe2=(neg(3)-e_q(k))/(neg(3)-neg(2));
236.     end
237.     else
238.     mfe2=0;
239.     end

240.     if e_q(k)<=zero(3)&& e_q(k)>=zero(1)
241.     if e_q(k)==zero(2)
242.         mfe3=1;
243.     elseif e_q(k)>=zero(1)&&e_q(k)<zero(2)
244.         mfe3=(e_q(k)-zero(1))/(zero(2)-zero(1));
245.     elseif e_q(k)>zero(2)&&e_q(k)<=zero(3)
246.         mfe3=(zero(3)-e_q(k))/(zero(3)-zero(2));
247.     end
248.     else
249.     mfe3=0;
250.     end

251.     if e_q(k)<=pos(3)&& e_q(k)>=pos(1)
252.     if e_q(k)==pos(2)
253.         mfe4=1;
254.     elseif e_q(k)>=pos(1)&&e_q(k)<pos(2)

```

```

255.             mfe4=(e_q(k)-pos(1))/(pos(2)-pos(1));
256.         elseif e_q(k)>pos(2)&&e_q(k)<=pos(3)
257.             mfe4=(pos(3)-e_q(k))/(pos(3)-pos(2));
258.         end
259.         else
260.             mfe4=0;
261.         end

262.     if e_q(k)>=verypos(1)
263.         if e_q(k)>=verypos(2)
264.             mfe5=1;
265.         elseif e_q(k)>=verypos(1)&&e_q(k)<verypos(2)
266.             mfe5=(e_q(k)-verypos(1))/(verypos(2)-verypos(1));
267.         end
268.     else
269.         mfe5=0;
270.     end

271. %-----Check error state and find membership value of error_rate-----
272.     if de_q(k)<=neg_rate(3)
273.         if de_q(k)<=neg_rate(2)
274.             mfer1=1;
275.         elseif de_q(k)>neg_rate(2)&&de_q(k)<=neg_rate(3)
276.             mfer1=(neg_rate(3)-de_q(k))/(neg_rate(3)-neg_rate(2));
277.         end
278.     else
279.         mfer1=0;
280.     end

281.     if de_q(k)<=zero_rate(3)&& de_q(k)>=zero_rate(1)
282.         if de_q(k)==zero_rate(2)
283.             mfer2=1;
284.         elseif de_q(k)>=zero_rate(1)&&de_q(k)<zero_rate(2)
285.             mfer2=(de_q(k)-zero_rate(1))/(zero_rate(2)-zero_rate(1));
286.         elseif de_q(k)>zero_rate(2)&&de_q(k)<=zero_rate(3)
287.             mfer2=(zero_rate(3)-de_q(k))/(zero_rate(3)-zero_rate(2));
288.         end
289.     else
290.         mfer2=0;
291.     end

292.     if de_q(k) >=pos_rate(1)
293.         if de_q(k)>=pos_rate(2)
294.             mfer3=1;
295.         elseif de_q(k)>=pos_rate(1)&&de_q(k)<pos_rate(2)
296.             mfer3=(de_q(k)-pos_rate(1))/(pos_rate(2)-pos_rate(1));
297.         end
298.     else
299.         mfer3=0;
300.     end

301. %-----Fuzzy Rule (7) for compensating current control-----
302. %rule 1
303.     if mfe1>0
304.         mf1=mfe1;
305.         V1=verydec*mf1;
306.     else
307.         mf1=0;
308.         V1=0;
309.     end

310. %rule 2
311.     if mfe2>0
312.         mf2=mfe2;
313.         V2=dec*mf2;
314.     else
315.         mf2=0;
316.         V2=0;
317.     end

318. %rule 3
319.     if mfe3>0 && mfer1>0

```

```

320.         if mfe3<=mfer1
321.             mf3=mfe3;
322.         else
323.             mf3=mfer1;
324.         end
325.             V3=inc*mf3;
326.         else
327.             mf3=0;
328.             V3=0;
329.         end

330.     %rule 4
331.         if mfe3>0 && mfer2>0
332.             if mfe3<=mfer2
333.                 mf4=mfe3;
334.             else
335.                 mf4=mfer2;
336.             end
337.                 V4=cons*mf4;
338.         else
339.             mf4=0;
340.             V4=0;
341.         end

342.     %rule 5
343.         if mfe3>0 && mfer3>0
344.             if mfe3<=mfer3
345.                 mf5=mfe3;
346.             else
347.                 mf5=mfer3;
348.             end
349.                 V5=dec*mf5;
350.         else
351.             mf5=0;
352.             V5=0;
353.         end

354.     %rule 6
355.         if mfe4>0
356.             mf6=mfe4;
357.             V6=inc*mf6;
358.         else
359.             mf6=0;
360.             V6=0;
361.         end

362.     %rule 7
363.         if mfe5>0
364.             mf7=mfe5;
365.             V7=veryinc*mf7;
366.         else
367.             mf7=0;
368.             V7=0;
369.         end

370.     % -----Defuzzification output calculate weighted average(WA)-----
371.         num=(V1+V2+V3+V4+V5+V6+V7);
372.         den=(mf1+mf2+mf3+mf4+mf5+mf6+mf7);
373.         if den==0
374.             den=1e-12;
375.         end
376.         uq=num/den;

377.     %+++++++ ud and uq calculation (SAPF control strategy)+++++++
378.     ud = -(icq(k)*Lf*w(k))+V(k) + udl;
379.     uq = (icd(k)*Lf*w(k))+ uq1;

380.     %+++++++SVPWM technique+++++++
381.     %--alpha-beta transform-
382.     u_al=ud*cos(theta(k))-uq*sin(theta(k));
383.     u_be=ud*sin(theta(k))+uq*cos(theta(k));

```

```

384.     %step 1 Vref-angle calculation and Sector Identification
385.     Vref=sqrt(u_al^2+u_be^2);
386.     Angle=atan2(u_be,u_al);

387.     if Angle>0&&Angle<=pi/3
388.         sector=1;
389.     elseif Angle>pi/3&&Angle<=2*pi/3
390.         sector=2;
391.     elseif Angle>2*pi/3&&Angle<=pi
392.         sector=3;
393.     elseif Angle>-pi&&Angle<=-2*pi/3
394.         sector=4;
395.     elseif Angle>-2*pi/3&&Angle<=-pi/3
396.         sector=5;
397.     elseif Angle>-pi/3&&Angle<=0
398.         sector=6;
399.     end

400.     %step 2 Calculate the switching time duration ta tb and tc of each sector
401.     m=sqrt(2)*Ts*Vref/Vdc;
402.     ta=m*(sin(sector*pi/3)*cos(Angle)-cos(sector*pi/3)*sin(Angle));
403.     tb=m*(cos((sector-1)*pi/3)*sin(Angle)-sin((sector-1)*pi/3)*cos(Angle));
404.     to=Ts-(ta+tb);

405.     %step 3 calculate duty time Ta, Tb, Tc,
406.     if sector==1
407.         Ta=2*(ta/2+tb/2)+to/2;
408.         Tb=to/2;
409.         Tc=2*(tb/2)+to/2;
410.     elseif sector==2
411.         Ta=2*(ta/2)+to/2;
412.         Tb=to/2;
413.         Tc=2*(ta/2+tb/2)+to/2;
414.     elseif sector==3
415.         Ta=to/2;
416.         Tb=2*(tb/2)+to/2;
417.         Tc=2*(ta/2+tb/2)+to/2;
418.     elseif sector==4
419.         Ta=to/2;
420.         Tb=2*(ta/2+tb/2)+to/2;
421.         Tc=2*(ta/2)+to/2;
422.     elseif sector==5
423.         Ta=2*(tb/2)+to/2;
424.         Tb=2*(ta/2+tb/2)+to/2;
425.         Tc=to/2;
426.     elseif sector==6
427.         Ta=2*(ta/2+tb/2)+to/2;
428.         Tb=2*(ta/2)+to/2;
429.         Tc=to/2;
430.     end
431.         Ta=Ta*50000;
432.         Tb=Tb*50000;
433.         Tc=Tc*50000;
434.

435.     % step 4 compare Ta,Tb,Tc with Triangular carier
436.     if Ta>= V_tr(k)
437.         VaN = 1;
438.     else
439.         VaN = 0;
440.     end
441.     if Tb>= V_tr(k)
442.         VbN = 1;
443.     else
444.         VbN = 0;
445.     end
446.     if Tc>= V_tr(k)
447.         VcN = 1;
448.     else
449.         VcN = 0;
450.     end

```

```

451. %+++++ 3-phase voltage APF calculation+++++
452. uca(k+1)=Vdc*(1/3)*(2*VaN-VbN-VcN);
453. ucb(k+1)=Vdc*(1/3)*(2*VbN-VaN-VcN);
454. ucc(k+1)=Vdc*(1/3)*(2*VcN-VaN-VbN);

455. %+++++ 3-phase compensating Current calculation +++++
456. ica(k+1) = (uca(k+1)-Vpcc_a(k+1))/Lf*dT +ica(k);
457. icb(k+1) = (ucb(k+1)-Vpcc_b(k+1))/Lf*dT +icb(k);
458. icc(k+1) = (ucc(k+1)-Vpcc_c(k+1))/Lf*dT +icc(k);

459. %+++++ dq axis compensating Current calculation+++++
460. ic_al(k+1) = sqrt(2/3)*((1*ica(k+1))+(-0.5*icb(k+1))+(-0.5*icc(k+1)));
461. ic_be(k+1) = sqrt(2/3)*((0*ica(k+1))+
462. ((-sqrt(3)/2)*icb(k+1))+((sqrt(3)/2)*icc(k+1)));
463. icd(k+1) = ((cos(theta(k))*ic_al(k+1))+sin(theta(k))*ic_be(k+1));
464. icq(k+1) = (-sin(theta(k))*ic_al(k+1))+cos(theta(k))*ic_be(k+1);

465. k=k+1;
466. end %end for loop

467. %+++++ Cost value (W) calculation+++++
468. e_d1=sqrt((e_d).^2);
469. error_d1=sum(e_d1)/2001;
470. e_q1=sqrt((e_q).^2);
471. error_q1=sum(e_q1)/2001;
472. W=sqrt(((error_d1)^2+(0.1962*error_q1)^2)/2);
    %W=sqrt(((error_d1)^2+(error_q1)^2)/2);
473. return

```

## การอธิบายโค้ดโปรแกรมฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบฟuzzy และวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

บรรทัดที่ 2 ถึง 21 คือ การรับค่าอินพุตค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหาได้แก่ ค่าจุดตำแหน่ง ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมแบบฟuzzy ทั้ง 25 ค่าพารามิเตอร์ ( $P_1$ - $P_{25}$ ) และค่าพารามิเตอร์  $V_{dc}$  และค่า  $L_f$  ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

บรรทัดที่ 22 ถึง 23 คือ การโหลดข้อมูลที่จำเป็นต้องการใช้ในการคำนวณ ได้แก่ ค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย ( $i_{c(dq)}^*$ ) ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ จุด PCC ( $v_{pcc(abc)}$ ) ค่ามุมสำหรับการแปลงแกนดีคิว ( $\theta_{pcc}$ ) และค่าขนาดแรงดัน  $V_{pcc}$  และสัญญาณสามเหลี่ยม  $V_{tr}$

บรรทัดที่ 24 ถึง 48 คือ การกำหนดค่าเริ่มต้น (initial value setup (for k=0)) ของตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในโปรแกรมการคำนวณ โดยในที่นี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้ทุกค่าพารามิเตอร์มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0

บรรทัดที่ 51 ถึง 57 คือ การคำนวณค่า error ( $e_{id}$ ,  $e_{iq}$ ) และค่า error rate ( $\frac{de_{id}}{dt}$ ,  $\frac{de_{iq}}{dt}$ ) ที่ค่า k ใด ๆ

บรรทัดที่ 58 ถึง 376 คือ กระบวนการควบคุมแบบฟuzzyที่ให้เอาต์พุตเป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $u_{Ld}$ ,  $u_{Lq}$

บรรทัดที่ 377 ถึง 379 คือ การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าของวงจรรอกกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว ( $u_{c(dq)}$ ) จากกระบวนการควบคุมวงจรรอกกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว

บรรทัดที่ 380 ถึง 454 คือ การคำนวณค่าฟังก์ชันการสวิตช์บนแกนสามเฟส ( $d_{s(abc)}$ ) ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM และคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟส

บรรทัดที่ 455 ถึง 458 คือ คำนวณค่ากระแสชดเชยบนแกนสามเฟส ( $i_{c(abc)}$ ) การประมาณค่า  $i_{c(abc)}$  ด้วยไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference) แบบถอยหลัง (backward) แต่มีการเลื่อนข้อมูลไปข้างหน้า 1 ตำแหน่งเพื่อการโปรแกรม

บรรทัดที่ 459 ถึง 464 คือ คำนวณแปลงค่ากระแสชดเชยบนแกนสามเฟส ( $i_{c(abc)}$ ) กลับไปอยู่บนแกนดีคิว ( $i_{c(dq)}$ ) โดยใช้สมการแปลงแกนแบบปาร์ค

บรรทัดที่ 467 ถึง 472 คือ การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน  $W$  หรือค่า cost value สำหรับการค้นหา หลังจาก  $k=2001$  (การโปรแกรมใน Matlab  $k=1:2001$ )





ภาคผนวก ง.

โค้ดโปรแกรมภาษาซีการควบคุมของวงจรรอกำลังแอกทีฟ



## โค้ดโปรแกรมภาษาซีการควบคุมของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

```
//===== (APF control.c) =====//
1. //#####
2. // APF control program
3. // $Release Date: July 6, 2012 $
4. //#####

5. #include "DSP2833x_Device.h" // Device Headerfile and Examples Include File
6. #include "DSP2833x_Examples.h"
7. #include <stdio.h>
8. #include <stdlib.h>
9. #include "math.h"
10. #include "IQmathLib.h"
11. #include "svgen_dq.h"

12. // ADC start parameters
13. #if (CPU_FRQ_150MHZ) // Default - 150 MHz SYSCLKOUT
14. #define ADC_MODCLK 0x3 // HSPCLK = SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2 = 150/(2*3)
//= 25.0 MHz
15. #endif
16. //if (CPU_FRQ_100MHZ)
17. // #define ADC_MODCLK 0x2 // HSPCLK = SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2 = //100/(2*2) = 25.0 MHz
18. //endif
19. #define ADC_CKPS 0x0 // ADC module clock = HSPCLK/1 = 25.5MHz/(1) = 25.0 MHz
20. #define ADC_SHCLK 0x1 // S/H width in ADC module periods = 2 ADC cycle
21. //define AVG 1000 // Average sample limit
22. //define ZOFFSET 0x00 // Average Zero offset
23. //define BUF_SIZE 1024 // Sample buffer size
24. #define N 625
25. int32 sinDATA[401]={0,157,314,471,628,784,941,1097,1253,1408,1564,1718,1873,2027,2180,
26. 2333,2486,2637,2789,2939,3089,3238,3386,3533,3679,3825,3970,4113,4256,4397,4538,4677,4
27. 815,4952,5088,5223,5356,5488,5618,5748,5875,6002,6126,6250,6372,6492,6610,6727,6843,69
28. 56,7068,7178,7287,7393,7498,7601,7702,7801,7899,7994,8087,8179,8268,8355,8441,8524,860
29. 5,8684,8760,8835,8908,8978,9046,9112,9175,9237,9296,9352,9407,9459,9509,9556,9601,9644
30. ,9684,9722,9758,9791,9822,9850,9876,9899,9920,9939,9955,9969,9980,9989,9995,9999,10000
31. ,9999,9995,9989,9981,9970,9956,9941,9922,9901,9878,9853,9825,9794,9761,9726,9688,9648,
32. 9606,9561,9514,9464,9412,9358,9301,9243,9182,9118,9053,8985,8915,8843,8768,8692,8613,
33. 8532,8449,8364,8277,8188,8097,8004,7908,7811,7712,7612,7509,7404,7298,7190,7080,6968,
34. 6854,6739,6622,6504,6384,6262,6139,6014,5888,5761,5631,5501,5369,5236,5102,4966,4829,
35. 4691,4552,4412,4270,4128,3984,3840,3694,3548,3401,3253,3104,2954,2804,2653,2501,2349,
36. 2196,2042,1889,1734,1579,1424,1268,1113,956,800,643,487,330,173,16,-141,-298,-455,-612,-
37. 768,-925,-1081,-1237,-1393,-1548,-1703,-1857,-2011,-2165,-2318,-2470,-2622,-2773,-2924,-
38. 3074,-3223,-3371,-3518,-3665,-3810,-3955,-4099,-4241,-4383,-4524,-4663,-4801,-4938,-5074,-
39. 5209,-5342,-5474,-5605,-5734,-5862,-5989,-6114,-6237,-6359,-6480,-6598,-6716,-6831,-6945,-
40. 7057,-7167,-7276,-7383,-7488,-7591,-7692,-7791,-7889,-7984,-8078,-8170,-8259,-8347,-8432,-
41. 8515,-8597,-8676,-8753,-8828,-8900,-8971,-9039,-9105,-9169,-9230,-9290,-9347,-9401,-9454,-
42. 9504,-9551,-9597,-9640,-9680,-9718,-9754,-9788,-9819,-9847,-9873,-9897,-9918,-9937,-9953,-
43. 9967,-9979,-9988,-9994,-9998,-10000,-9999,-9996,-9990,-9982,-9971,-9958,-9942,-9924,-
44. -9904,-9881,-9855,-9827,-9797,-9765,-9730,-9692,-9652,-9610,-9565,-9518,-9469,-9417,
45. -9364,-9307,-9249,-9188,-9125,-9059,-8992,-8922,-8850,-8776,-8699,-8621,-8540,-8458,
46. -8373,-8286,-8197,-8106,-8013,-7918,-7821,-7723,-7622,-7519,-7415,-7309,-7201,-7091,
47. -6979,-6866,-6751,-6634,-6516,-6396,-6275,-6152,-6027,-5901,-5774,-5645,-5514,-5383,
48. -5250,-5115,-4980,-4843,-4705,-4566,-4426,-4285,-4142,-3999,-3854,-3709,-3563,-3416,
49. -3268,-3119,-2969,-2819,-2668,-2517,-2364,-2211,-2058,-1904,-1750,-1595,-1440,-1284,
50. -1128,-972,-816,-659,-503,-346,-189,-32
51. };
52. int32 cosDATA[401]={10000,9999,9995,9989,9980,9969,9956,9940,9921,9900,9877,9851,
53. 9823,9792,9759,9724,9686,9646,9603,9558,9511,9461,9409,9355,9298,9240,9178,9115,9049,
54. 8981,8911,8839,8764,8688,8609,8528,8445,8360,8273,8183,8092,7999,7904,7806,7707,7606,
55. 7504,7399,7292,7184,7074,6962,6848,6733,6616,6498,6378,6256,6133,6008,5882,5754,5625,
56. 5494,5363,5229,5095,4959,4822,4684,4545,4404,4263,4120,3977,3832,3687,3540,3393,3245,
57. 3096,2947,2796,2645,2493,2341,2188,2035,1881,1726,1571,1416,1261,1105,949,792,636,479,
58. 322,165,8,-149,-306,-463,-620,-776,-933,-1089,-1245,-1400,-1556,-1711,-1865,-2019,-2173,
59. -2326,-2478,-2630,-2781,-2931,-3081,-3230,-3378,-3526,-3672,-3818,-3962,-4106,-4249,
60. -4390,-4531,-4670,-4808,-4945,-5081,-5216,-5349,-5481,-5612,-5741,-5869,-5995,-6120,
61. -6244,-6365,-6486,-6604,-6721,-6837,-6951,-7063,-7173,-7281,-7388,-7493,-7596,-7697,
62. -7796,-7894,-7989,-8083,-8174,-8264,-8351,-8436,-8520,-8601,-8680,-8757,-8831,-8904,
63. -8974,-9042,-9108,-9172,-9233,-9293,-9349,-9404,-9456,-9506,-9554,-9599,-9642,-9682,
```

```

64. -9720,-9756,-9789,-9820,-9848,-9875,-9898,-9919,-9938,-9954,-9968,-9979,-9988,-9995,
65. -9999,-10000,-9999,-9996,-9990,-9981,-9970,-9957,-9941,-9923,-9903,-9879,-9854,-9826,
66. -9796,-9763,-9728,-9690,-9650,-9608,-9563,-9516,-9467,-9415,-9361,-9304,-9246,-9185,
67. -9121,-9056,-8988,-8918,-8846,-8772,-8695,-8617,-8536,-8453,-8368,-8281,-8192,-8101,
68. -8008,-7913,-7816,-7718,-7617,-7514,-7410,-7303,-7195,-7085,-6973,-6860,-6745,-6628,
69. -6510,-6390,-6268,-6145,-6021,-5895,-5767,-5638,-5508,-5376,-5243,-5109,-4973,-4836,
70. -4698,-4559,-4419,-4277,-4135,-3991,-3847,-3702,-3555,-3408,-3260,-3111,-2962,-2811,
71. -2660,-2509,-2357,-2204,-2050,-1896,-1742,-1587,-1432,-1276,-1121,-964,-808,-651,-495,
72. -338,-181,-24,133,290,447,604,760,917,1073,1229,1385,1540,1695,1849,2003,2157,2310,
73. 2463,2614,2766,2916,3066,3215,3363,3511,3657,3803,3948,4091,4234,4376,4516,4656,4794,
74. 4932,5068,5202,5336,5468,5599,5728,5856,5982,6108,6231,6353,6474,6592,6710,6825,6939,
75. 7051,7162,7270,7377,7482,7586,7687,7786,7884,7980,8073,8165,8255,8342,8428,8511,8593,
76. 8672,8749,8824,8897,8967,9036,9102,9166,9227,9287,9344,9399,9451,9501,9549,9594,9637,
77. 9678,9716,9752,9786,9817,9846,9872,9896,9917,9936,9953,9967,9978,9987,9994,9998,10000
78. };

79. // Prototype statements for functions found within this file.
80. //interrupt void cpu_timer0_isr(void);
81. void delay_loop(void);
82. void Gpio_select(void);
83. void DACport(int16 kkk,int Chan);
84. void CalProgram(void);
85. void Fuzzy_controller(int32 e, int32 er);
86. void Auxiliary_fuzzy(int32 E);
87. void sqrt_fun(int32 srt);
88. void initialSWFA(int32 Pac,int16 k);
89. void SWFA(int32 Pac,int16 j);
90. void clake_int(int32 x, int32 y,int32 z);
91. void park_int(int32 Al, int32 Be,int16 index);
92. void ipark_int(int32 d, int32 q,int16 index);
93. void SDF_HD(int32 va, int32 vb, int32 vc,int32 iLa, int32 iLb, int32 iLc);
94. void PI_controller_V(int32 Error_Vdc);
95. void PI_controller_I(int32 Error_I);
96. void PLL(int32 va, int32 vb, int32 vc);
97. // Global parameters and variables//
98. int16 t,i,k=0,j=0,kkk,index=0,index_1,counter=0;
99. int32 adc_0,adc_1, adc_2, adc_3, adc_4, adc_5, adc_6, adc_7, adc_8, adc_9;
100. int32 va,vb,vc,iLa,iLb,iLc;
101. int32 isa,isb,isc,ica,icb,icc,ica_ref,icb_ref,icc_ref;
102. int32 icd_ref,icq_ref,icd,icq,ed_old=0,eq_old=0,ed,eq;
103. int32 Al,Be,BA,x,y,z,d,q,Vd,Vq;
104. int32 theta,C,tann;
105. int32 Vpcc_dq=173205,L=18,Ud,Uq;
106. int32 Pac,Pdc,A1d,And=0,Ad[625];
107. //Fuzzy parameters and variables//
108. int32 e,er;
109. int32 mfe1,mfe2,mfe3,mfe4,mfe5,mfer1,mfer2,mfer3,erd,erq;
110. int32 mf1,mf2,mf3,mf4,mf5,mf6,mf7;
111. int32 V,V1,V2,V3,V4,V5,V6,V7,num,den;
112. /**Fuzzy for 3 A peak load current
113. int32 P_1=-70,P_2=-35,P_3=-70,P_4=-35,P_5=0,P_6=-35,
114. P_7=0,P_8=35,P_9=0,P_10=35,P_11=70,P_12=35,P_13=70;
115. int32 P_14=-10,P_15=0,P_16=-10,P_17=0,P_18=10,P_19=0,P_20=10;
116. int32 P_21=-215000,P_22=-107500,P_23=0,P_24=107500,P_25=215000;
117. /**Fuzzy for 4 A peak load current
118. //int32 P_1=-93,P_2=-46,P_3=-93,P_4=-46,P_5=0,P_6=-46,
119. P_7=0,P_8=46,P_9=0,P_10=46,P_11=93,P_12=46,P_13=93;
120. //int32 P_14=-10,P_15=0,P_16=-10,P_17=0,P_18=10,P_19=0,P_20=10;
121. //int32 P_21=-280000,P_22=-140000,P_23=0,P_24=140000,P_25=280000;
122. /**Fuzzy for 2 A peak load current
123. //int32 P_1=-45,P_2=-22,P_3=-45,P_4=-22,P_5=0,P_6=-22,
124. P_7=0,P_8=22,P_9=0,P_10=22,P_11=45,P_12=22,P_13=45;
125. //int32 P_14=-10,P_15=0,P_16=-10,P_17=0,P_18=10,P_19=0,P_20=10;
126. //int32 P_21=-290000,P_22=-145000,P_23=0,P_24=145000,P_25=290000;
127. // Auxiliary fuzzy parameters and variables//
128. int32 Q_1=0,Q_2=175,Q_3=0,Q_4=175,Q_5=350,Q_6=175,Q_7=350,Q_8=525,Q_9=350,
129. Q_10=525,Q_11=700,Q_12=525,Q_13=700;
130. int32 Q_14=1000,Q_15=1250,Q_16=1500,Q_17=1725,Q_18=2000;
131. int32 E,Ed,Eq,ab_ed=0,ab_eq=0,srt,X;
132. int32 K,k1,k2,k3,k4,k5,Kd=100,Kq=100;
133. //PI parameters and variables for Vdc loop//
134. int32 Ui_old=0,Ui_new,Uk,Ui,ui,Idv=0;

```

```

135. int32 Vdc_ref=3600,Vdc,Error_Vdc;
136. //PI parameters and variables for current loop//
137. int32 Kpi=399,Kii=4440000;
138. int32 Error_I,Ui_oldI=0,Ui_newI,UkI,UiI,uiI;
139. //SVPWM parameters and variables//
140. SVGENDQ svgen_dq = SVGENDQ_DEFAULTS;
141. int32 Ta,Tb,Tc;
142. //PLL parameters and variables //
143. int32 v_al,v_be,vvq,Error_vq;
144. int32 UUk,UUi_new,UUi_old=0,zeta_old=0,omega,zeta_new,theta,theta_old=0,theta_new,w;

145. void main(void)
146. {
147. // Step 1. Initialize System Control:
148. // PLL, WatchDog, enable Peripheral Clocks
149. // This example function is found in the DSP2833x_SysCtrl.c file.
150. InitSysCtrl();
151. // Specific clock setting for this example:
152. EALLOW;
153. SysCtrlRegs.HISPCP.all = ADC_MODCLK; // HSPCLK = SYSCLKOUT/ADC_MODCLK
154. EDIS;
155. // Step 2. Initialize GPIO:
156. // This example function is found in the DSP2833x_Gpio.c file and
157. // illustrates how to set the GPIO to it's default state.
158. // InitGpio(); // Skipped for this example
159. // For this example use the following configuration:
160. Gpio_select();
161. // Step 3. Clear all interrupts and initialize PIE vector table:
162. // Disable CPU interrupts
163. DINT;

164. // Initialize the PIE control registers to their default state.
165. // The default state is all PIE interrupts disabled and flags
166. // are cleared.
167. // This function is found in the DSP2833x_PieCtrl.c file.
168. InitPieCtrl();
169. // Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
170. IER = 0x0000;
171. IFR = 0x0000;
172. // Initialize the PIE vector table with pointers to the shell Interrupt
173. // Service Routines (ISR).
174. // This will populate the entire table, even if the interrupt
175. // is not used in this example. This is useful for debug purposes.
176. // The shell ISR routines are found in DSP2833x_DefaultIsr.c.
177. // This function is found in DSP2833x_PieVect.c.
178. InitPieVectTable();
179. // Interrupts that are used in this example are re-mapped to
180. // ISR functions found within this file.
181. // EALLOW; // This is needed to write to EALLOW protected registers
182. // PieVectTable.TINT0 = &cpu_timer0_isr;
183. // EDIS; // This is needed to disable write to EALLOW protected registers
184. // Step 4. Initialize the Device Peripheral. This function can be
185. // found in DSP2833x_CpuTimers.c
186. // InitCpuTimers(); // For this example, only initialize the Cpu Timers
187. // Configure CPU-Timer 0, 1, and 2 to interrupt every second:
188. // 150MHz CPU Freq, 1 second Period (in uSeconds)
189. // ConfigCpuTimer(&CpuTimer0, 150, 100000);
190. // Initialize all the Device Peripherals:
191. // This function is found in DSP2833x_InitPeripherals.c
192. // InitPeripherals(); // Not required for this example
193. InitAdc(); // For this example, init the ADC
194. // Specific ADC setup for this example:
195. AdcRegs.ADCCTRL1.bit.ACQ_PS = ADC_SHCLK; // Sequential mode: Sample rate = 1/[(2+ACQ_PS)*ADC clock in
ns]
196. // = 1/(3*40ns) = 8.3MHz (for 150 MHz SYSCLKOUT)
197. // = 1/(3*80ns) = 4.17MHz (for 100 MHz SYSCLKOUT)
198. // If Simultaneous mode enabled: Sample rate = 1/[(3+ACQ_PS)*ADC clock in ns]

199. AdcRegs.ADCCTRL1.bit.SEQ_CASC = 1; // 1 Cascaded mode
200. AdcRegs.ADCCTRL1.bit.CONT_RUN = 1; // Setup continuous run
201. AdcRegs.ADCCTRL1.bit.SEQ_OVRD = 1; // Enable Sequencer override feature
202. AdcRegs.ADCCTRL2.all = 0x2000;

```

```

203. AdcRegs.ADCCTRL3.bit.ADCCLKPS = ADC_CKPS;
204. AdcRegs.ADCMAXCONV.bit.MAX_CONV1=0xf;
205. AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; //A0
206. AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; //A1
207. AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x2; //A2
208. AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 0x3; //A3
209. AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV04 = 0x4; //A4
210. AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV05 = 0x5; //A5
211. AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV06 = 0x6; //A6
212. AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV07 = 0x7; //A7
213. AdcRegs.ADCCHSELSEQ3.bit.CONV08 = 0x8; //B0
214. AdcRegs.ADCCHSELSEQ3.bit.CONV09 = 0x9; //B1
215. AdcRegs.ADCCHSELSEQ3.bit.CONV10 = 0xA; //B2
216. AdcRegs.ADCCHSELSEQ3.bit.CONV11 = 0xB; //B3
217. AdcRegs.ADCCHSELSEQ4.bit.CONV12 = 0xC; //B4
218. AdcRegs.ADCCHSELSEQ4.bit.CONV13 = 0xD; //B5
219. AdcRegs.ADCCHSELSEQ4.bit.CONV14 = 0xE; //B6
220. AdcRegs.ADCCHSELSEQ4.bit.CONV15 = 0xF; //B7
221. AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1;
222. // To ensure precise timing, use write-only instructions to write to the entire register. //Therefore,if any
223. // of the configuration bits are changed in ConfigCpuTimer and InitCpuTimers (in //DSP2833x_CpuTimers.h),
the
224. // below settings must also be updated.
225. // CpuTimer0Regs.TCR.all = 0x4001; // Use write-only instruction to set TSS bit = 0
226. // Step 5. User specific code, enable interrupts:
227. // Enable CPU int1 which is connected to CPU-Timer 0, CPU int13
228. // which is connected to CPU-Timer 1, and CPU int 14, which is connected
229. // to CPU-Timer 2:
230. //IER |= M_INT1;
231. // IER |= M_INT13;
232. //IER |= M_INT14;
233. // Enable TINT0 in the PIE: Group 1 interrupt 7
234. PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx7 = 1;
235. // Enable global Interrupts and higher priority real-time debug events:
236. EINT; // Enable Global interrupt INTM
237. ERTM; // Enable Global realtime interrupt DBGM
238. //end of calculation
239. // Step 6. IDLE loop. Just sit and loop forever (optional):
240. for(;;)
241. {APFcontrolSystem (); }
242. }
243. void APFcontrolSystem (void)
244. {
245. //===== recieve data from ADC =====//
246. adc_0=(AdcRegs.ADCRESULT3>>4); //va
247. adc_3=(AdcRegs.ADCRESULT0>>4); //iLa
248. adc_6=(AdcRegs.ADCRESULT8>>4); //ica
249. adc_1=(AdcRegs.ADCRESULT4>>4); //vb
250. adc_4=(AdcRegs.ADCRESULT1>>4); //iLb
251. adc_7=(AdcRegs.ADCRESULT9>>4); //icb
252. adc_2=(AdcRegs.ADCRESULT5>>4); //vc
253. adc_5=(AdcRegs.ADCRESULT2>>4); //iLc
254. adc_8=(AdcRegs.ADCRESULT10>>4); //icc
255. adc_9=(AdcRegs.ADCRESULT13>>4); //Vdc
256. va=adc_0-2048;
257. vb=adc_1-2048;
258. vc=adc_2-2048;
259. iLa=(adc_3-2048)*2; // *2 for sensor set up
260. iLb=(adc_4-2048)*2;
261. iLc=(adc_5-2048)*2;
262. ica=adc_6-2048;
263. icb=adc_7-2048;
264. icc=adc_8-2048;
265. Vdc=(adc_9*14)/10; // *14/10 for sensor set up
266. //=====//

267. //===== Harmonic Detection and theta calculation=====//
268. SDF_HD(va,vb,vc,iLa,iLb,iLc);
269. PLL(va,vb,vc);
270. //=====//

271. //===== Park's trans. calculation=====//

```

```

272. clake_int(ica_ref,icb_ref,icc_ref);
273. park_int(AI,Be,index);
274. icd_ref=d;
275. icq_ref=q;
276. clake_int(ica,icb,icc);
277. park_int(AI,Be,index);
278. icd=d;
279. icq=q;
280. //=====//

281. //=====DC voltage control loop=====//
282. Error_Vdc=Vdc_ref-Vdc;
283. PI_controller_V(Error_Vdc); //Kp=0.208 ,Ki=4.633
284. //=====//

285. //=====Current control loop =====//
286. ed=icd_ref-icd-Idv;
287. eq=icq_ref-icq;

288. /*
289. PI_controller_I(ed);
290. Vd=V;
291. PI_controller_I(eq);
292. Vq=V;
293. */

294. erd=(ed-ed_old)*31250; //10000= /1e-5
295. ed_old=ed;
296. erq=(eq-eq_old)*31250; //10000= /1e-5
297. eq_old=eq;

298. Fuzzy_controller(ed,erd);
299. Vd=V;
300. Fuzzy_controller(eq,erq);
301. Vq=V;

302. theta_new=theta/10;
303. w=(theta_new-theta_old)*31250; //dT=3.2e-5 =====> 1/dt= 31250
304. theta_old=theta_new;

305. Ud=Vd+Vpcc_dq-(icq*w*L)/100000;
306. Uq=Vq+(icd*w*L)/100000;

307. /*
308. if (counter<=6250)
309. {
310. sqrt_fun(ed);
311. ab_ed=X+ab_ed;
312. sqrt_fun(eq);
313. ab_eq=X+ab_eq;
314. }
315. if (counter==6250)
316. {
317. Ed=ab_ed/6251;
318. Auxilary_fuzzy(Ed);
319. Kd=K;
320. a. Eq=ab_eq/6251;
321. Auxilary_fuzzy(Eq);
322. Kq=K;
323. }
324. counter=counter+1;
325. if (counter>6250)
326. { counter=0;
327. ab_ed=0;
328. ab_eq=0 ;
329. Ed=0;
330. Eq=0 ;
331. }

332. Ud=((Kd*Vd)/100)+Vpcc_dq-(icq*w*L)/100000;
333. Uq=((Kq*Vq)/100)+(icd*w*L)/100000;
334. */

```

```

334. //=====//
335. //===== IPark's trans. calculation=====//
336. ipark_int(Ud/1000,Uq/1000,index);
337. //=====//

338. //=====SVPWM switching technique=====//
339. svgen_dq.Ualpha =A1 ; // Pass inputs to svgen_dq1
340. svgen_dq.Ubeta =Be ; // Pass inputs to svgen_dq1
341. SVGEN_MACRO(svgen_dq);
342. Ta = svgen_dq.Ta; // Access the outputs of svgen_dq1
343. Tb = svgen_dq.Tb; // Access the outputs of svgen_dq1
344. Tc = svgen_dq.Tc; // Access the outputs of svgen_dq1
345. //=====//

346. //=====Sending data to DAC=====//
347. DACport(Ta+8000,1); //dac 16000=5V
348. DACport(Tb+8000,2); //dac 16000=5V
349. DACport(Tc+8000,3); //dac 16000=5V
350. //=====//
351. }

352. void delay_loop1(void)
353. {
354. short i;
355. for (i = 0; i <320 ; i++) {} // sine=750 //Ic=70
356. }

357. void Gpio_select(void)
358. {
359. EALLOW;
360. GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all = 0x0000;
361. GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all = 0x0000; // GPIO functionality GPIO32-GPIO47
362. // GpioCtrlRegs.GPBMUX2.all = 0x00000000;
363. GpioCtrlRegs.GPCMUX1.all = 0x0000; // GPIO functionality GPIO64-GPIO79
364. // GpioCtrlRegs.GPCMUX2.all = 0x00000000;

365. GpioCtrlRegs.GPADIR.all = 0xFFFF;
366. GpioCtrlRegs.GPBDIR.all = 0xFFFF; // GPIO32-GPIO47 are output
367. GpioCtrlRegs.GPCDIR.all = 0xFFFF; // GPIO64-GPIO79 are output
368. EDIS;
369. }

370. void PI_controller_V(int32 Error_Vdc)
371. {
372. Uk=208*Error_Vdc;
373. ui=(4633*Error_Vdc)/31250;
374. Ui_new=ui+Ui_old;
375. Idv=(Uk+Ui_new)/100;
376. Ui_old=Ui_new;
377. }

378. void PI_controller_I(int32 Error_I)
379. {
380. UkI=Kpj*Error_I;
381. uiI=(Kii/31250)*Error_I;
382. Ui_newI=uiI+Ui_oldI;
383. V=(UkI+Ui_newI);
384. Ui_oldI=Ui_newI;
385. }

386. void PLL(int32 va, int32 vb, int32 vc)
387. {
388. v_al=((8165*va)-(4082*vb)-(4082*vc))/10000;
389. v_be=-((vb*7071)+(vc*7071))/10000;
390. vvq=(-v_al*sinDATA[index]+v_be*cosDATA[index])/10000;
391. Error_vq=vvq-0;
392. UUK=1810*Error_vq;
393. UUi_new=(5710*Error_vq/31250)+UUi_old;
394. UUi_old=UUi_new;
395. omega=(UUK+UUi_new);
396. if (omega>500000) omega=500000;

```

```

397. if (omega<-500000) omega=-500000;
398. zeta_new=zeta_old+omega/31250;
399. if (zeta_new<-3142) zeta_new=3142;
400. zeta_old=zeta_new;
401. theta=zeta_new;
402. if (zeta_new<0) zeta_new=zeta_new+6280;
403. index=(6366*zeta_new)/100000; //63.66=400/2*pi
404. if (index<0) index=0; if (index>400) index=400;
405. }

406. void SDF_HD(int32 va, int32 vb, int32 vc, int32 iLa, int32 iLb, int32 iLc)
407. {
408.     //====step 1 Three phase power (P_ac) calculating====//
409.     Pac=(va*iLa)+(vb*iLb)+(vc*iLc);
410.     Pac=Pac/100;
411.     //====step 2 determine P_dc by using SWFA method====//
412.     if (k>=+0 && k<N)
413.         initialSWFA(Pac,k);
414.     k=k+1;
415.     if (k==N)
416.     {k=N; // reset j=0
417.     }
418.     }
419.     if (k==N)
420.     {
421.         SWFA(Pac,j);
422.         j=j+1;
423.         if (j==N)
424.         {
425.             j=0; // reset j=0
426.         }
427.     }
428.     //====step 3 Pav calculating====//
429.     Pa_av=Pdc*14142/42426; //100*sqrt(2)= 141.42, Vtot=Va+Vb+Vc=424.2641
430.     Pb_av=Pdc*14142/42426;
431.     Pc_av=Pdc*14142/42426;
432.     //====step 4 Is calculating====//
433.     isa=(2*va* Pa_av)/20000; //==Vs^2=20000
434.     isb=(2*vb* Pb_av)/20000; //==Vs^2=20000
435.     isc=(2*vc* Pc_av)/20000; //==Vs^2=20000
436.     //====step 5 Ic calculating====//
437.     ica_ref=iLa-isa;
438.     icb_ref=iLb-isb;
439.     icc_ref=iLc-isc;
440.     }

441. void initialSWFA(int32 Pac,int16 k)
442. {
443.     Ad[k]=Pac;
444.     Ad[k]=Ad[k]; // use for same time, not have mean
445.     And=And+Ad[k];
446.     Pdc=And/N; // use for same time, not have mean
447.     }
448. void SWFA(int32 Pac,int16 j)
449. {
450.     And=And-Ad[j]; //delete old value
451.     Ad[j]=Pac; //recieve new value to array
452.     And=And+Ad[j]; //add new value
453.     Pdc=And/N;
454.     }

455. void sqrt_fun(int32 srt)
456. {
457.     if (srt>=0) X=srt;
458.     else X=-srt;
459.     }

460. void clake_int(int32 x, int32 y, int32 z)
461. {
462.     AI=((8165*x)-(4082*y)-(4082*z))/10000;
463.     Be=(-(y*7071)+(z*7071))/10000;
464.     }

```

```

465. void park_int(int32 Al, int32 Be,int16 index)
466. {
467. d=(Al*cosDATA[index]+Be*sinDATA[index])/10000;
468. q=(-Al*sinDATA[index]+Be*cosDATA[index])/10000;
469. }
470. void ipark_int(int32 d, int32 q,int16 index)
471. {
472. Al=(d*cosDATA[index]-q*sinDATA[index])/10000;
473. Be=(d*sinDATA[index]+q*cosDATA[index])/10000;
474. }

475. void Fuzzy_controller(int32 e, int32 er)
476. {
477. //Check error state and find membership value of error
478. if (e<=P_2)
479. {
480. if (e<=P_1) mfe1=1000;
481. else if (e>P_1 && e<=P_2) mfe1=((P_2-e)*1000)/(P_2-P_1);
482. }
483. else mfe1=0;
484. if (e<=P_5 && e>=P_3)
485. {
486. if (e==P_4) {mfe2=1000;}
487. else if (e>=P_3 && e<P_4) mfe2=((e-P_3)*1000)/(P_4-P_3);
488. else if (e>P_4 && e<=P_5) mfe2=((P_5-e)*1000)/(P_5-P_4);
489. }
490. else mfe2=0;
491. if (e<=P_8 && e>=P_6)
492. {
493. if (e==P_7) mfe3=1000;
494. else if (e>=P_6 && e<P_7) mfe3=((e-P_6)*1000)/(P_7-P_6);
495. else if (e>P_7 && e<=P_8) mfe3=((P_8-e)*1000)/(P_8-P_7);
496. }
497. else mfe3=0;
498. if (e<=P_11 && e>=P_9)
499. {
500. if (e==P_10) mfe4=1000;
501. else if (e>=P_9 && e<P_10) mfe4=((e-P_9)*1000)/(P_10-P_9);
502. else if (e>P_10 && e<=P_11) mfe4=((P_11-e)*1000)/(P_11-P_10);
503. }
504. else mfe4=0;
505. if (e>=P_12)
506. {
507. if (e>=P_13) mfe5=1000;
508. else if (e>=P_12 && e<P_13) mfe5=((e-P_12)*1000)/(P_13-P_12);
509. }
510. else mfe5=0;
511. //Check error state and find membership value of error_rate
512. if (er<=P_15)
513. {
514. if (er<=P_14) mfer1=1000;
515. else if (er>P_14 && er<=P_15) mfer1=((P_15-er)*1000)/(P_15-P_14);
516. }
517. else mfer1=0;
518. if (er<=P_18 && er>=P_16)
519. {
520. if (er==P_17) mfer2=1000;
521. else if (er>=P_16 && er<P_17) mfer2=((er-P_16)*1000)/(P_17-P_16);
522. else if (er>P_17 && er<=P_18) mfer2=((P_18-er)*1000)/(P_18-P_17);
523. }
524. else mfer2=0;
525. if (er>=P_19)
526. {
527. if (er>=P_20) mfer3=1000;
528. else if (er>=P_19 && er<P_20) mfer3=((er-P_19)*1000)/(P_20-P_19);
529. }
530. else mfer3=0;
531. //Fuzzy Rule (7) for compensating current control
532. //rule 1
533. if (mfe1>0)
534. {
535. mf1=mfe1;

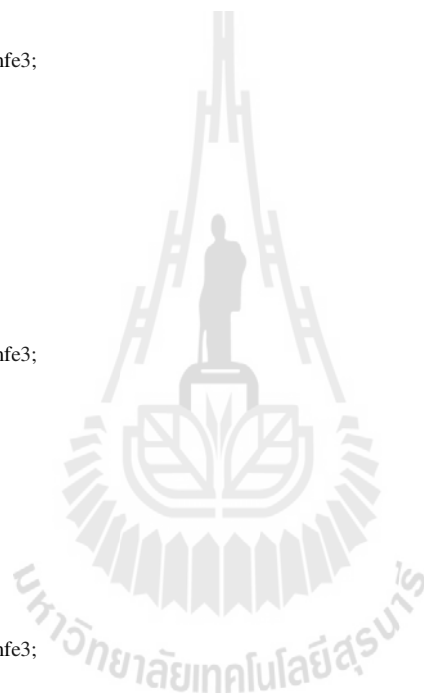
```



```

536. V1=P_21*mf1;
537. }
538. else
539. {
540. mf1=0;
541. V1=0;
542. }
543. //rule 2
544. if (mfe2>0)
545. {
546. mf2=mfe2;
547. V2=P_22*mf2;
548. }
549. else
550. {
551. mf2=0;
552. V2=0;
553. }
554. //rule 3
555. if (mfe3>0 && mfer1>0)
556. {
557. if (mfe3<=mfer1) mf3=mfe3;
558. else mf3=mfer1;
559. V3=P_24*mf3;
560. }
561. else
562. {
563. mf3=0;
564. V3=0;
565. }
566. //rule 4
567. if (mfe3>0 && mfer2>0)
568. {
569. if (mfe3<=mfer2) mf4=mfe3;
570. else mf4=mfer2;
571. V4=P_23*mf4;
572. }
573. else
574. {
575. mf4=0;
576. V4=0;
577. }
578. //rule 5
579. if (mfe3>0 && mfer3>0)
580. {
581. if (mfe3<=mfer3) mf5=mfe3;
582. else mf5=mfer3;
583. V5=P_22*mf5;
584. }
585. else
586. {
587. mf5=0;
588. V5=0;
589. }
590. //rule 6
591. if (mfe4>0)
592. {
593. mf6=mfe4;
594. V6=P_24*mf6;
595. }
596. else
597. {
598. mf6=0;
599. V6=0;
600. }
601. //rule 7
602. if (mfe5>0 )
603. {
604. mf7=mfe5;
605. V7=P_25*mf7;
606. }
607. else

```



```

608.  {
609.  mf7=0;
610.  V7=0;
611.  }
612.  //deFuzzification// output calculate weighted average(WA)
613.  num=V1+V2+V3+V4+V5+V6+V7;
614.  den=mf1+mf2+mf3+mf4+mf5+mf6+mf7;
615.  V=num/den;
616.  }

617.  void Auxilary_fuzzy(int32 E)
618.  {
619.  //Check error state and find membership value of error//
620.  if (E<=Q_2)
621.  {
622.  if (E<=Q_1) mfe1=1000;
623.  else if (E>Q_1 && E<=Q_2) mfe1=((Q_2-E)*1000)/(Q_2-Q_1);
624.  }
625.  else mfe1=0;
626.  if (E<=Q_5 && E>=Q_3)
627.  {
628.  if (E==Q_4) mfe2=1000;
629.  else if (E>=Q_3 && E<Q_4) mfe2=((E-Q_3)*1000)/(Q_4-Q_3);
630.  else if (E>Q_4 && E<=Q_5) mfe2=((Q_5-E)*1000)/(Q_5-Q_4);
631.  }
632.  else mfe2=0;
633.  if (E<=Q_8 && E>=Q_6)
634.  {
635.  if (E==Q_7) mfe3=1000;
636.  else if (E>=Q_6 && E<Q_7) mfe3=((E-Q_6)*1000)/(Q_7-Q_6);
637.  else if (E>Q_7 && E<=Q_8) mfe3=((Q_8-E)*1000)/(Q_8-Q_7);
638.  }
639.  else mfe3=0;
640.  if (E<=Q_11 && E>=Q_9)
641.  {
642.  if (E==Q_10) mfe4=1000;
643.  else if (E>=Q_9 && E<Q_10) mfe4=((E-Q_9)*1000)/(Q_10-Q_9);
644.  else if (E>Q_10 && E<=Q_11) mfe4=((Q_11-E)*1000)/(Q_11-Q_10);
645.  }
646.  else mfe4=0;
647.  if (E>=Q_12)
648.  {
649.  if (E>=Q_13) mfe5=1000;
650.  else if (E>=Q_12 && E<Q_13) mfe5=((E-Q_12)*1000)/(Q_13-Q_12);
651.  }
652.  else mfe5=0;
653.  //Fuzzy Rule (5) for tuning K value//
654.  //rule 1//
655.  if (mfe1>0) { mf1=mfe1; k1=Q_14*mf1; }
656.  else { mf1=0; k1=0; }
657.  //rule 2//
658.  if (mfe2>0) { mf2=mfe2; k2=Q_15*mf2; }
659.  else { mf2=0; k2=0; }
660.  //rule 3//
661.  if (mfe3>0) { mf3=mfe3; k3=Q_16*mf3; }
662.  else { mf3=0; k3=0; }
663.  //rule 4//
664.  if (mfe4>0) { mf4=mfe4; k4=Q_17*mf4; }
665.  else { mf4=0; k4=0; }
666.  //rule 5//
667.  if (mfe5>0) { mf5=mfe5; k5=Q_18*mf5; }
668.  else { mf5=0; k5=0; }
669.  //deFuzzification, calculate weighted average(WA)//
670.  num=k1+k2+k3+k4+k5;
671.  den=mf1+mf2+mf3+mf4+mf5;
672.  K=(num/den)/10;
673.  }
674.  void DACport(int16 kkk,int Chan)
675.  {
676.  if (kkk<0) {kkk=0;}
677.  if (kkk>16000){kkk=16000;}
678.  if (Chan==1)

```

```

679. {
680.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xff00;           //initial
681.   GpioDataRegs.GPCDAT.all=kkk;             //load data
682.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xff00;
683.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xfe00;           //load input latch WR=1
684.   //delay_loop();
685.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xbe00;           // WR=0
686.   delay_loop();
687.   //GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xfe00;       //WR=1
688.   //delay_loop();
689.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xfd00;           //load D/A latch WR=1
690.   //delay_loop();
691.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xbd00;           // WR=0
692.   delay_loop();
693.   //GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xfd00;       //WR=1
694.   //delay_loop();
695. }
696. if (Chan==2)
697. {
698.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xff00;           //initial
699.   GpioDataRegs.GPCDAT.all=kkk;             //load data
700.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xff00;
701.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xfb00;           //load input latch WR=1
702.   //delay_loop();
703.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xbb00;           // WR=0
704.   delay_loop();
705.   //GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xfb00;       //WR=1
706.   //delay_loop();
707.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xf700;           //load D/A latch WR=1
708.   //delay_loop();
709.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xb700;           // WR=0
710.   delay_loop();
711.   //GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xf700;       //WR=1
712.   //delay_loop();
713. }
714. if (Chan==3)
715. {
716.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xff00;           //initial
717.   GpioDataRegs.GPCDAT.all=kkk;             //load data
718.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xff00;
719.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xef00;           //load input latch WR=1
720.   //delay_loop();
721.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xaf00;           // WR=0
722.   delay_loop();
723.   //GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xef00;       //WR=1
724.   //delay_loop();
725.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xdf00;           //load D/A latch WR=1
726.   //delay_loop();
727.   GpioDataRegs.GPBDAT.all=0x9f00;           // WR=0
728.   delay_loop();
729.   //GpioDataRegs.GPBDAT.all=0xdf00;       //WR=1
730.   //delay_loop();
731. }
732. }

733. void delay_loop(void)
734. {
735.   short i;
736.   for (i = 0; i < 10; i++) {}
737. }

```

## การอธิบายโค้ดโปรแกรมภาษาซีของ APFcontrol

บรรทัดที่ 5 ถึง 11 คือ การประกาศไลบรารีสำหรับเรียกใช้งานบอร์ด eZdsp™ F28335 ประกาศเรียกใช้งานฟังก์ชันพื้นฐานต่าง ๆ ของภาษาซี และประกาศเรียกใช้งานฟังก์ชันเทคนิคการสวิตช์แบบ SVPWM (SVGEN)

บรรทัดที่ 12 ถึง 23 คือ การตั้งค่า CPU ของบอร์ด eZdsp™F28335 และการตั้งค่าใช้งานพอร์ต ADC ของบอร์ด eZdsp™F28335

บรรทัดที่ 24 ถึง 78 คือ การหนดค่าพารามิเตอร์จำนวนข้อมูลในการคำนวณ ( $N$ ) สำหรับใช้ในการคำนวณ SWFA และกำหนดค่าข้อมูลฟังก์ชัน  $\sin$  และ  $\cos$  สำหรับเรียกใช้งานอย่างสะดวกแบบ look up table

บรรทัดที่ 79 ถึง 96 คือ การประกาศฟังก์ชันการคำนวณต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณระบบการควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

บรรทัดที่ 97 ถึง 144 คือ การประกาศค่าพารามิเตอร์ และตัวแปรต่าง ๆ สำหรับใช้ในการคำนวณระบบควบคุมวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

บรรทัดที่ 145 ถึง 242 คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับใช้งานของบอร์ด eZdsp™F28335 การกำหนดค่าเริ่มต้นใช้งานช่องทางสื่อสาร ADC และการเรียกฟังก์ชันคำนวณระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (APFcontrolSystem)

บรรทัดที่ 243 ถึง 351 คือ ฟังก์ชันคำนวณระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (APFcontrolSystem) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

บรรทัดที่ 245 ถึง 266 คือ ฟังก์ชันการรับค่าอินพุตที่ใช้ในการคำนวณระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

บรรทัดที่ 267 ถึง 270 คือ ฟังก์ชันการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF และการคำนวณมุม  $\theta$  ด้วยเทคนิค PLL

บรรทัดที่ 271 ถึง 280 คือ ฟังก์ชันการคำนวณแปลงแกนระบบควบคุมกระแสชดเชยไปอยู่บนแกนดีคิวโดยใช้สมการแบบปาร์ก

บรรทัดที่ 281 ถึง 284 คือ ฟังก์ชันการคำนวณควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

บรรทัดที่ 285 ถึง 334 คือ ฟังก์ชันการคำนวณควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) โดยเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ตัวควบคุมพีชชี และตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัว

บรรทัดที่ 335 ถึง 337 คือ ฟังก์ชันการคำนวณแปลงค่าแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์จากแกนดีคิว ( $U_d, U_q$ ) ไปอยู่บนแกนแอลฟาเบต้า ( $U_\alpha, U_\beta$ ) เพื่อส่งเข้าเทคนิคการสวิตช์แบบ SVPWM ต่อไป

บรรทัดที่ 338 ถึง 345 คือ การคำนวณสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์ ( $T_a, T_b, T_c$ ) ด้วยเทคนิคการสวิตช์แบบ SVPWM (ฟังก์ชันสำเร็จรูป SVGEN)

บรรทัดที่ 346 ถึง 351 คือ การส่งค่าเอาต์พุตสัญญาณอ้างอิงในการสวิตช์ออกนอกบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางพอร์ตเอาต์พุตเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณจากดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (ฟังก์ชัน DAC) สำหรับนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยมด้วยวงจรแอนะล็อกเพื่อสร้างพัลส์ควบคุมไอจีบีทีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟต่อไป

บรรทัดที่ 352 ถึง 356 คือ รายละเอียดของฟังก์ชันหน่วงเวลา (delay\_loop1)

บรรทัดที่ 357 ถึง 369 คือ รายละเอียดของฟังก์ชันเลือกใช้งานพอร์ตอินพุตเอาต์พุต (Gpio\_select)

บรรทัดที่ 370 ถึง 377 คือ รายละเอียดของฟังก์ชันตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับใช้ควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง (PI\_controller\_V)

บรรทัดที่ 378 ถึง 385 คือ รายละเอียดของฟังก์ชันตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชย (PI\_controller\_I)

บรรทัดที่ 386 ถึง 405 คือ รายละเอียดของฟังก์ชัน PLL

บรรทัดที่ 406 ถึง 454 คือ รายละเอียดของฟังก์ชันการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF

บรรทัดที่ 455 ถึง 459 คือ รายละเอียดของฟังก์ชันคำนวณหาค่าขนาด (sqrt\_fun)

บรรทัดที่ 460 ถึง 474 คือ รายละเอียดของฟังก์ชันสำหรับการแปลงแกนแอลฟาเบต้า ดีคิว และการแปลงกลับ (clake\_int, park\_int, ipark\_int)

บรรทัดที่ 475 ถึง 616 คือ รายละเอียดของฟังก์ชันตัวควบคุมฟัซซีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชย (Fuzzy\_controller)

บรรทัดที่ 617 ถึง 673 คือ รายละเอียดของฟังก์ชันฟัซซีช่วย (Auxiliary\_fuzzy) สำหรับใช้ร่วมกับตัวควบคุมฟัซซีเพื่อสร้างเป็นตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัว

บรรทัดที่ 674 ถึง 732 คือ รายละเอียดของฟังก์ชัน DAC

บรรทัดที่ 733 ถึง 737 คือ รายละเอียดของฟังก์ชันหน่วงเวลา (delay\_loop)

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. At the top, there is a stylized spire or tower. Below it, a central figure stands on a pedestal. The emblem is surrounded by a decorative border. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in Thai script along the bottom curve of the emblem.

ภาคผนวก จ.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Narongrit T., Areerak K-L. and Areerak K-N. Adaptive Fuzzy Control for Shunt Active Power Filters. อยู่ในระหว่างรอดอรับการตีพิมพ์

Narongrit T., Areerak K-L. and Areerak K-N. (2015). A New Design Approach of Fuzzy Controller for Shunt Active Power Filter. **Electric Power Components and Systems**, vol. 43,no. 6, pp. 685-694.

ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ กองพล อารีรักษ์ และ กองพันธ์ อารีรักษ์. (2557). การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดีสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 37 (EECON-37). 19-21 พฤศจิกายน. หน้า 481-484.

Narongrit T., Areerak K-L. and Areerak K-N. (2012). Current control of shunt active power filter using space vector PWM. **International conference on Electrical Engineering Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 9th)**. 16-18 May 2012. pp.1-4.

Narongrit T., Areerak K-L. and Areerak K-N. (2011). 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.

Narongrit T., Areerak K-L. and Areerak K-N. (2011). The Comparison Study of Current Control Techniques for Active Power Filters. **World Academy of Science Engineering and Technology**, issue 60. December. pp. 471-416.

## ประวัติผู้เขียน

นายทศพร ณรงค์ฤทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 5 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2528 ที่อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับสอง (วิศวกรรมไฟฟ้า) ระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2551 และปี พ.ศ. 2553 ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2554 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะที่ศึกษาได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้ที่มีศักยภาพเข้าศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี

