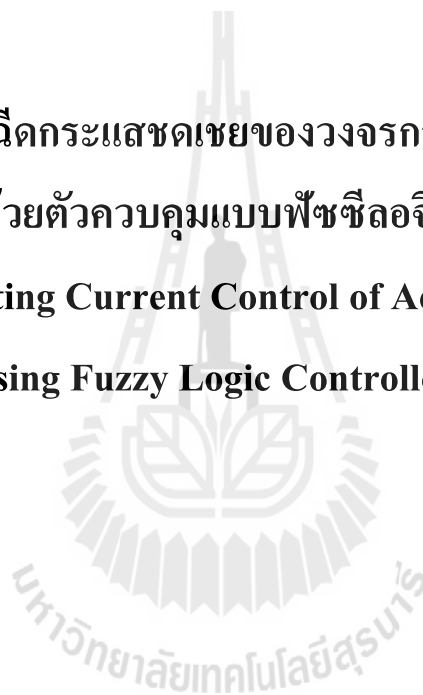




รายงานการวิจัย

**การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรร่งกำลังแอคทีฟ
ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก
(The Compensating Current Control of Active Power Filter
Using Fuzzy Logic Controller)**



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก
(The Compensating Current Control of Active Power Filter
Using Fuzzy Logic Controller)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กองพล อารีรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

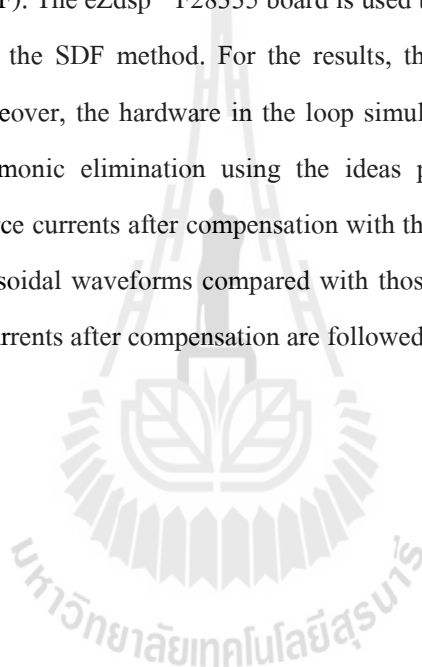
มกราคม 2558

บทคัดย่อ

รายงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ การควบคุมการบิดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบพีซีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล ระบบการควบคุมกระแสชดเชยดำเนินการควบคุมอยู่บนแกนดีคิวร่วมกับเทคนิคการสวิตช์อุปกรณ์ไอจีบีทีแบบสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม การควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้ตัวควบคุมแบบพีโอ การออกแบบตัวควบคุมพีซีในงานวิจัยใช้วิธีการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามูเชิงปรับตัว นอกจากนี้ ในงานวิจัยได้พัฒนาปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ ที่เรียกว่า วิธีฟูริเยร์เอสดี โดยในงานวิจัยได้มีการสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกตามวิธีที่พัฒนาขึ้นโดยใช้บอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ซึ่งผลการทดสอบชุดตรวจจับฮาร์มอนิก ดังกล่าว พบว่า ค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากชุดตรวจจับฮาร์มอนิกมีความถูกต้อง นอกจากนี้ในรายงานวิจัยยังได้นำเสนอ การจำลองสถานการณ์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในลูปโดยใช้บอร์ด eZdsp™ F28335 ด้วยเช่นกัน โดยผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมพีซีในการควบคุมกระแสชดเชย พบว่ากระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นไซน์ชอยด์มากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีก่อนมีการชดเชย โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลงและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEEE std. 519-1992

Abstract

This research proposes the compensating current control of active power filter using fuzzy controller for three-phase balanced system. The control strategy of the system is operated on dq-axis with the space vector pulse width modulation technique (SVPWM). Moreover, the PI controller is applied for DC bus voltage control. The adaptive tabu search (ATS) is used for the fuzzy controller design. In addition, the harmonic detection method is improved and it is called the synchronous detection with Fourier (SDF). The eZdspTM F28335 board is used to implement the harmonic detection for real time system with the SDF method. For the results, the reference currents from the SDF method are accuracy. Moreover, the hardware in the loop simulation with eZdspTM F28335 board is used to simulate the harmonic elimination using the ideas proposed in this research. For the simulation results, the source currents after compensation with the active power filter using the fuzzy controllers are nearly sinusoidal waveforms compared with those before compensation. In addition, the %*THD* of the source currents after compensation are followed the IEEE Std.519-1992.



กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การควบคุมการติดเชื้อและสุขภาพของวงจรรอกำล้างแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณนายทศพร ฌรณกุลฤทธิ์ ที่เป็นผู้ช่วยวิจัย และดำเนินการสร้างชุดตรวจจับฮาร์โมนิก ด้วยความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่ง

กองพล อารีรักษ์

มกราคม 2558



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงาน	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 การจัดรูปแบบรายงาน	3
บทที่ 2 การสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุม	
วงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการทำงาน ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ	4
2.3 สรุป	14
บทที่ 3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสสำหรับ	
วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน	15
3.1 กล่าวนำ	15
3.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส	15
3.2.1 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบกระแสเท่ากัน.....	16
3.2.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบกำลังเท่ากัน.....	18
3.2.3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบอิมพีแดนซ์เท่ากัน.....	18
3.3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี	19
3.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส กับวิธีฟูริเยร์เอสดี	21

3.5 สรุป	29
บทที่ 4 การสร้างชุดตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดีโดยใช้บอร์ด eZdsp™ F28335	30
4.1 กล่าวนำ	30
4.2 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงดันและกระแสไฟฟ้า.....	30
4.2.1 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงดันไฟฟ้า.....	30
4.2.2 อุปกรณ์ตรวจรู้กระแสไฟฟ้า	32
4.3 โครงสร้างและคุณสมบัติของบอร์ดeZdsp™ F28335	34
4.4 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในชิปซีพียูTMS320F28335.....	36
4.5 พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของบอร์ดeZdsp™ F28335	37
4.6 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก	41
4.7 การโปรแกรมชุดตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดีบนบอร์ดeZdsp™ F28335	44
4.8 การทดสอบชุดตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี.....	46
4.9 สรุป	50
บทที่ 5 การควบคุมแบบฟัซซีและการประยุกต์ใช้ควบคุมกระแสชดเชย	
ของวงจรรองกำลังแยกที่ฟ.....	51
5.1 กล่าวนำ	51
5.2 ฟัซซีเซต	52
5.3 การดำเนินการทางฟัซซีเซต.....	53
5.4 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก	56
5.4.1 การทดสอบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับ	
ระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแยกที่ฟ.....	58
5.5 ตัวแปรภาษา	64
5.5.1 การออกแบบตัวแปรภาษาสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย.....	64
5.5.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุม	
ฟัซซีกรณีใช้ฟัซซี 3 ค่าเชิงภาษาและ 5 ค่าเชิงภาษา	68
5.6 กฎของฟัซซี.....	69
5.6.1 การออกแบบกฎของฟัซซีสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย	70
5.7 การอนุมานฟัซซี	73
5.7.1 การอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani.....	73
5.7.2 การอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno	83
5.7.3 การทดสอบวิธีการอนุมานฟัซซีสำหรับควบคุมกระแสชดเชย	85
5.8 สรุป	86

บทที่ 6 การออกแบบตัวควบคุมพีชชีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแยกทีฟ	
ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว	88
6.1 กล่าวนำ	88
6.2 การออกแบบตัวควบคุมพีชชีสำหรับควบคุมกระแสชดเชย	89
6.3 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีตามเชิงปรับตัว	91
6.4 การออกแบบตัวควบคุมพีชชีและวงจรรองกำลังแยกทีฟ	
ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว	95
6.4.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมพีชชี	
และค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแยกทีฟ	95
6.4.2 การทดสอบค่าขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีชชีและ	
พารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแยกทีฟ	99
6.4.3 การทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวสำหรับ	
ใช้ออกแบบตัวควบคุมพีชชีและวงจรรองกำลังแยกทีฟ	105
6.4.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีชชีและ	
วงจรรองกำลังแยกทีฟด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว	111
6.4.5 การปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับใช้ค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม	
แบบพีชชีและวงจรรองกำลังแยกทีฟด้วยวิธีการค้นหาตามเชิงปรับตัว	114
6.5 สรุป.....	122
บทที่ 7 การจำลองสถานการณ์ระบบกักจัดฮาร์โมนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูป	123
7.1 กล่าวนำ.....	123
7.2 การจำลองสถานการณ์ระบบกักจัดฮาร์โมนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูป	124
7.2.1 ระบบกักจัดฮาร์โมนิกสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป	124
7.2.2 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบกักจัดฮาร์โมนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูป	128
7.4 สรุป.....	131
บทที่ 8 บทสรุป	132
8.1 สรุป.....	132
รายการอ้างอิง	134
ประวัติผู้วิจัย	139

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในโรงงานอุตสาหกรรม สำนักงาน และบ้านพักอาศัยต่าง ๆ ได้ต่อใช้งานโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นจำนวนมาก ดังเช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ หลอดฟลูออเรสเซนต์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ วงจรคอนเวอร์เตอร์ วงจรชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ค หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น การใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งทางไฟฟ้า เนื่องจากปัญหาดังกล่าวก่อให้เกิดผลเสียหลายประการ เช่น เกิดกำลังงานสูญเสียที่สายส่งและภายในตัวอุปกรณ์ไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์ป้องกันและมีเตอร์วัดไฟฟ้าทำงานผิดพลาด และทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มีอายุการใช้งานสั้นลง เป็นต้น จากผลเสียดังกล่าวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวให้หมดไปหรือลดน้อยลงเพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณภาพทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น การกำจัดฮาร์มอนิกที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ การใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟ และการใช้วงจรกรองกำลังไฮบริด แต่ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นและพัฒนากำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกสูง และมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังได้ดีกว่าการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ อีกทั้งยังไม่ประสบปัญหาจากสภาวะเรโซแนนซ์อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ด้านการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน

1.2.2 เพื่อศึกษาค้นคว้าการใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม (SVPWM) ในการสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรกรองกำลังแอคทีฟ

1.2.3 เพื่อทำการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่เรียกว่า วิธีการตรวจจับซิงโครไนส์ให้ดีขึ้นกว่าเดิม

1.2.4 เพื่อศึกษาการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอคทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีซีร่วมกับเทคนิคการสวิตช์วิธีสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็มบนแกนดีคิว

1.2.5 เพื่อศึกษาการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับใช้ควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอคทีฟ

1.2.6 เพื่อศึกษาค้นคว้าความรู้ใหม่ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีชชีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่าวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว (ATS)

1.2.7 เพื่อสร้างระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware In the Loop: HIL)

1.2.8 เพื่อสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกตามวิธีการใหม่ที่เกิดขึ้นสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

1.3.2 การวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาระบบฮาร์มอนิกมุ่งเน้นที่การปรับแก้กระแสฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียว

1.3.3 การวัดประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกในงานวิจัยนี้ใช้ค่า $%THD$ และค่าดังกล่าวจะต้องมีค่าลดลงภายหลังการชดเชย

1.3.4 การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีชชีร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธีสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม

1.3.5 การควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

1.3.6 ระบบที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์พิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล

1.3.7 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ simulink บนโปรแกรม MATLAB

1.3.8 การสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกตามวิธีการที่พัฒนาขึ้น ใช้บอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุลเท่านั้น

1.4.2 แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายพิจารณาในกรณีรูปสัญญาณแรงดันไม่มีฮาร์มอนิก และอยู่ในสถานะสมดุลทั้งขนาดและเฟส

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.5.2 ได้โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนโปรแกรม Simulink

1.5.3 ได้องค์ความรู้ในการใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม (SVPWM) สำหรับการสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

1.5.4 ได้วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่มีสมรรถนะดีขึ้นกว่าเดิม

1.5.5 ได้องค์ความรู้ในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนคิดที่ใช้ตัวควบคุมพีซีร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม

1.5.6 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมพีซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

1.5.7 ได้โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

1.5.8 ได้ชุดตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.5.9 ได้บทความวิจัยเผยแพร่ระดับชาติหรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มรายงาน

รายงานนี้ประกอบด้วย 11 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย รวมถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมบทความที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

บทที่ 3 นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับเชิงโครนัสและวิธีการที่พัฒนาขึ้น ที่เรียกว่า วิธีฟูรีเยร์เอสดี สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

บทที่ 4 นำเสนอการสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดีโดยใช้บอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335

บทที่ 5 นำเสนอการควบคุมแบบพีซีและการประยุกต์ใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

บทที่ 6 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

บทที่ 7 นำเสนอการจำลองสถานการณ์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

บทที่ 8 บทสรุป

บทที่ 2

การสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุม

การทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

2.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ซึ่งในอดีตที่ผ่านมา งานวิจัยทางด้านดังกล่าวได้มีการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในบทนี้จึงเป็นการนำเสนอการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมดังกล่าวจะได้แสดงไว้ดังหัวข้อต่อไปนี้

2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการทำงานของ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

การสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมหรือบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ได้แบ่งหัวข้อการสำรวจเป็น 4 หัวข้อ คือ ผลงานวิจัยวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมพีชชี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมพีชชีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยในแต่ละหัวข้อผู้วิจัยจะนำเสนอในรูปแบบของตาราง และในแต่ละตารางจะเรียงตามลำดับปีที่ทำการตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสรุปสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป ดังตารางที่ 2.1 ถึงตารางที่ 2.4 ตามลำดับหัวข้อการสำรวจ ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลการสำรวจบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ พบว่า วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ให้ประสิทธิภาพดีและนิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ วิธี PQ วิธี DQ วิธี SD เป็นต้น แต่ถ้าพิจารณาถึงความซับซ้อนของอัลกอริทึมการคำนวณ พบว่าวิธี SD มีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีอื่น อีกทั้งวิธี SD ยังมีความหลากหลายในอัลกอริทึมทั้งวิธี CSD PSD และ ZSD ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกใช้ได้ตามวัตถุประสงค์ของการชดเชยได้ อย่างไรก็ตามวิธี SD รวมถึงวิธี PQ และ DQ คือ อัลกอริทึมดังกล่าวจะต้องเลือกใช้วงจรกรอง (filter) สำหรับใช้แยกปริมาณฮาร์มอนิก ซึ่งถ้าเลือกไม่เหมาะสมอาจจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแผนการพัฒนาวิธี SD ให้ดียิ่งขึ้นกว่าเดิม โดยจากการ

สำรวจพบว่าวิธี DQF ได้นำวิธี SWFA มาใช้ในการแยกปริมาณดังกล่าวซึ่งพบว่าวิธี SWFA ให้สมรรถนะในการแยกปริมาณฮาร์โมนิกที่ดีกว่าการใช้วงจรกรอง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงคิดที่จะนำวิธี SWFA มาประยุกต์ใช้กับวิธี SD เช่นกันเพื่อให้มีสมรรถนะการตรวจจับฮาร์โมนิกที่ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์โมนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	1984	Akagi H., Kanazawa Y., and Nabae A.	นำเสนอานิยามต่าง ๆ ของทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power theory) หรือวิธี PQ และขั้นตอนการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQ สำหรับคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟรวมถึงการชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุล
2	1988	Takeda M., Ikeda K., Teramoto A., and Aritsuka T.	ใช้การตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีแกนหมุนดีคิว (DQ axis) หรือวิธี DQ ซึ่งสามารถเลือกรูปแบบการคำนวณตรวจจับได้ คือ การตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกเพียงอย่างเดียว หรือรวมถึงการคำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟเพื่อชดเชยให้กับระบบไฟฟ้าได้อีกด้วย
3	1992	Lin C. E., Chen C.L., and Huang C. L.	นำเสนอวิธีการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส (Synchronous Detection) หรือวิธี SD โดยแบ่งออกเป็น 3 อัลกอริทึมการคำนวณ ได้แก่ การตรวจจับซิงโครนัสแบบกระแสเท่ากัน (CSD) แบบกำลังเท่ากัน (PSD) และแบบค่าอิมพีแดนซ์เท่ากัน (ZSD) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบไม่สมดุล นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการสร้างวิธีการตรวจจับดังกล่าวทางฮาร์ดแวร์เพื่อใช้งานจริง
4	1992	Chen C. L., Lin C. E., and Huang C. L.	นำเสนอใช้การตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบกระแสเท่ากัน หรือวิธี CSD สำหรับคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย และได้นำเสนอการสร้างวิธีการตรวจจับดังกล่าวทางฮาร์ดแวร์ด้วย โดยพิจารณาระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบไม่สมดุล

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
5	1995	Jou H-L.	นำเสนอเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก 3 วิธี ได้แก่วิธี PQ วิธี CSD และวิธี PSD+voltage_filter ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่าทั้ง 3 วิธีให้ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกดีเท่ากันในกรณีระบบไฟฟ้าสมดุล ส่วนวิธี CSD และวิธีPSD +voltage_filter จะให้ผลดีกว่าวิธี PQ กรณีระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันไม่สมดุลขนาด และวิธี PSD+voltage_filter จะให้ผลดีกว่าอีกสองวิธีในกรณีระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันที่ผิดเพี้ยนไปจากไซน์
6	1996	Peng F. Z, and Lai J-S	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ในรูปทั่วไป สำหรับการคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย และการชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส
7	2000	Chang G.W and Chen S.K.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงเฟส <i>abc</i> (<i>a-b-c</i> reference frame) สำหรับคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงและกำลังรีแอกทีฟสำหรับการชดเชย โดยพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสี่สาย
8	2000	Zhang B., Yi S.,and He X.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ_k ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธี DQ ดั้งเดิมโดยสามารถเลือกตรวจจับฮาร์มอนิกเฉพาะบางอันดับได้ (อันดับที่ k)
9	2001	EI-Habrouk M.and Darwish M.K.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี sliding window Fourier analysis (วิธี SWFA) สำหรับการคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ปรับการคำนวณให้เร็วกว่าวิธี FFT ปกติ โดยทำการคำนวณเพียงองค์ประกอบมูลฐานของกระแส จากนั้นจึงนำไปห้กลับกับค่ากระแสโหลดทั้งหมด ผลที่ได้ คือค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ

วงจรรอกกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
10	2002	Chang G. W.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงเฟส abc สำหรับคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยฮาร์โมนิกและชดเชยกำลังรีแอกทีฟ โดยพิจารณา ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส
11	2002	Chang G. W. and Shee T-C.	นำเสนอเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี DQ วิธี SD และวิธี $a-b-c$ reference frame โดยทำการทดสอบกับ 2 กรณีระบบ คือ กรณีระบบไฟฟ้ากำลังต่อเข้ากับโหลดฮาร์มอนิกชนิดไม่สมดุล และกรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลขนาดและโหลดฮาร์มอนิกไม่สมดุล ซึ่งผลปรากฏว่าในกรณีแรกทุกวิธีให้ประสิทธิภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีเท่า ๆ กัน ส่วนในกรณีที่สองวิธี DQ และวิธี SD ให้ประสิทธิภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี PQ และวิธี $a-b-c$ reference frame
12	2004	Hao R., Cheng Z., and You X.	ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ สำหรับคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย โดยพิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุล
13	2004	Chen D. and Xie S.	ได้นำเสนอเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการตรวจจับฮาร์มอนิกวิธี PQ กับวิธี DQ โดยทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 4 ประเด็น คือ ผลของความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย ผลของโหลดชนิดไม่สมดุล กรณีความยากง่ายในการคำนวณของอัลกอริทึม และการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ ซึ่งผลการเปรียบเทียบในประเด็นที่ 1 และ 2 วิธี DQ ดีกว่าวิธี PQ ในขณะที่ประเด็นที่ 4 วิธี DQ ดีกว่าวิธี PQ และทั้งสองวิธีมีความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณอัลกอริทึม

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ

วงจรกรองกำลังแอคทีฟ (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
14	2007	Mahesh K.M., Arindam G., Avinash J., and Hiralal M. S.	นำเสนอการวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD ทั้งสามอัลกอริทึม คือ วิธี CSD วิธี PSD และวิธี ZSD โดยได้ทำการทดสอบจำลองสถานการณ์กับกรณีระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่สมดุลขนาดแรงดัน และแรงดันที่ผิดเพี้ยนไปจากไซน์ ซึ่งผลปรากฏว่าวิธี CSD เป็นวิธีที่สามารถปรับให้กระแสสมดุลได้หลังการชดเชย
15	2007	Sujitjorn S., Areerak K-L., and Kulwora- wanichpong T.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์ดีคิว (DQ axis with Fourier) หรือวิธี DQF สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสี่สายแบบไม่สมดุล โดยผลการจำลองสถานการณ์มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกกับอีก 2 วิธี คือ วิธี DQ และวิธี SWFA ซึ่งวิธี DQF ให้ผลตรวจจับดีกว่าอีกสองวิธี และสามารถปรับให้ระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุลก่อนการชดเชยให้อยู่ในสถานะสมดุลหลังได้รับการชดเชยได้
16	2011	Yilin Y., Yonghai X. and Xioabo L.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA สำหรับการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย ในกรณีตรวจจับฮาร์มอนิกทุกอันดับ และบางอันดับ

ตารางที่ 2.2 ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟและระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวพบว่า การควบคุมกระแสบนแกนดีคิวได้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการควบคุมวงจรกรองกำลังแอคทีฟ โดยพบข้อดีของการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว คือ การใช้ตัวควบคุมเพียง 2 ตัว การควบคุมบนแกนดีคิวสามารถลดความซับซ้อนของระบบควบคุมได้เมื่อเทียบกับการควบคุมบนแกนสามเฟส และการควบคุมรูปสัญญาณบนแกนดีคิวจะง่ายกว่าบนแกนสามเฟส นอกจากนี้ยังพบว่า ระบบการควบคุมบนแกนดีควินิยมใช้ร่วมเทคนิควิธี SVPWM ซึ่งเป็นเทคนิคที่ผู้วิจัยได้พิจารณาเลือกใช้ในงานวิจัยด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรอกกำลังแอคทีฟ
และระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2000	Mendalek N.and Al-Haddad K.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอคทีฟบนแกนดีคิว โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับควบคุมกระแสชดเชยร่วมกับเทคนิค SVPWM โดยการออกแบบตัวควบคุมแบบพีโออาศัยสมการที่ได้จากแบบจำลอง
2	2006	Lenwari W., Sumner M. and Zanchetta P.	นำเสนอใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอคทีฟบนแกนดีคิวร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM สำหรับพิจารณากำจัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7
3	2008	Chengxi L., Yuxiang and Shenghua H.	นำเสนอการหาแบบจำลองของวงจรอินเวอร์ชันบนแกนดีคิวเพื่อออกแบบระบบควบคุมการฉีดกระแสร่วมกับเทคนิค PWM โดยระบบควบคุมได้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับควบคุมกระแสและแรงดันบัสไฟตรง
4	2009	Zadkhast S. and Mokhtari H.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรอกกำลังแอคทีฟบนแกนดีคิวสำหรับนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม สำหรับควบคุมกระแสชดเชยและควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (ตัวควบคุมใช้เป็นค่า Gain)
5	2010	Rahmani S., Mendalek N. and Al-Haddad K.	นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ การออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรอกกำลังแอคทีฟบนแกนดีคิว นอกจากนี้ในบทความยังได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์และการสร้างระบบเพื่อทดสอบจริงอีกด้วย

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ และระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
6	2010	Hongdong Y., Guangkuo S., Lingzhi C. and Hongfeng Z.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว สำหรับนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟ
7	2011	พลลสิทธิ์ สานติประพันธ์	นำเสนองานวิจัยวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานบนแกนดีคิว สำหรับการนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ด้วยวิธี PWM โดยระบบที่พิจารณาเป็นระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ พบว่า ตัวควบคุมฟัซซี่ได้นำมาใช้งานร่วมกับวงจรรองกำลังแอกทีฟอย่างหลายรูปแบบ เช่น การนำมาใช้เป็นตัวควบคุมหลักในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยตรง หรือใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบควบคุมหรือตัวควบคุมอื่น ๆ เพื่อให้ผลการควบคุมได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งถือเป็นทางเลือกที่ดีและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่และวงจรรองกำลังแอกทีฟ โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้วิธีการค้นหาค่าแบบเหมาะที่สุดทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยในการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก ได้แก่ วิธี GA วิธี PSO และวิธี ATS ซึ่งวิธีดังกล่าวจะช่วยให้สมรรถนะการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซี่เพิ่มมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรรอกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	1998	Saetio S. and Torrey D. A.	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมฟัซซี (fuzzy controller) สำหรับควบคุมกระแสของวงจรคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ SVPWM โดยการใช้ตัวควบคุมฟัซซีคำนวณหาขนาดและมุมของแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์เพื่อระบุตำแหน่งเซกเตอร์และคำนวณหาช่วงเวลาการสวิตช์ทั้งสามเฟสตามวิธี SVPWM นอกจากนี้ในบทความยังได้นำเสนอเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสระหว่างกรณีที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีกับกรณีใช้วิธี SVPWM แบบปกติ ซึ่งผลปรากฏว่า กรณีใช้ตัวควบคุมฟัซซีให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า
2	2000	Elmitwally A., Abdelkader S., and Ekateb M.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีร่วมกับเทคนิค PWM สำหรับคำนวณหาแรงดันอ้างอิงสามเฟสของวงจรรอกำลังแอกทีฟสามเฟสสามสายและสามเฟสสี่สาย โดยได้ทำการทดสอบกับระบบไฟฟ้า 4 กรณีระบบ คือ 1. ระบบที่มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุลต่อเข้ากับโหลดฮาร์มอนิกที่สมดุล 2. ระบบที่แหล่งจ่ายแรงดันสมดุลแต่โหลดฮาร์มอนิกไม่สมดุล 3. ระบบแหล่งจ่ายแรงดันไม่สมดุลขนาดแต่โหลดฮาร์มอนิกสมดุล และ 4. ระบบที่แหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นไซน์และโหลดฮาร์มอนิกเป็นชนิดสมดุล
3	2000	Dell'Aquila A., Delvino G., Liserre M., and Zanchetta P.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีเพื่อประมาณหาค่ารอบการทำงาน (duty cycle) ของพัลส์ควบคุมการสวิตช์อุปกรณ์ IGBT ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ ในบทความยังได้มีการเปรียบเทียบกับกรณีการใช้วิธีฮิสเทอรีซิสด้วยโดยผลการเปรียบเทียบพบว่าระบบการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าวิธีฮิสเทอรีซิส

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้
ตัวควบคุมฟัซซี(ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
4	2005	Dongmei Y, Qingding G., and Qing H.	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมฟัซซีสำหรับปรับขนาดของ แถบฮิสเตอร์ซิส ซึ่งการปรับขนาดของค่าแถบฮิสเตอร์ ซิสในบทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการ ควบคุมกระแสชดเชยให้เกาะตามกระแสอ้างอิง (tracking) ได้ดียิ่งขึ้น
5	2006	Lee T-S, Tzeng K-S and Chong M-S	นำเสนอใช้ตัวควบคุมฟัซซีสำหรับคำนวณปรับค่า K_p และ K_d ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบ PD iterative learning control ที่ใช้สำหรับควบคุมกระแสชดเชยของ วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบบนแกนดีคิว
6	2006	Bhende C. N., Mishra S., and Jain S. K.	นำเสนอใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบ Sugeno สำหรับควบคุม การทำงานของวงจรรองกำลังแอกทีฟ(ส่วนของค่า แรงดันบัลไฟตรง)โดยการจำลองสถานการณ์ได้นำ เสนอเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอใน กรณีโหลดฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลงขนาดต่าง ๆ
7	2008	Chen Y. , Fu B. and Li Q.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลัง แอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับ ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i แบบonline-auto-modulation ซึ่งจะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการ ควบคุม โดยการปรับตัวของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวใช้ กระบวนการควบคุมแบบฟัซซี
8	2010	ปราชรี ประสมศักดิ์	นำเสนองานวิจัยวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ตัว ควบคุมฟัซซีสำหรับควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัล ไฟตรงร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM บนแกนสาม เฟส สำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ พิจารณาในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล โดยตัวควบคุม ดังกล่าวพิจารณาการอนุมานฟัซซีแบบ Mamani

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรรอกำลังแอกทีฟโดยใช้

ตัวควบคุมพีชชี(ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
9	2011	Xia L., Taihang D., and Shengxue T.	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมพีชชีปรับขนาดแถบฮิสเตอร์รีชีสสำหรับควบคุมการบิดกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟสามเฟส โดยการปรับค่าแถบฮิสเตอร์รีชีสดังกล่าวเพื่อให้ความถี่ในการสวิตช์มีค่าคงที่ตลอดการควบคุมการบิดกระแสชดเชย
10	2011	Georgios T., and Georgios A.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธีฮิสเตอร์รีชีส โดยในบทความนี้ใช้ตัวควบคุมพีชชีสำหรับคำนวณหาขนาด error ของกระแสค่าใหม่สำหรับส่งเข้าตัวควบคุมฮิสเตอร์รีชีสเพื่อสร้างพัลส์ควบคุมที่เหมาะสมให้กับวงจรรอกำลังแอกทีฟ

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมพีชชีและวงจรรอกำลังแอกทีฟ

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	1997	Ingram, D.M.E. and Round	นำเสนอการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอกำลังแอกทีฟ (L_f) โดยใช้วิธีเลือกค่าที่มีขนาดไม่เกินค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f(max)}$) ที่ทำให้วงจรรอกำลังแอกทีฟสามารถบิดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะกระแสอ้างอิงที่มีความชันสูงสุดได้
2	1998	Thomas T., Haddad K., Joos G. and Jaafari	นำเสนอการออกแบบค่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ โดยอาศัยการเลือกค่าตัวเก็บประจุที่มากกว่าค่าตัวเก็บประจุต่ำสุด ($C_{dc,min}$) ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่เกี่ยวข้องกับค่ากำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่และวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
(ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
3	1999	Benchaita L., Saadate S. and Nia A.S	นำเสนอการออกแบบค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยการเลือกค่าแรงดันดังกล่าวควรมีขนาดมากกว่า 1.5 เท่าของค่าขอดแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC
4	1999	Wu C-J. and Liu G-Y.	นำเสนอการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่แบบเหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm: GA)
5	2008	Fang G., Kwok N. M. and Ha Q.	นำเสนอการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่แบบเหมาะสมที่สุดโดยอัตโนมัติโดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Partical Swram Optimaization: PSO)
6	2010	ปราชรี ประสมศักดิ์	นำเสนองานวิจัยวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่สำหรับควบคุมกระแสชดเชยร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี PWM บนแกนสามเฟส โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว(Adative Tabu search :ATS) โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายให้น้อยที่สุด

2.3 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมบทความที่ได้นำเสนอในบทนี้ เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในส่วนต่าง ๆ ซึ่งแต่ละผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอถือเป็นประโยชน์และเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัย สำหรับการทําวิจัยเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของการกําลังฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

บทที่ 3

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส สำหรับวงจรกรองกำลังแอคทีฟ

3.1 กล่าวนำ

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟจำเป็นต้องมีการตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอคทีฟ ซึ่งในปัจจุบันมีวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกหลายวิธี เช่น วิธีทฤษฎีกำลังรีแอคทีฟขณะหนึ่ง (Akagi H., Kanazawa Y. and Nabae A., 1984) วิธีแกนหมุนดีคิว (Takeda M., Ikeda K., Teramoto A. and Aritsuka T., 1988) วิธีฟูริเยร์ดีคิว (Sujitjorn S., Areerak K-L. and Kulwora-wanichpong T., 2007) วิธีการตรวจจับซิงโครนัส (Chen C. L., Lin C. E. and Huang C. L., 1992) และวิธีการรอบอ้างอิง $a-b-c$ (Chang G.W and Chen S.K., 2000) เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่มีสมรรถนะสูงในการตรวจจับฮาร์มอนิก อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบได้ภายหลังการชดเชยได้อีกด้วย นอกจากนี้ อัลกอริทึมการคำนวณของวิธีดังกล่าวยังมีความหลากหลายสามารถเลือกใช้ได้ตามวัตถุประสงค์ของการชดเชย ซึ่งแต่ละอัลกอริทึมดังกล่าวจะอาศัยการคำนวณที่ง่ายและเหมาะสมกับการโปรแกรมทางดิจิทัลอย่างยิ่ง วิธีการตรวจจับซิงโครนัสสามารถใช้ได้กับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสทั้งชนิดสมดุลและไม่สมดุล อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้าสมดุลเท่านั้น การนำเสนอเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส 3 อัลกอริทึมในหัวข้อที่ 3.2 และการพัฒนาการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสซึ่งเรียกวินิที่พัฒนาใหม่ว่าวิธีฟูริเยร์เอสดีจะนำเสนอในหัวข้อที่ 3.3 นอกจากนี้การเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบดั้งเดิมกับวิธีฟูริเยร์เอสดี จะได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.4 ดังต่อไปนี้

3.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส (Synchronous Detection: SD) หรือเรียกว่าวิธี SD ถูกแบ่งออกได้เป็น 3 อัลกอริทึมการคำนวณ ได้แก่ วิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบกระแสเท่ากัน (equal current synchronous detection: CSD) วิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบกำลังเท่ากัน (equal power synchronous detection: PSD) และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบอิมพีแดนซ์เท่ากัน (equal impedance synchronous detection: ZSD) โดยทั้ง 3 อัลกอริทึมจะใช้อินพุตสำหรับการคำนวณเหมือนกัน คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายสามเฟส (v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}) และค่า

กระแสไฟฟ้าทางด้านโหลดสามเฟส (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) ส่วนเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณ คือ ค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยทั้งสามเฟส ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) ให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ รายละเอียดขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกของแต่ละอัลกอริทึมสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.2.1 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับเชิงโครนัสแบบกระแสเท่ากัน

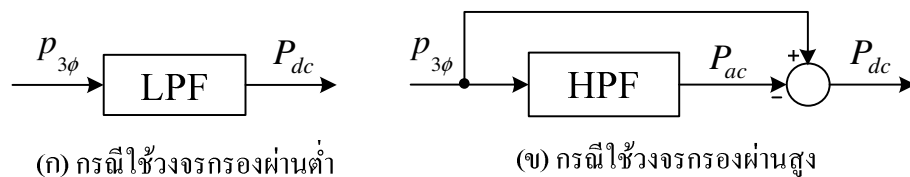
การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับเชิงโครนัสแบบกระแสเท่ากันหรือวิธี CSD เป็นวิธีที่ใช้การสมมุติว่าภายหลังการฉีดกระแสชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้าแล้วกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายทั้งสามเฟสจะอยู่ในสภาวะสมดุลดังสมการที่ (3.1) ซึ่งขั้นตอนการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

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

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}) ออกจากปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ (P_{ac}) ที่อยู่รวมกันในค่ากำลังแอกทีฟสามเฟส ($p_{3\phi}$) โดยใช้วงจรกรอง (Filter) ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งวงจรกรองผ่านต่ำ (Low pass Filter :LPF) หรือวงจรกรองผ่านสูง (High Pass Filter: HPF) โดยทั้งสองกรณีวงจรกรองแสดงโครงสร้างการแยกปริมาณแอกทีฟมูลฐานได้ดังรูปที่ 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)

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

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

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

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 คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายทั้งสามเฟส (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) โดยใช้สมการที่ (3.6) ถึง (3.8)

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

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

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

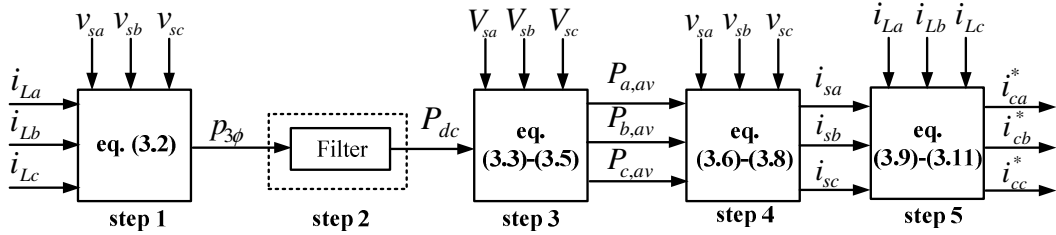
ขั้นที่ 5 คำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยทั้งสามเฟส ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) ให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟดังสมการที่ (3.9) ถึง (3.11) ดังนี้

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

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

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

จากขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกทั้ง 5 ขั้นตอนในข้างต้นสามารถเขียนอธิบายเป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ดังนี้

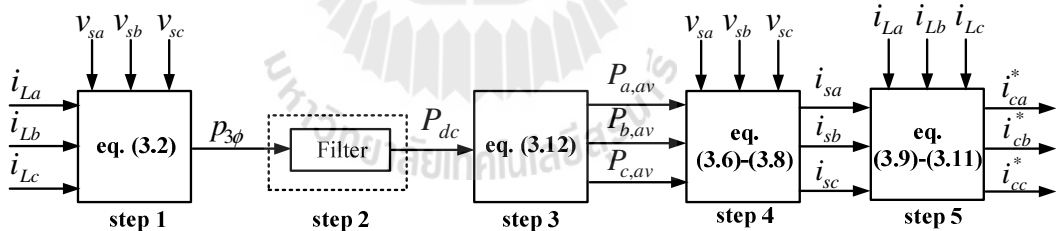


รูปที่ 3.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี CSD

3.2.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบกำลังเท่ากัน

วิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบกำลังเท่ากันหรือวิธี PSD เป็นวิธีที่ใช้การสมมุติว่า ภายหลังการฉีดกระแสซัดเซย ค่ากำลังแอกทีฟของโหลดในแต่ละเฟสจะต้องมีขนาดเท่ากัน ซึ่งรายละเอียดการคำนวณตรวจจับวิธีนี้จะเหมือนกับกรณีวิธี CSD ในทุกขั้นตอนยกเว้นขั้นตอนที่ 3 ซึ่งเป็นขั้นตอนการคำนวณค่ากำลังแอกทีฟเฉลี่ยแต่ละเฟส ($P_{a,av}, P_{b,av}, P_{c,av}$) โดยในกรณีวิธี PSD จะคำนวณหาค่ากำลังโดยใช้สมการที่ (3.12) แทน ซึ่งหลังจากที่คำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟของแต่ละเฟสได้แล้ว จะดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนที่ 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 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบอิมพีแดนซ์เท่ากัน

วิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบอิมพีแดนซ์เท่ากันหรือวิธี ZSD เป็นวิธีที่ใช้การสมมุติว่า ภายหลังการฉีดกระแสซัดเซยค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดในแต่ละเฟสจะต้องมีขนาดเท่ากันดังสมการที่ (3.13) ซึ่งขั้นตอนการคำนวณตรวจจับวิธีนี้ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนเช่นกัน โดยขั้นตอนที่ 1 2 และ 5 จะเหมือนกับ 2 วิธีที่ผ่านมา แต่ขั้นตอนที่ 3 วิธีนี้จะเป็นการดำเนินการคำนวณหาขนาดอิมพีแดนซ์โดยใช้สมการที่ (3.14) และขั้นตอนที่ 4 การคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการซัดเซยทั้งสามเฟส (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) วิธี ZSD ดำเนินการคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.15) ถึง (3.17) ตามลำดับ เมื่อ

คำนวณค่ากระแสดังกล่าวได้แล้วจึงดำเนินการตามขั้นตอนที่ 5 ต่อไปซึ่งแผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณตรวจสอบฮาร์มอนิกด้วยวิธี ZSD สามารถดูได้จากรูปที่ 3.4

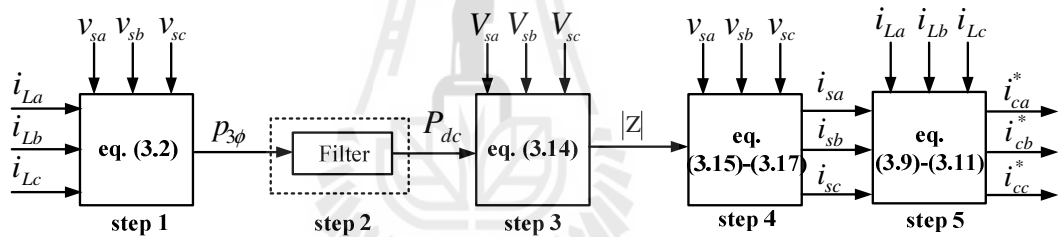
$$Z_a = Z_b = Z_c = |Z| \quad (3.13)$$

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

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

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

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

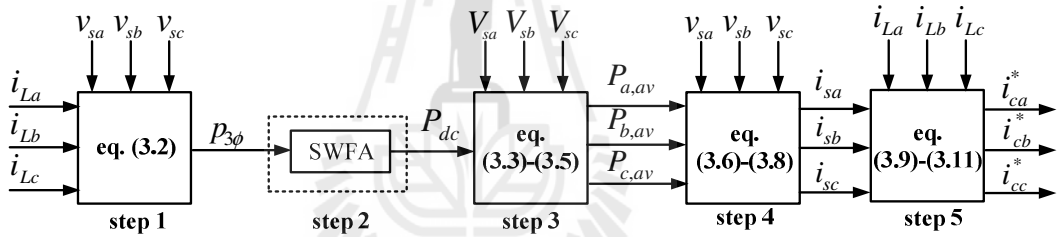


รูปที่ 3.4 การตรวจสอบฮาร์มอนิกด้วยวิธี ZSD

3.3 การตรวจสอบฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี

การตรวจสอบฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี (SD with Fourier: SDF) หรือเรียกว่าวิธี SDF เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นมาจากวิธี SD โดยจะใช้หลักการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดวเลื่อน (Sliding Window with Fourier Analysis: SWFA) (EI-Habrouk M. and Darwish M.K., 2001) เข้ามาช่วยแยกกำลังแอกทีฟมูลฐานออกจากปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟแทนการใช่วงจรกรองในขั้นตอนที่ 2 ของวิธี SD ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการแยกปริมาณฮาร์มอนิกให้ดียิ่งขึ้น ดังแผนภาพแสดงการคำนวณตรวจสอบดังรูปที่ 3.5 (กรณีการใช้ SWFA กับวิธี CSD) จากรูปดังกล่าวการใช้วิธี SWFA ของวิธี SDF จะเริ่มต้นจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของสมการออยเลอร์-ฟูริเยร์ (Euler-Fourier formulas) ของกำลังแอกทีฟสามเฟส ($P_{3\phi}$) ดังสมการที่ (3.18) ซึ่งมีองค์ประกอบสองเทอม คือ เทอมที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณกระแสตรง (dc component) และเทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ (ac component) โดยในที่นี้เทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณ

กระแสตรงจะเปรียบ เสมือนเป็นปริมาณแอกทีฟมูลฐาน (P_{dc}) ส่วนเทอมที่เป็นองค์ประกอบ สัญญาณกระแสสลับจะเปรียบเสมือนปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ (P_{ac}) การแยกปริมาณทั้งสองออกจากกันโดยใช้วิธี SWFA จะเริ่มต้นจากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A_0 โดยการรับข้อมูลค่ากำลังแอกทีฟสามเฟสหรือ $p_{3\phi}$ มาหนึ่งคาบจำนวน N ข้อมูลเพื่อคำนวณตามสมการที่ (3.19) (ช่วงเวลาในการคำนวณนี้เป็นช่วงเวลาในการกำหนดค่าเริ่มต้นของ SDF) หลังจากนั้นจึงเก็บค่าดังกล่าวในรูปแบบของลำดับแถวดังรูปที่ 3.6 ส่วนในรอบการทำงานถัดไปจะเริ่มต้นจากการรับข้อมูล $p_{3\phi}$ ค่าใหม่ ($p_{3\phi}(N_0 + N)$) และลบด้วยข้อมูล $p_{3\phi}$ ค่าเก่า ($p_{3\phi}(N_0 - 1)$) ออกเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A_0 ค่าใหม่ ($A_0^{(new)}$) ดังสมการที่ (3.20) โดยที่ ($A_0^{(old)}$) คือ ค่าสัมประสิทธิ์ A_0 ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้ ซึ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_0^{(new)}$ ในทุกรอบของการรับข้อมูล $p_{3\phi}$ ค่าใหม่ จะทำให้ได้ค่ากำลังแอกทีฟมูลฐาน (P_{dc}) ค่าใหม่ในทุกรอบจากการคำนวณตามสมการที่ (3.21) โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับช่วงเวลาชักตัวอย่าง (sampling time) T วินาที ซึ่งหลังจากที่คำนวณได้ค่า P_{dc} เรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกตามวิธี SD ในขั้นที่ 3 ถึงขั้นที่ 5 ต่อไป



รูปที่ 3.5 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF

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

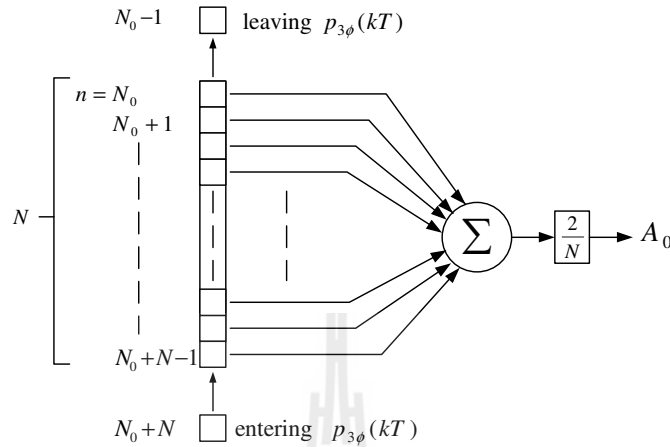
$$\text{โดยที่ } A_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_{3\phi}(nT) \cos(nh\omega T) \quad ; h=0,1,2,\dots,\infty$$

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

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

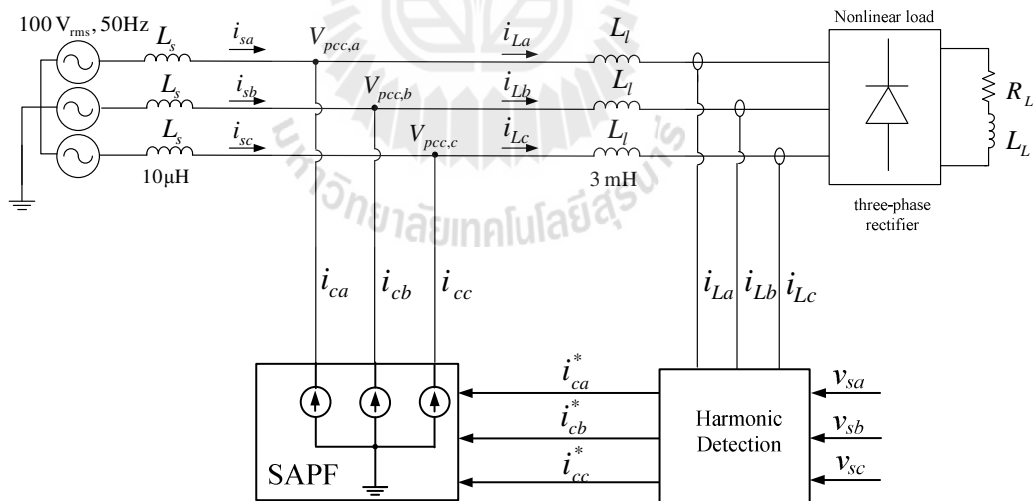
$$A_0^{(new)} = A_0^{(old)} - \frac{2}{N} p_{3\phi}(N_0 - 1)T + \frac{2}{N} p_{3\phi}(N_0 + N)T \quad (3.20)$$

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



รูปที่ 3.6 แผนภาพอธิบายการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A_0 ของ SWFA

3.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับเชิงโครนัสกับวิธีฟูริเยร์เอสดี



รูปที่ 3.7 ระบบสำหรับการตรวจสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก

ระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกเพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD กับวิธี SDF แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 จากรูปดังกล่าว ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุลพิกัดแรงดันเท่ากับ $100 \text{ V}_{\text{rms}}$ ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz ต่อเข้ากับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น คือ วงจรไดโอดเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดความ

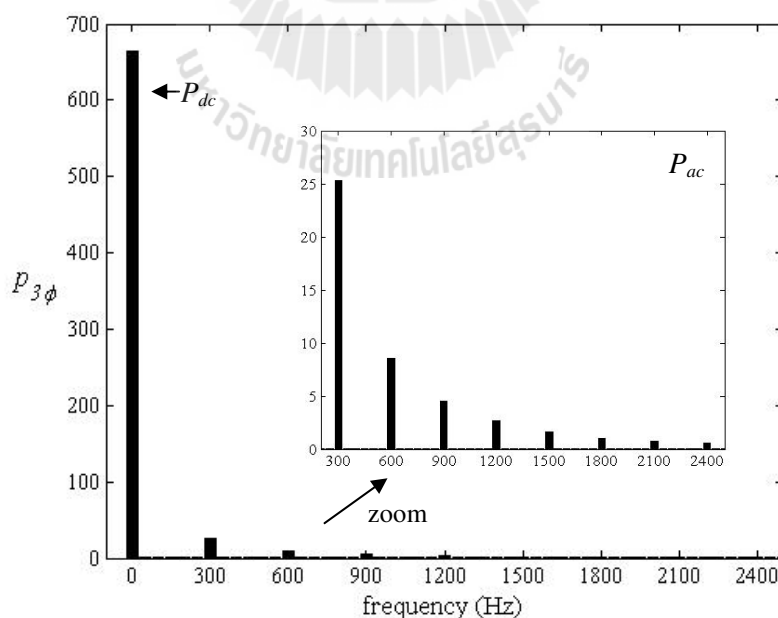
ต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยโหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า

ส่วนที่ 2 บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิก (harmonic detection) ทำหน้าที่คำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยในที่นี้จะทำการเปรียบเทียบวิธี SD กับวิธี SDF

ส่วนที่ 3 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยในที่นี้โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติ ทั้งนี้เพื่อพิจารณาเฉพาะผลการตรวจจับฮาร์มอนิกโดยไม่พิจารณาถึงผลกระทบของโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ดังนั้นจึงทำให้รูปสัญญาณกระแสชดเชย (i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}) มีลักษณะเหมือนกับรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) ที่ได้จากการคำนวณตรวจจับทุกประการ

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่พิจารณา

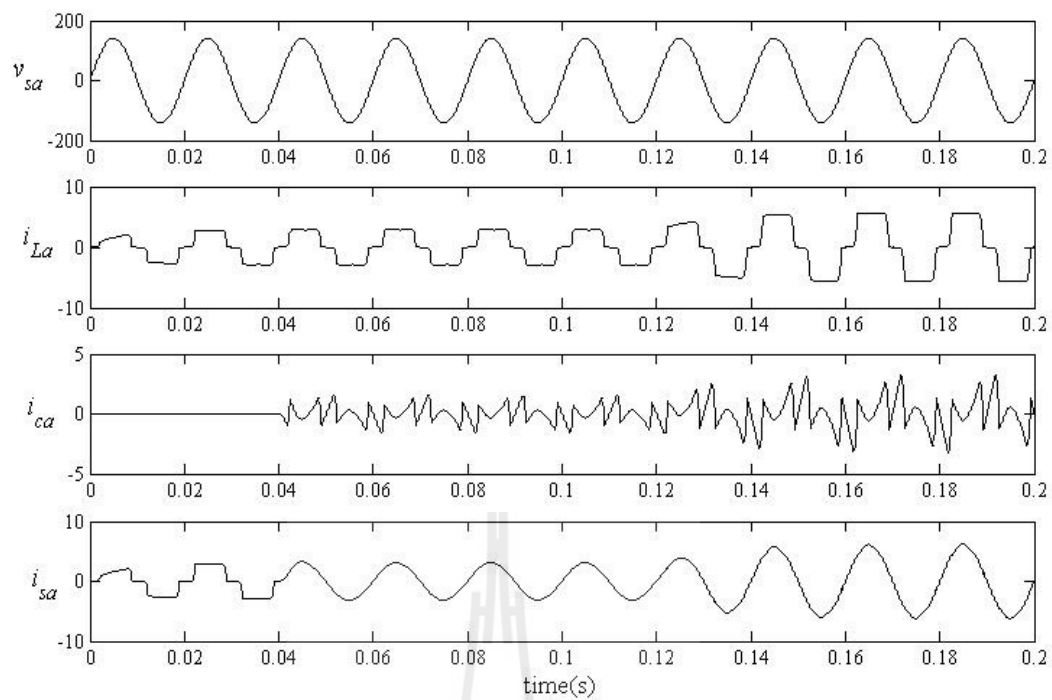
พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง	$V_s = 100 \text{ V}_{\text{rms}}, f = 50 \text{ Hz}$ $L_s = 10 \mu\text{H}, L_l = 3 \text{ mH}$
โหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟส	โหลดชุดที่ 1 $R_L = 80 \Omega, L_L = 0.5 \text{ H}$ โหลดชุดที่ 2 $R_L = 40 \Omega, L_L = 0.5 \text{ H}$



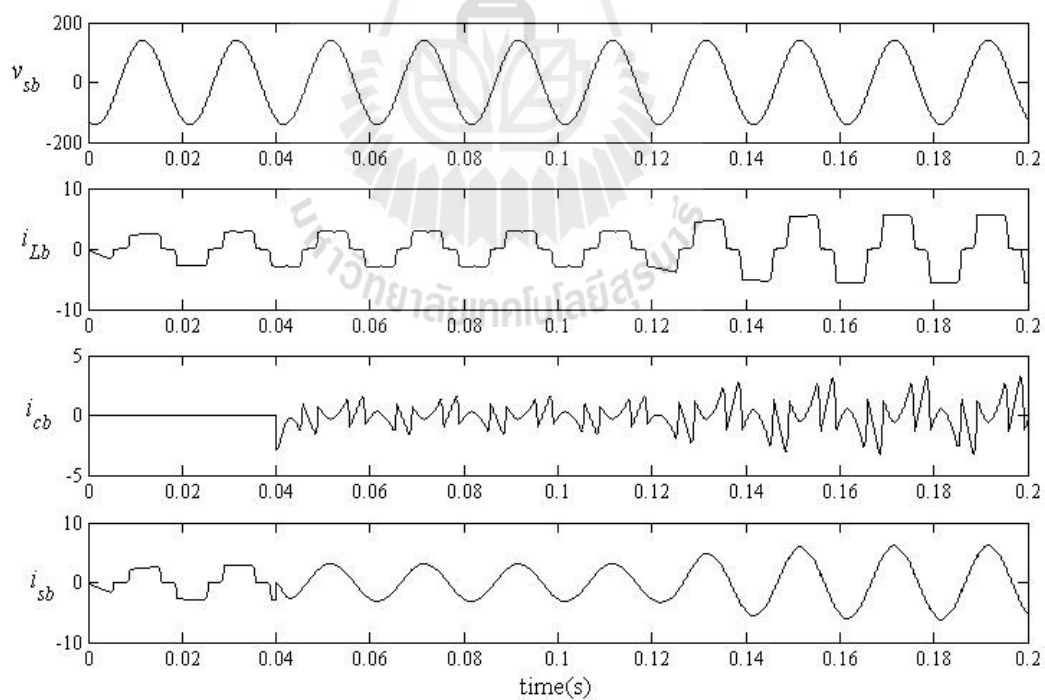
รูปที่ 3.8 สเปกตรัมของกำลังแอกทีฟสามเฟส

การเปรียบเทียบการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD กับวิธี SDF ในที่นี้จะเลือกใช้เฉพาะ อัลกอริทึมการคำนวณแบบ CSD ทั้งนี้เนื่องจากระบบที่พิจารณาเป็นระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส สมดุลและภายหลังการชดเชยมีเป้าหมายต้องการให้กระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีขนาดเท่ากันและ สมดุลด้วยเช่นกัน สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์เพื่อ เปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกแสดงไว้ดังตารางที่ 3.1 จากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าว เมื่อทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Simulink ร่วมกับชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blockset: PSB) พบว่า ค่ากำลังแอกทีฟสามเฟส ($P_{3\phi}$) ประกอบด้วยปริมาณกำลังแอกทีฟมูลฐาน (P_{dc}) และปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ (P_{ac}) แสดงดังสเปกตรัมในรูปที่ 3.8 โดย ปริมาณกำลังแอกทีฟมูลฐานปรากฏอยู่ที่ตำแหน่งค่าความถี่เท่ากับ 0 Hz ส่วนปริมาณฮาร์มอนิก ตำแหน่งแรกปรากฏที่ค่าความถี่เท่ากับ 300 Hz (ปริมาณฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่ำสุด) ดังรูปที่ 3.8 จาก ผลสเปกตรัมในข้างต้น การออกแบบเพื่อเลือกค่าความถี่ตัด (f_c) ของวงจรกรองสำหรับใช้แยก ปริมาณมูลฐานออกจากปริมาณฮาร์มอนิกในขั้นตอนที่ 2 ของวิธี SD จึงสามารถเลือกได้ภายในช่วง $0 \text{ Hz} < f_c < 300 \text{ Hz}$ โดยในที่นี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบเลือกค่าความถี่ตัดเท่ากับ 150 Hz และเลือก ชนิดวงจรกรองเป็นวงจรกรองผ่านต่ำอันดับ 2 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกับการใช้ SWFA ของวิธี SDF

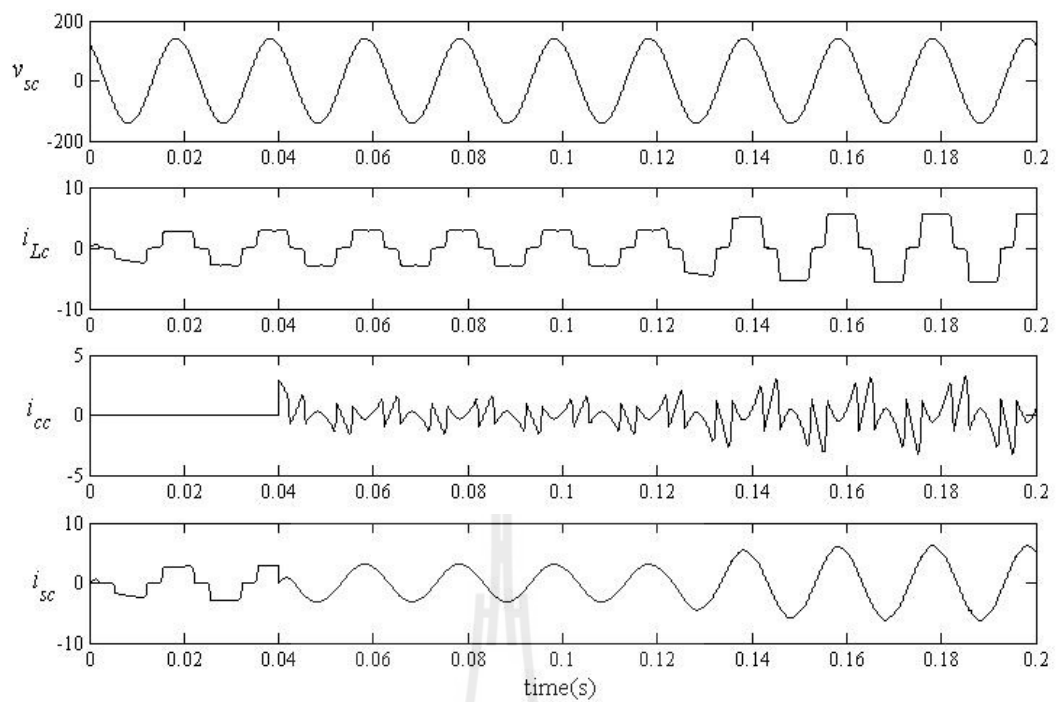
ผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับฮาร์มอนิกของระบบรูปที่ 3.7 ของเฟส a b และ c กรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกใช้วิธี SD แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 ถึง 3.11 ตามลำดับ และกรณีวิธี SDF แสดงได้ดังรูปที่ 3.12 ถึง 3.14 โดยการจำลองสถานการณ์กำหนดให้เริ่มทำการชดเชยกระแส ฮาร์มอนิกที่เวลาเท่ากับ 0.04 วินาทีเป็นต้นไป และกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงโหลดของวงจรเรียง กระแสจากโหลดชุดที่ 1 เป็นโหลดชุดที่ 2 แบบฉับพลันที่เวลา 0.12 วินาที



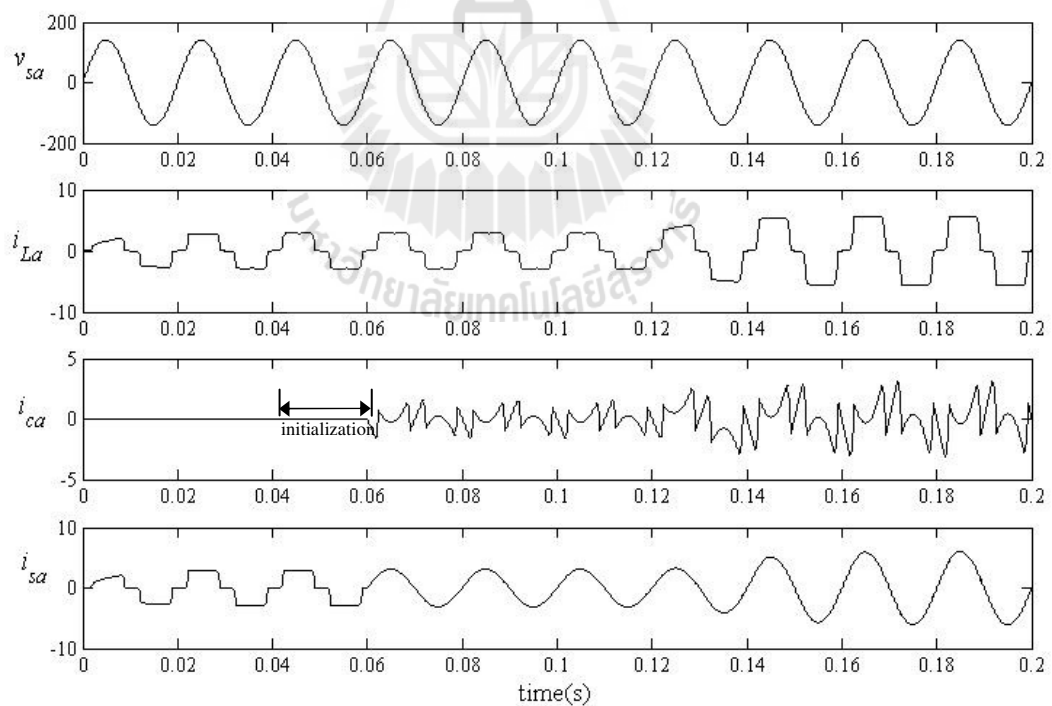
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส a กรณีวิธี SD



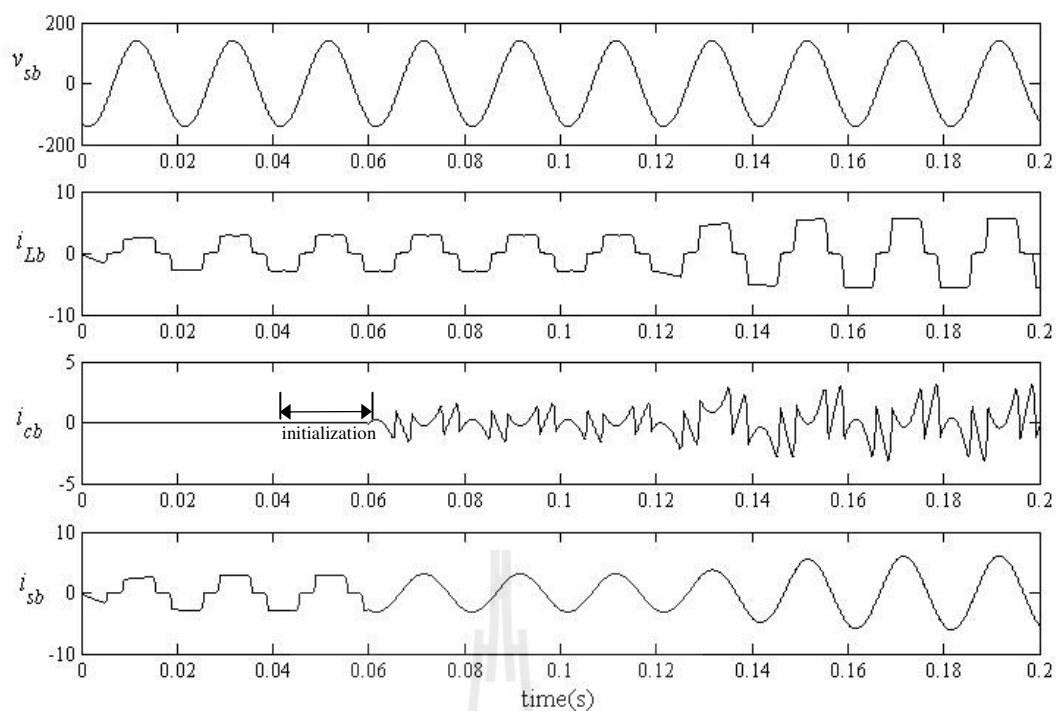
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส b กรณีวิธี SD



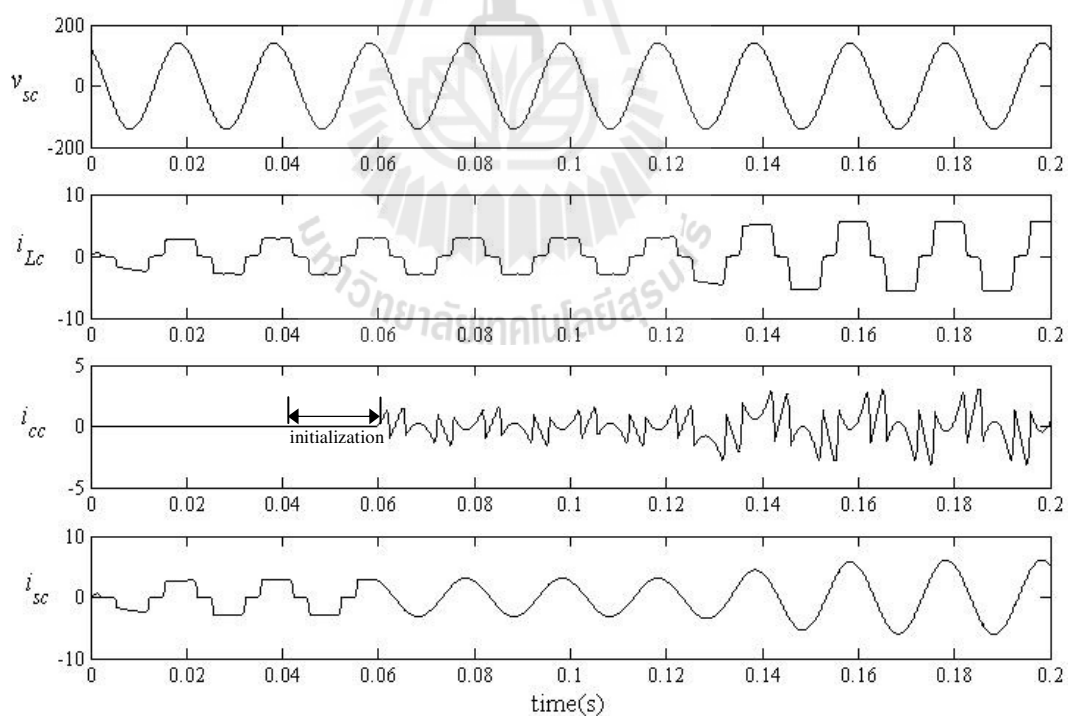
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส c กรณีวิธี SD



รูปที่ 3.12 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส a กรณีวิธี SDF



รูปที่ 3.13 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส b กรณีวิธี SDF



รูปที่ 3.14 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส c กรณีวิธี SDF

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 3.9 ถึง 3.11 กรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SD สังเกตได้ว่า รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายทั้งสามเฟส (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) หลังการฉีดกระแสชดเชย (i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}) ตั้งแต่เวลา 0.04 วินาที เป็นต้นไปมีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปสัญญาณกระแสก่อนการชดเชยที่มีลักษณะเช่นเดียวกับกระแสทางด้านโหลด (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) ในช่วงเวลาดังกล่าวตั้งแต่ 0 ถึง 0.04 วินาที และเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันที่เวลา 0.12 วินาที ทำให้ค่ากระแสขดที่โหลดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3 A เป็น 6 A สังเกตได้ว่าวิธี SD สามารถคำนวณค่ากระแสอ้างอิง ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) ได้คล้อยตามขนาดที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของกระแสโหลดได้ (รูปสัญญาณของ $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ เหมือนกับ i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}) ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายตั้งแต่เวลา 0.12 วินาที เป็นต้นไปมีลักษณะเป็นไซน์และมีขนาดกระแสขดเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.9 3.10 และ 3.11 สำหรับเฟส a b และ c ตามลำดับโดยค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายทั้งสามเฟสดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 1.62% 1.63% และ 1.62% ตามลำดับเฟส (ดูได้จากตารางที่ 3.2) สำหรับกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SDF ผลการจำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟสแสดงดังรูปที่ 3.12 ถึง 3.14 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยทั้งสามเฟสดังกล่าวตั้งแต่เวลา 0.06 วินาที เป็นต้นไปมีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยในช่วงเวลา 0.04 ถึง 0.06 วินาที (1 คาบรูปสัญญาณ) คือ ช่วงเวลาที่ใช้สำหรับการกำหนดค่าเริ่มต้น (initialization) ของการคำนวณวิธี SDF จากนั้นเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจะเห็นได้ว่าวิธี SDF ก็สามารถคำนวณค่ากระแสอ้างอิงได้ตามขนาดที่เพิ่มขึ้นของกระแสโหลดเช่นกัน ซึ่งส่งผลให้กระแสทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชยทั้งสามเฟสมีลักษณะเป็นไซน์และมีขนาดกระแสที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 3.12 ถึง 3.14 โดยค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายของเฟส a b และ c ของกรณีวิธี SDF มีค่าเท่ากับ 0.59% 0.63% และ 0.63% ตามลำดับเฟสดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

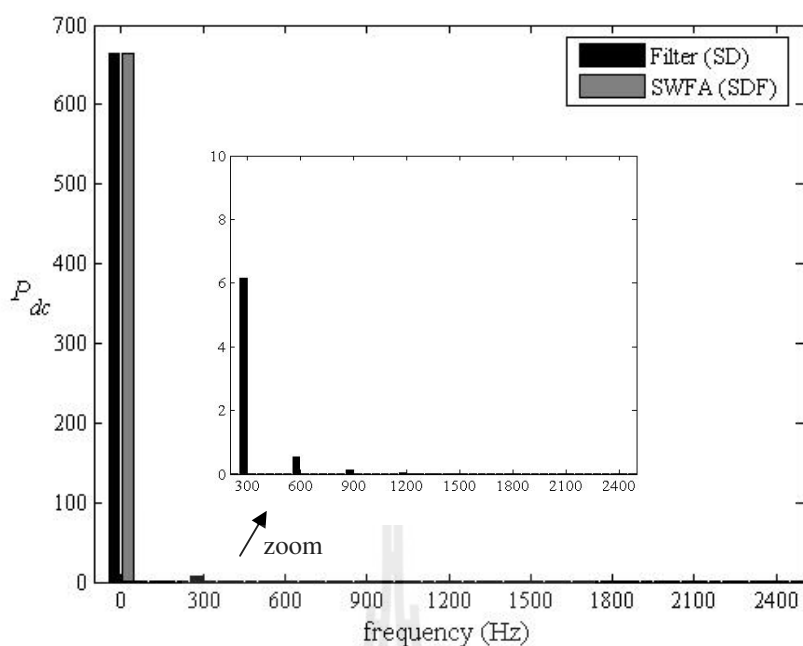
หมายเหตุ: การคำนวณค่า %THD ของกระแสในแต่ละเฟสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.22 และการคำนวณค่า %THD เฉลี่ยทั้งสามเฟสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.23

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

โดยที่ I_n คือ ค่า RMS ของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ n

I_1 คือ ค่า RMS ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

$$\%THD_{เฉลี่ย} = \sqrt{\frac{\sum_{k=a,b,c} \%THD_k^2}{3}} \quad (3.23)$$



รูปที่ 3.15 สเปกตรัมของกำลังแอกทีฟมูลฐานที่ได้จากการแยกออกจากปริมาณฮาร์มอนิกของ
กำลังแอกทีฟโดยใช้ Filter ของวิธี SD และที่ใช้ SWFA ของวิธี SDF

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD กับวิธี SDF

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย (i_s)		
	ค่า %THD ก่อนการชดเชย	ค่า %THD หลังการชดเชย	
		วิธี SD	วิธี SDF
<i>a</i>	26.37	1.63	0.59
<i>b</i>	26.40	1.62	0.63
<i>c</i>	26.40	1.63	0.63
เฉลี่ยทั้งสามเฟส	26.39	1.63	0.62

จากตารางที่ 3.2 ค่า %THD เฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายก่อนการชดเชยมีค่าสูงเท่ากับ 26.39% ในขณะที่ภายหลังการชดเชยกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกใช้วิธี SD มีค่า %THD เฉลี่ยเท่ากับ 1.63% ส่วนกรณีวิธี SDF ให้ค่า %THD เฉลี่ยเท่ากับ 0.62% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลจากการใช้วิธี SD ทั้งนี้เนื่องจากผลสมรรถนะของการแยกปริมาณแอกทีฟมูลฐานออกจากปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟของวิธี SDF ที่ใช้ SWFA ซึ่งมีความถูกต้องและแม่นยำสูงกว่าการใช้ Filter ของวิธี SD ดังผลสเปกตรัมกำลังแอกทีฟมูลฐาน (P_{dc}) รูปที่ 3.15 จากรูปดังกล่าวจะสังเกตเห็นได้ว่า ปริมาณแอกทีฟมูลฐานที่ได้จากการแยกโดยใช้ Filter ของวิธี SD ยังคงมีปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟปรากฏเหลืออยู่ที่ความถี่ 300 Hz 600 Hz 900 Hz และ 1200 Hz ในขณะที่

ที่ใช้ SWFA ของวิธี SDF สามารถแยกปริมาณแอกทีฟมูลฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีโดยไม่ปรากฏเห็นปริมาณฮาร์โมนิกของกำลังแอกทีฟซึ่งจากผลดังกล่าวจึงส่งผลให้การตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี SDF มีสมรรถนะการตรวจจับฮาร์โมนิกที่ดีกว่าวิธี SD

3.5 สรุป

การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการตรวจจับฮาร์โมนิกเพื่อกำหนดค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยในบทนี้ได้นำเสนอวิธี SD และพัฒนาได้วิธีใหม่คือวิธี SDF ซึ่งผลการเปรียบเทียบการตรวจจับฮาร์โมนิกพบว่า วิธี SDF ให้สมรรถนะการตรวจจับฮาร์โมนิกที่ดีกว่าวิธี SD โดยค่า $\%THD$ เฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชยของวิธี SD เท่ากับ 1.63% ในขณะที่วิธี SDF ให้ค่า $\%THD$ เฉลี่ยที่น้อยกว่าเท่ากับ 0.62%



บทที่ 4

การสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี

โดยใช้บอร์ด eZdsp™ F28335

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้นำเสนอการสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดีโดยใช้บอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ซึ่งเนื้อหาประกอบด้วย การอธิบายอุปกรณ์ตรวจรู้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ในหัวข้อที่ 4.2 การอธิบายโครงสร้างและคุณสมบัติต่าง ๆ ของบอร์ด eZdsp™ F28335 ในหัวข้อที่ 4.3 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในบอร์ด eZdsp™ F28335 นำเสนอไว้หัวข้อที่ 4.4 รายละเอียดพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตต่าง ๆ สำหรับเชื่อมต่อใช้งานแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.5 การใช้ งานวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกโดยใช้ไอซี DAC712 อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.6 การ โปรแกรมชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดีและการทดสอบชุดตรวจจับฮาร์มอนิกได้ นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

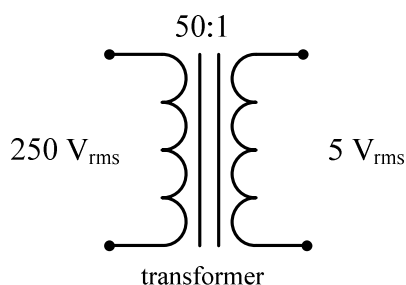
4.2 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซึ่งโครนส์ใช้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็น อินพุตสำหรับการคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงเป็นการ นำเสนออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้างานนี้

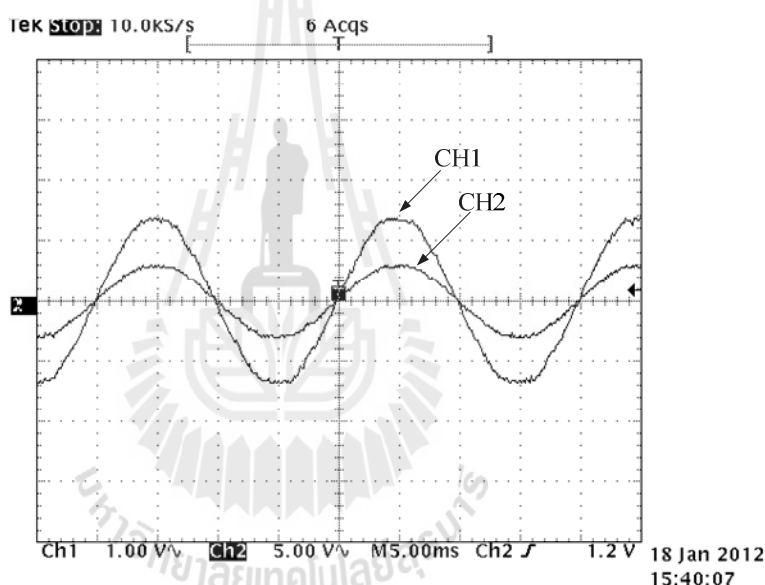
4.2.1 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงดันไฟฟ้า

การตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าสำหรับการสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์ เอสดี (SDF) ทำการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส (v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}) โดยในงานวิจัยนี้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสจำนวน 3 ตัว เป็นตัวตรวจวัดค่า แรงดันไฟฟ้า (voltage sensor) ในแต่ละเฟส ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสเท่ากับ $100\text{ V}_{\text{rms}}$ ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้หม้อแปลงที่มีค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ $250\text{ V}_{\text{rms}}$ และพิกัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิเท่ากับ 5 V_{rms} ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งได้มีการทดสอบหม้อแปลง ดังกล่าวโดยการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าของระบบที่พิจารณา ซึ่งผลการทดสอบกรณีเฟส a ดูได้จาก รูปที่ 4.2 จากรูปดังกล่าวช่องสัญญาณที่ 1 (CH 1) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิซึ่งมีค่า เท่ากับ $100\text{ V}_{\text{rms}}$ (ค่ายอดแรงดันประมาณ 142 V) โดยค่าที่อ่านได้จากเครื่องออสซิลอโคป CH 1 อ่านค่ายอดแรงดันประมาณเท่ากับ 1.42V ซึ่งจะต้องคูณด้วย 100 เนื่องจากการตรวจวัดผ่านอุปกรณ์ ป้องกันความเสียหายของออสซิลอโคป โดยอุปกรณ์ดังกล่าวทำหน้าที่ลดทอนค่าแรงดันไฟฟ้าใน

อัตราส่วน 1 ต่อ 100 ก่อนเข้าออสซิลอโคป สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิได้จากช่องสัญญาณที่ 2 (CH 2) ซึ่งมีค่ายอดแรงดันประมาณ 3 V



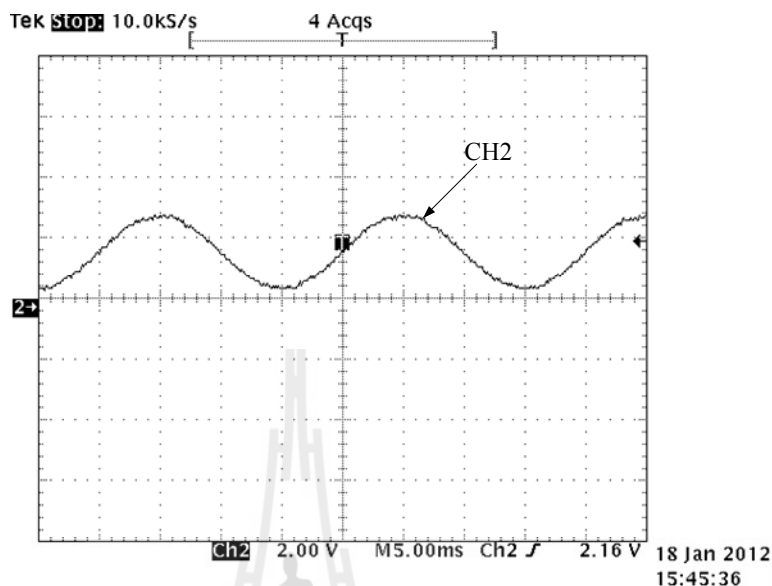
รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงดันไฟฟ้า

จากผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงดันไฟฟ้าสังเกตได้ว่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีเฟสตรงกัน ซึ่งหมายถึงแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิไม่มีการเลื่อนเฟส นอกจากนี้สังเกตได้ว่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิมีทั้งค่าบวกและลบ ซึ่งก่อนที่จะทำการส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้างกล่าวเข้าบอร์ด eZdspTM F28335 จะต้องทำการปรับขนาดและเลือกรูปสัญญาณให้มีแต่ค่าบวก ทั้งนี้เนื่องจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในบอร์ด eZdspTM F28335 รับค่าอินพุตได้ในช่วง 0 ถึง 3 V เท่านั้น การปรับขนาดและเลือกรูปสัญญาณให้อยู่ในช่วงที่กำหนดดังกล่าวผู้วิจัยได้ใช้วงจรปรัแต่งสัญญาณ (signal adjust circuit) เป็นตัวดำเนินการ ซึ่งหลังจากรูปสัญญาณไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิดัง CH 2 ในรูปที่ 4.2 ผ่านเข้าวงจรดังกล่าวจะมี

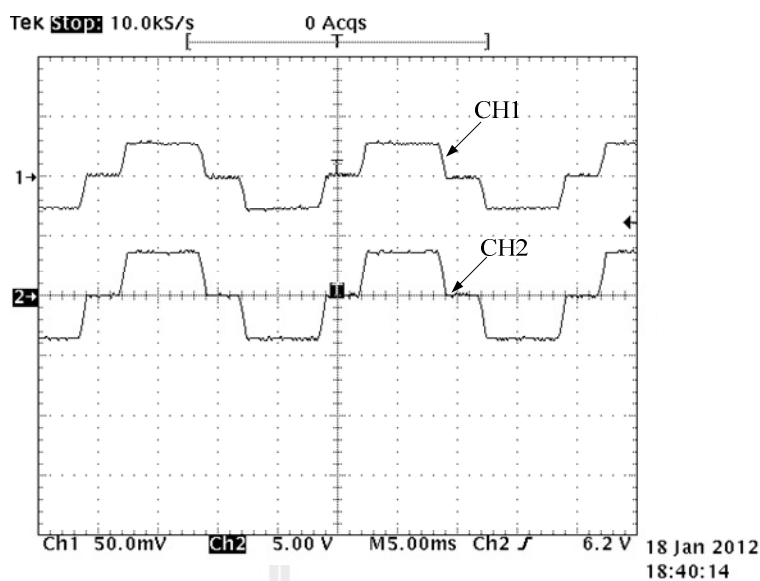
ลักษณะรูปสัญญาณเอาต์พุตแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามีการเคลื่อนขึ้นอยู่ในฝั่งบวกทั้งหมด และมีค่าไม่เกิน 3 V ตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.3 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรปรั้งแต่งสัญญาณกรณีตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

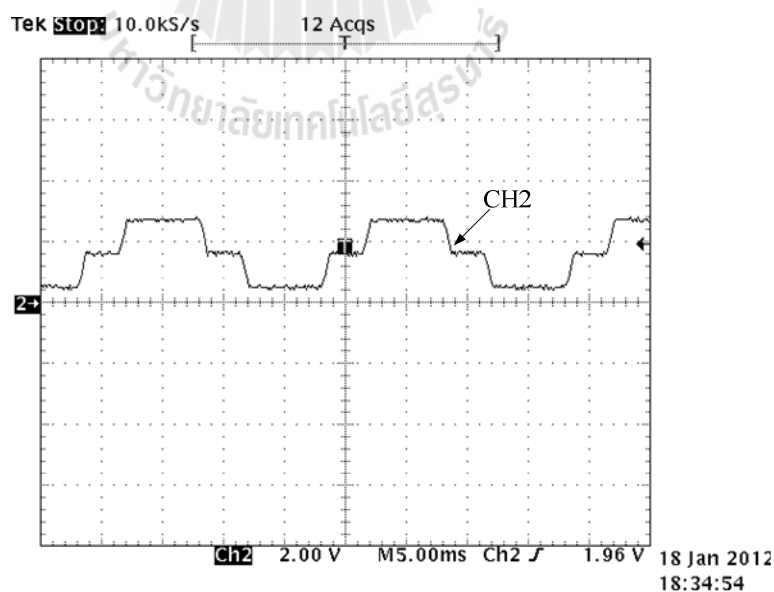
4.2.2 อุปกรณ์ตรวจรู้กระแสไฟฟ้า

การตรวจวัดกระแสไฟฟ้าสำหรับการสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ทำการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าทางด้านโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังทั้งสามเฟส (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}) โดยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจวัดกระแสไฟฟ้างานวิจัยนี้ใช้ของบริษัท Koshin Electric Corporation รุ่น HC-PSG ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้กระแสไฟฟ้าแบบฮอลล์ (hall current sensor) มีย่านการตรวจวัดในช่วง 0 ถึง 3 A_{rms} การทดสอบอุปกรณ์ดังกล่าวทำการตรวจวัดกระแสของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งระบบดังกล่าวต่อเข้ากับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์มีโหลดความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำขนาดกระแสของโหลดดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 2.01 A_{rms} (ค่าขดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.85 A) ผลการตรวจวัดกระแสไฟฟ้ากรณีเฟส a แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 จากรูปดังกล่าว CH 1 คือ รูปสัญญาณที่ได้จากการใช้โพรบวัดกระแส (current probe) เป็นตัวตรวจวัด ซึ่งอ่านค่ายอดได้ประมาณ 28.5 mV ซึ่งเท่ากับ 2.85 A ทั้งนี้เนื่องจากโพรบดังกล่าวมีอัตราส่วนในการวัด 10 mV ต่อ 1 A สำหรับ CH 2 คือ รูปสัญญาณที่ได้จากการใช้อุปกรณ์ตรวจรู้กระแสที่ใช้ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะให้ค่าเอาต์พุตในรูปของค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอ่านค่ายอดของแรงดันเอาต์พุตได้เท่ากับ 3.6 V นอกจากนี้สังเกตได้ว่าเฟสของรูปสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดโดยใช้โพรบวัดกระแส (CH 1) และจากอุปกรณ์ตรวจรู้กระแสที่ผู้วิจัยใช้ (CH 2) มีเฟสตรงกัน



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจรู้กระแสไฟฟ้า

จากผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจรู้กระแสไฟฟ้าสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้ดังกล่าว (CH 2) มีทั้งค่าบวกและค่าลบ ดังนั้นก่อนส่งสัญญาณดังกล่าวไปยังบอร์ด eZdsp™ F28335 จำเป็นต้องผ่านวงจรปรัแต่งสัญญาณก่อน เพื่อเปลี่ยนรูปสัญญาณดังกล่าวให้มีแต่ค่าบวกทั้งหมด และอยู่ในช่วง 0 ถึง 3 V เช่นเดียวกับกรณีการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จากวงจรปรัแต่งสัญญาณกรณีการตรวจวัดกระแสไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณมีการเลื่อนขึ้นอยู่ในฝั่งบวกทั้งหมด และมีค่าไม่เกิน 3 V ตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.5 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรปรัแต่งสัญญาณกรณีตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

4.3 โครงสร้างและคุณสมบัติของบอร์ด eZdsp™ F28335

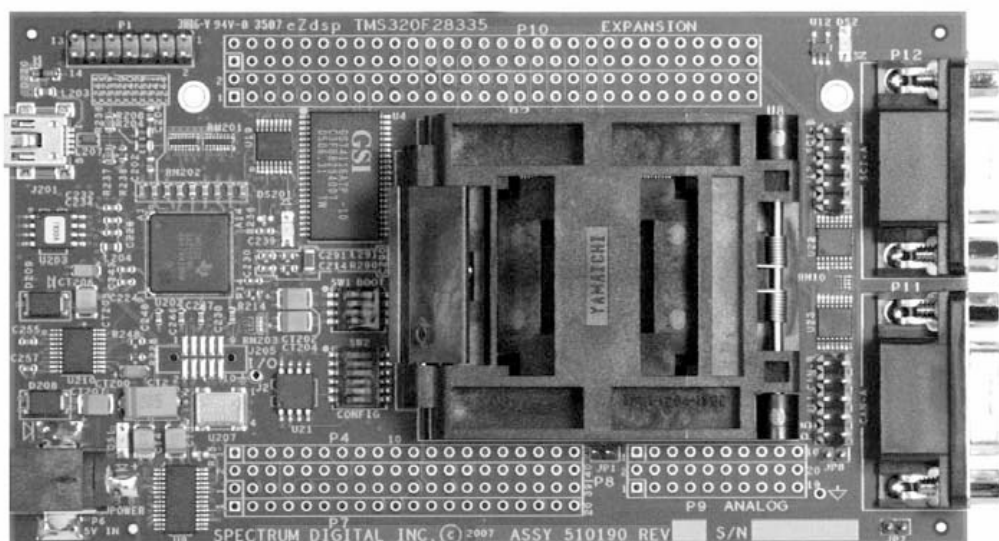
โครงสร้างสถาปัตยกรรมของบอร์ด eZdsp™ F28335 แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งบอร์ดดังกล่าวมีคุณสมบัติทางด้านฮาร์ดแวร์ (hardware features) และซอฟต์แวร์โปรแกรมที่ใช้ควบคุม (software features) ดังนี้

คุณสมบัติทางด้านฮาร์ดแวร์

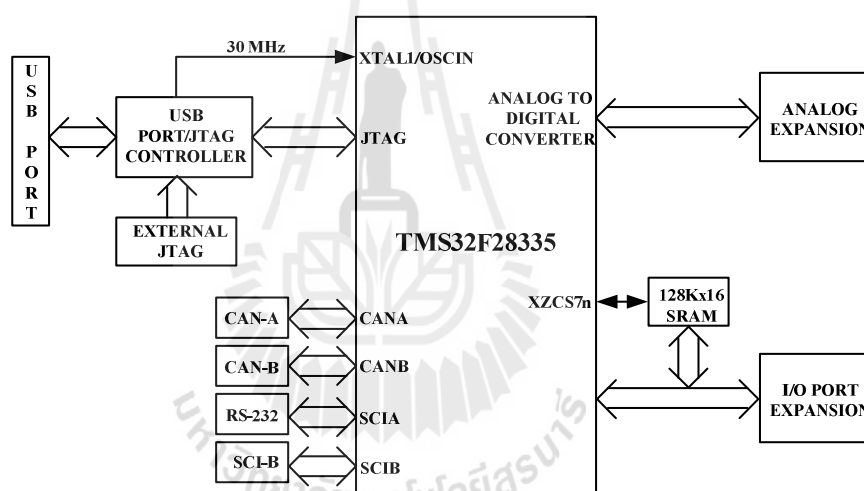
- TMS320F28335 Digital Signal Controller
- 150 Mhz. operating speed
- On chip 32-bit floating point unit
- 68K bytes on-chip RAM
- 512K bytes on-chip Flash memory
- 256K bytes off-chip SRAM memory
- On chip 12 bit Analog to Digital (A/D) converter with 16 input channels
- 30 MHz input clock
- On board RS-232 connector with line driver
- On board CAN 2.0 interface with line driver and connector
- Multiple Expansion Connectors (analog, I/O)
- On board embedded USB JTAG Controller
- 5-volt only operation with supplied AC adapter
- On board IEEE 1149.1 JTAG emulation connector

ซอฟต์แวร์โปรแกรมที่ใช้ควบคุม

- TI F28xx Code Composer Studio™ Integrated Development Environment, Version 3.3
- Texas Instruments' Flash APIs to support the F28335
- Texas Instruments' F28335 header files and example software



รูปที่ 4.6 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของบอร์ด eZdsp™ F28335



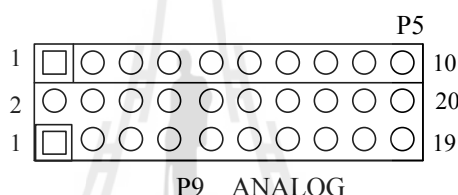
รูปที่ 4.7 บล็อกไดอะแกรมของบอร์ด eZdsp™ F28335

จากรูปที่ 4.6 สามารถเขียนอธิบายการเชื่อมต่อส่วนประกอบหลัก ๆ ภายในบอร์ดเป็นแบบแผนภาพบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.7 จากรูปดังกล่าวประกอบด้วยชิพซีพียู (CPU) ประมวลผลแบบดิจิทัลรุ่น TMS320F28335 เป็นของบริษัท Texas Instruments มีความเร็วในการประมวลผลของซีพียูเท่ากับ 150 MHz สถาปัตยกรรมของซีพียูเป็น 32 บิต ซึ่งเชื่อมต่อกับส่วนต่าง ๆ คือ พอร์ตเชื่อมต่อวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (analog expansion) พอร์ตเชื่อมต่ออินพุตและเอาต์พุต (I/O expansion) และพอร์ตสำหรับการส่งผ่านข้อมูลอื่น ๆ ได้แก่ พอร์ต CAN-A CAN-B RS232 และ SCI-B นอกจากนี้ การเชื่อมต่อการใช้งานระหว่างบอร์ดและคอมพิวเตอร์ควบคุมสามารถเชื่อมต่อโดยผ่านทางพอร์ต USB และจะส่งสัญญาณเพื่อติดต่อสื่อสารกับซีพียูผ่านทาง

พอร์ต JTAG ดังรูปที่ 4.7 โดยมีอินพุตสัญญาณนาฬิกาควบคุม (input clock) เท่ากับ 30 MHz เชื่อมต่อเข้ากับพอร์ต XTAL1/OSCIN

4.4 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในชิปซีพียู TMS320F28335

ชิปซีพียู TMS320F28335 มีวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ภายในตัว จำนวน 16 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีความแยกชัด (resolution) 12 บิต โดยจะกระจายอยู่ใน 2 พอร์ต คือ พอร์ต P5 และ P9 ซึ่งการจัดเรียงตำแหน่งพิน (pin) ของพอร์ต P5 จำนวน 10 พิน และ พอร์ต P9 จำนวน 20 พิน ดูได้จากรูปที่ 4.8 และรายละเอียดของแต่ละตำแหน่งพินแสดงไว้ดังตาราง ที่ 4.1 การสร้างชุดตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี SDF จะต้องใช้พอร์ตแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลทั้งหมด 6 พินด้วยกันเพื่อรับสัญญาณอินพุตการคำนวณ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสาม เฟส (v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}) และค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้งานพิน 2 4 6 8 10 และ 12 ของพอร์ต 9 (ADCINA0 ถึง ADCINA5) ของตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งพินของช่องสัญญาณ A/D ของบอร์ด eZdspTM F28335

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดแต่ละพินของพอร์ต P5 และ P9 ใน eZdspTM F28335

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.

4.5 พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของบอร์ด eZdsp™ F28335

บอร์ด eZdsp™ F28335 มีพอร์ตอินพุตและเอาต์พุต (I/O ports) สำหรับใช้เชื่อมต่อทั้งหมด 4 พอร์ต คือ พอร์ต P2 P4 P7 P8 และ P10 ซึ่งแต่ละพอร์ตมีรายละเอียดการเชื่อมต่อ ของแต่ละพิน (pin) สำหรับใช้งานต่าง ๆ ดังนี้

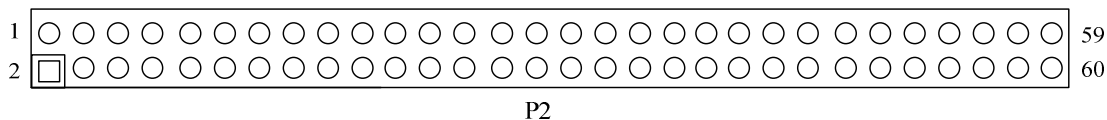
ตารางที่ 4.2 รายละเอียดแต่ละพินของพอร์ต P2 ในบอร์ด eZdsp™ F28335

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_RS0n	48	XCLKOUT
49	GND	50	GND
51	GND	52	GND
53	GPIO39_XA16	54	GPIO31_CANTXA_XA17
55	GPIO30_CANRXA_XA18	56	GPIO14_TZ3n_XHOLDn_SCITXB_MCLKXB
57	GPIO15_XHOLDAn_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.

การเชื่อมต่อของพอร์ต I/O P2

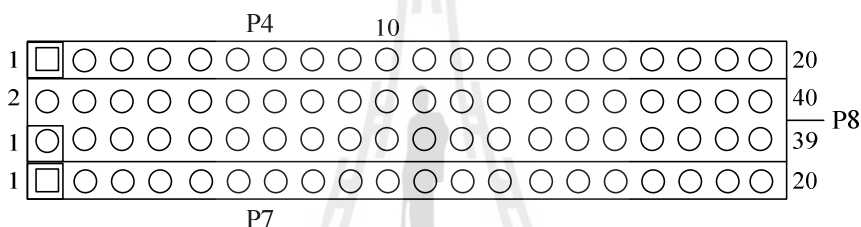
พอร์ต P2 มีจำนวนพินทั้งหมด 60 พิน ซึ่งมีการจัดเรียงตำแหน่งของพินต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.9 โดยรายละเอียดการเชื่อมต่อของแต่ละพินสามารถดูได้จากตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งพินของช่องสัญญาณพอร์ต P2 ของบอร์ด eZdsp™ F28335

การเชื่อมต่อของพอร์ต I/O P4 P7 และ P8

พอร์ต P4 และ P7 มีจำนวนอย่างละ 20 พิน ส่วนพอร์ต P8 มีจำนวนทั้งหมด 40 พิน โดยทั้งสามพอร์ตมีการจัดเรียงตำแหน่งพินต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งแต่ละพินมีรายละเอียดการเชื่อมต่อแสดงดังตารางที่ 4.3 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ตำแหน่งพินของช่องสัญญาณพอร์ต P4 P7 และ P8 ของบอร์ด eZdsp™ F28335

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดแต่ละพินของพอร์ต P4 ในบอร์ด eZdsp™ F28335

Pin#	Signal	Pin#	Signal
1	+3.3V/+5V/NC *	2	No connect
3	GPIO22_EQEP1S_MCLKRA_SCITXDB	4	GPIO7_EPWM4B_MCLKRA_ECAP2
5	GPIO23_EQEP1_MFSXA_SCIRXDB	6	GPIO7_EPWM4B_MCLKRA_ECAP2
7	GPIO20_EAEP1A_MXDA_CANTXB	8	GPIO21_EQEP1B_MDRA_CANRXB
9	No connect	10	GND
11	GPIO3_EPWM2B_ECAP5_MCLKRB	12	GPIO1_EPWM1B/ECAP6/MFSRB
13	No connect	14	No connect
15	No connect	16	No connect
17	No connect	18	GPIO14_TZ3n_XHOLD_SCITXDB_MCLKXB
19	GPIO15_TZ4n_XHOLDA_SCIRXDB_MFSXB	20	GND

ตารางที่ 4.4 รายละเอียดแต่ละพินของพอร์ต P7 ในบอร์ด eZdsp™ F28335

Pin#	Signal	Pin#	Signal
1	No connect	2	No connect
3	No connect	4	No connect
5	No connect	6	No connect
7	No connect	8	No connect
9	No connect	10	No connect
11	No connect	12	No connect
13	No connect	14	No connect
15	No connect	16	No connect
17	No connect	18	No connect
19	No connect	20	GND

Note: The P7 connector is supplied for backwards compatibility. Signals from other connectors can be wired to this connector to support existing user interfaces.

ตารางที่ 4.5 รายละเอียดแต่ละพินของพอร์ต P8 ในบอร์ด eZdsp™ F28335

Pin#	Signal	Pin#	Signal
1	+3.3V/+5V/NC *	2	+3.3/+5V/NC *
3	MUX_GPIO29_SCITXDA_XA19	4	MUX_GPIO28_SCIRXDA_XZCS6n
5	GPIO14_TZ3n_XHOLD_SCITXDB_MCLKXB	6	GPIO20_EAEP1A_MXDA_CANTXB
7	GPIO21_EQEP18_MDRA_CANRXB	8	GPIO23_EQEP1_MFSXA_SCIRXDB
9	GPIO0_EPWM1A	10	GPIO1_EPWM1B/ECAP6/MFSRB
11	GPIO2_EPWM2A	12	GPIO3_EPWM2B_ECAP5_MCLKRB
13	GPIO4_EPWM3A	14	GPIO5_EPWM3B_MFSRA_ECAP1
15	GPIO27_ECAP4_EQEP2S_MFSXB	16	GPIO6_EPWMN4A_EPWMSYNCl/EPWMSYNCO
17	GPIO13_TZ2N_CANRXB_MDRB	18	GPIO34_ECAP1_XREADY
19	GND	20	GND
21	GPIO7_EPWM4B_MCLKRA_ECAP2	22	GPIO15TZ4n_XHOLDA_SCIRXDB_MFSXB
23	GPIO16_SPISIMOA_CANTXB_TZ5n	24	GPIO17_SPISOMIA_CANRXB_TZ6n
25	GPIO18_SPICLKA_SCITXDB_CANRXA	26	GPIO19_SPISTAn_SCIRXDB_CANTXA
27	_MUX_GPIO31_CANRXA_XA17	28	MUX_GPIO30_CANRXA_XA18
29	MUX_GPIO11_EPWM6B_SCIRXDB_ECAP4	30	MUX_GPIO8EPWM5A_CANTXB_ADCSOCA0nP3
31	MUX_GPIO9_EPWM5B_SCITXDB_ECAP3	32	MUX_GPIO10_EPWM6A_CANRXB_ADCASOCB0n
33	MUX_GPIO22	34	GPIO25_ECAP2_EPEQ2B_MDRB
35	GPIO26_ECAP3_EQEP21_MCLKXB	36	GPIO32_SDAA_EPWMSYNCl_ADCSOCAOn
37	GPIO12_TZ1N_CANTXB_MDXB	38	GPIO33_SCLA_EPWNSYNCOV_ADCSOCBOn
39	GND	40	GND

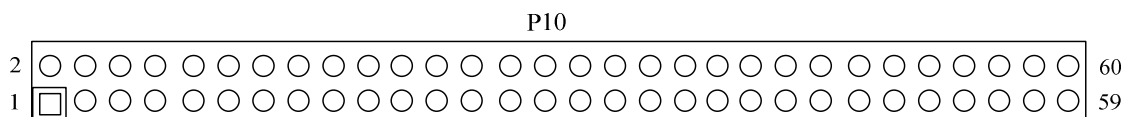
* Default is No Connect (NC). User can jumper to +3.3V or +5V on backside of eZdsp with JR4.

ตารางที่ 4.6 รายละเอียดแต่ละพินของพอร์ต P10 ในบอร์ด eZdsp™ F28335

Pin#	Signal	Pin#	Signal
1	+3.3V/+5V/NC	2	+3.3/+5V/NC
3	GPIO63_SCITXDC_XD16	4	GPIO62_SCIRXDC_XD17
5	GPIO61_MFSRB_XD18	6	GPIO60_MCLKRB_XD19
7	GPIO59_MFSRA_XD20	8	GPIO58_MCLKRA_XD21
9	GPIO57_SPISTEAn_XD22	10	GPIO56_SPICLKA_XD23
11	GPIO55_SPISOMIA_XD24	12	GPIO54_SPISIMOA_XD25
13	GPIO53EQEP1_XD26	14	GPIO52_EQEP1S_XD27
15	GPIO51_EAEP1B_XD28	16	GPIO50_EQEP1A_XD29
17	GPIO49_ECAP6_XD30	18	GPIO48_ECAP5_XD31
19	No connect	20	No connect
21	No connect	22	No connect
23	No connect	24	No connect
25	No connect	26	No connect
27	No connect	28	No connect
29	No connect	30	No connect
31	No connect	32	No connect
33	No connect	34	No connect
35	No connect	36	No connect
37	No connect	38	No connect
39	No connect	40	No connect
41	No connect	42	No connect
43	No connect	44	No connect
45	No connect	46	No connect
47	No connect	48	No connect
49	No connect	50	No connect
51	No connect	52	No connect
53	No connect	54	No connect
55	No connect	56	No connect
57	No connect	58	No connect
59	GND	60	GND

การเชื่อมต่อของพอร์ต I/O P10

พอร์ต P10 มีทั้งหมด 60 พิน การจัดเรียงตำแหน่งพินทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 โดยแต่ละพินมีรายละเอียดการเชื่อมต่อแสดงได้ดังตารางที่ 4.6

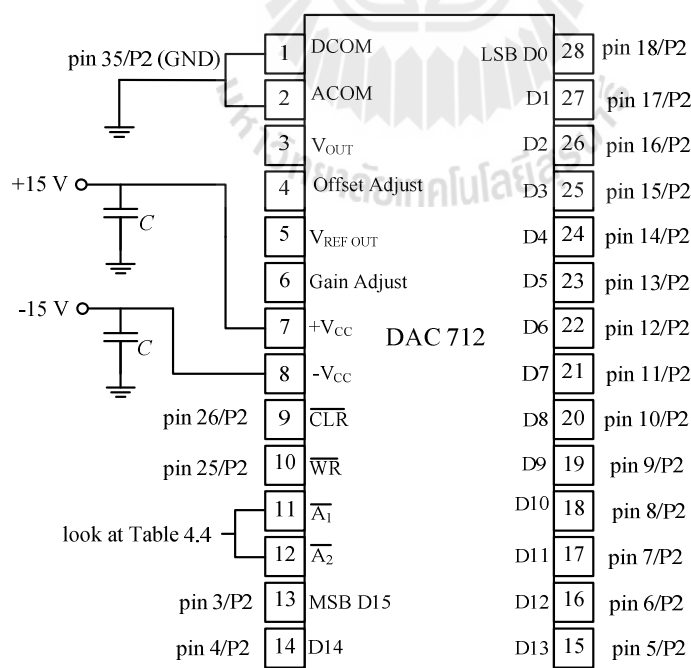


รูปที่ 4.11 ตำแหน่งพินของช่องสัญญาณพอร์ต P10 ของบอร์ด eZdsp™ F28335

หมายเหตุ: รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับบอร์ด eZdsp™ F28335 สามารถดูได้จาก <http://www.ti.com/tool/TMDSEZ28335>.

4.6 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

ชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ที่ใช้บอร์ด eZdsp™ F28335 จำเป็นต้องใช้วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) ทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณทั้งสามดังกล่าวถูกใช้สำหรับแปลงค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยสามเฟส (i_{ca}^* , i_{cb}^* , i_{cc}^*) ซึ่งได้จากการคำนวณตามวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกวิธี SDF ตามที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 สำหรับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกดังกล่าวงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้ไอซีแปลงสัญญาณเบอร์ DAC712 ของ Burr-Brown ซึ่งมีความแยกชัด 16 บิต การเชื่อมต่อไอซีทั้งสามตัวกับพอร์ต I/O ของบอร์ด eZdsp™ F28335 จะเหมือนกันดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.12 ยกเว้นขาที่ 11 และ 12 ($\overline{A}_0$ และ $\overline{A}_1$) ซึ่งจะเป็นขาที่ใช้กำหนดหรือระบุการทำงานเฉพาะไอซีแต่ละตัว โดยการเชื่อมต่อขาที่ 11 และ 12 ของไอซี DAC712 แต่ละตัวกับบอร์ด eZdsp™ F28335 ดูได้จากตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.12 การเชื่อมต่อไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่พอร์ตไอโอของบอร์ด eZdsp™ F28335

ขั้นตอนการสั่งการทำงานของไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกตัวที่ 1 ถึง 3 ทำได้โดยใช้คำสั่งดิจิทัลเวิร์ด 8 บิต (pin 19 ถึง pin 26 พอร์ต P2) ของบอร์ด eZdsp™F28335 โดยมีลำดับขั้นตอนแสดงได้ดังตารางที่ 4.8 ถึง 4.10 ตามลำดับ โดยขั้นตอนที่ 1 เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับไอซี DAC712 ขั้นตอนที่ 2 เป็นการโหลดข้อมูล 16 บิต ซึ่งไอซีตัวที่ 1 ข้อมูลกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยเฟส a ไอซีตัวที่ 2 คือ ข้อมูลกระแสอ้างอิงเฟส b และไอซีตัวที่ 3 คือ ข้อมูลกระแสอ้างอิงเฟส c ขั้นตอนที่ 3 เป็นการบ่งบอกถึงการสิ้นสุดการโหลดข้อมูล ขั้นตอนที่ 4 ถึง 6 เป็นขั้นตอนสำหรับการโหลดอินพุตแลตช์ (load input lach) และขั้นตอนที่ 7 ถึง 9 เป็นขั้นตอนการโหลดดีทิวแอลตช์ (load D/A lach) ของไอซี DAC712

ตารางที่ 4.7 การเชื่อมต่อขาที่ 11 และ 12 ของไอซี DAC712 ทั้งสี่ตัวกับบอร์ด eZdsp™F28335

ไอซี DAC712		พิน/พอร์ต ของบอร์ด eZdsp™F28335 ที่ใช้เชื่อมต่อ
ตัวที่ 1	$\overline{A}_0$	pin 19/P2
	$\overline{A}_1$	pin 20/P2
ตัวที่ 2	$\overline{A}_0$	pin 21/P2
	$\overline{A}_1$	pin 22/P2
ตัวที่ 3	$\overline{A}_0$	pin 23/P2
	$\overline{A}_1$	pin 24/P2

ตารางที่ 4.8 ขั้นตอนการสั่งการควบคุมสำหรับไอซี DAC712 ตัวที่ 1

ขั้นตอนการสั่งการควบคุมของไอซี DAC712 ตัวที่ 1	pin 26	pin 25	pin 24	pin 23	pin 22	pin 21	pin 20	pin 19
ขั้นที่ 1	1	1	1	1	1	1	1	1
ขั้นที่ 2	โหลดข้อมูลกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยเฟส a ผ่าน pin 3 ถึง pin 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 4.9 ขั้นตอนการสังการควบคุมสำหรับไอซี DAC712 ตัวที่ 2

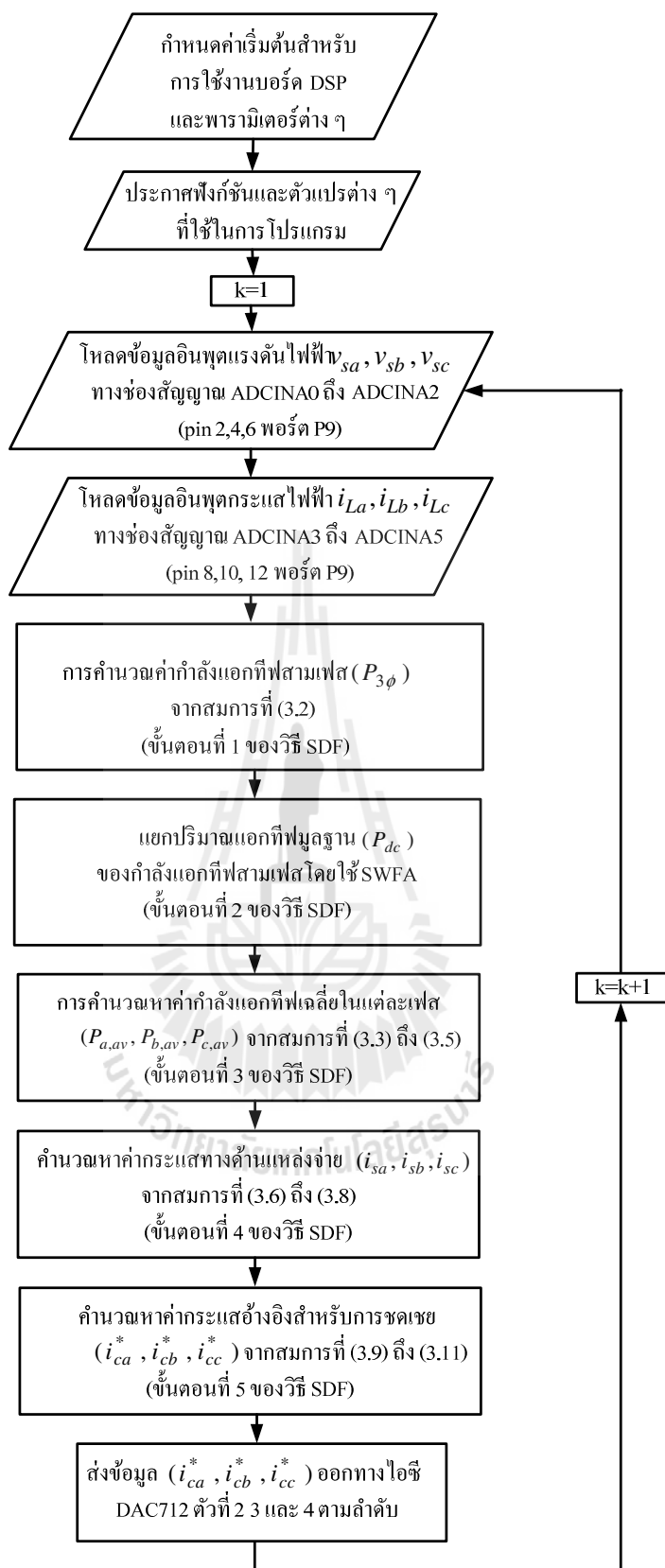
ขั้นตอนการสังการควบคุมของไอซี DAC712 ตัวที่ 2	pin 26	pin 25	pin 24	pin 23	pin 22	pin 21	pin 20	pin 19
ขั้นที่ 1	1	1	1	1	1	1	1	1
ขั้นที่ 2	โหลดข้อมูลกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยเฟส <i>b</i> ผ่าน pin 3 ถึง pin 18							
ขั้นที่ 3	1	1	1	1	1	1	1	1
ขั้นที่ 4	1	1	1	1	1	0	1	1
ขั้นที่ 5	1	0	1	1	1	0	1	1
ขั้นที่ 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 4.10 ขั้นตอนการสังการควบคุมสำหรับไอซี DAC712 ตัวที่ 3

ขั้นตอนการสังการควบคุมของไอซี DAC712 ตัวที่ 3	pin 26	pin 25	pin 24	pin 23	pin 22	pin 21	pin 20	pin 19
ขั้นที่ 1	1	1	1	1	1	1	1	1
ขั้นที่ 2	โหลดข้อมูลกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยเฟส <i>c</i> ผ่าน pin 3 ถึง pin 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

4.7 การโปรแกรมชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดีบนบอร์ด eZdsp™F28335

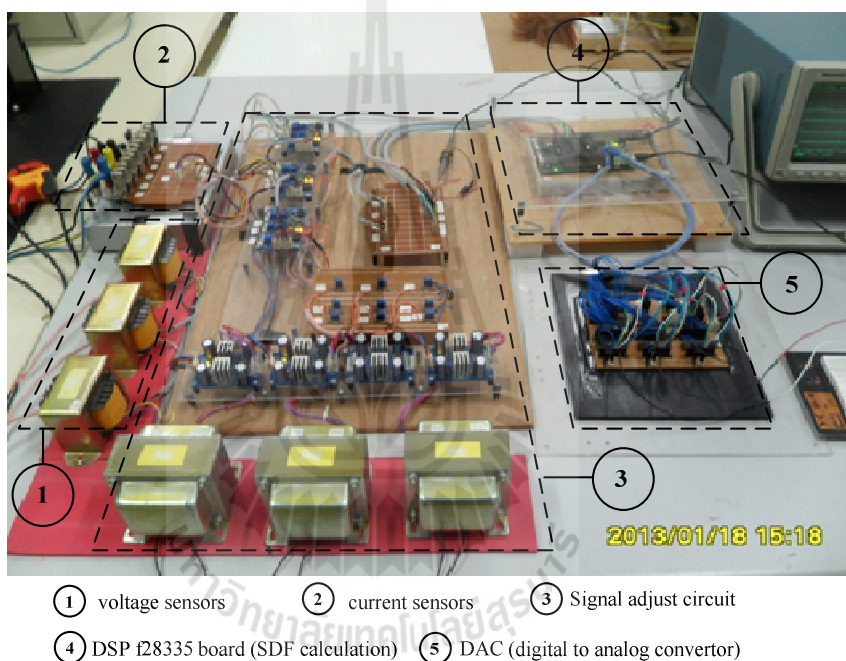
การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดีหรือวิธี SDF ดังที่ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอการโปรแกรมวิธีตรวจจับฮาร์มอนิกดังกล่าวลงบนบอร์ด eZdsp™F28335 โดยใช้ภาษาซี ซึ่งแผนภูมิการโปรแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 จากรูปดังกล่าว เริ่มต้นจากการกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการใช้งานบอร์ด eZdsp™F28335 และพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น พารามิเตอร์เริ่มต้นของฟังก์ชัน ADC เป็นต้น และต่อด้วยการประกาศฟังก์ชัน และตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้เก็บค่าในการคำนวณ จากนั้นจะทำการโหลดข้อมูลอินพุตที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกตามวิธี SDF ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า v_{sa} v_{sb} และ v_{sc} ผ่านทางช่องทางสัญญาณ ADCINA0 ถึง ADCINA2 ตามลำดับ และค่ากระแสไฟฟ้า i_{La} i_{Lb} และ i_{Lc} ผ่านทางช่องทางสัญญาณ ADCINA3 ถึง ADCINA5 ตามลำดับเช่นกัน จากนั้นจึงเป็นการคำนวณขั้นตอนที่ 1 ของวิธี SDF นั่นคือ การคำนวณค่ากำลังแอกทีฟสามเฟส ($P_{3\phi}$) จากสมการที่ (3.2) ดังที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 จากนั้นจึงคำนวณขั้นตอนที่ 2 เพื่อแยกปริมาณแอกทีฟมูลฐาน (P_{dc}) ของกำลังแอกทีฟสามเฟส ($P_{3\phi}$) โดยใช้ SWFA เมื่อได้ค่ากำลังแอกทีฟมูลฐานแล้วจึงดำเนินการคำนวณขั้นตอนที่ 3 ต่อเนื่องคือการคำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟเฉลี่ยในแต่ละเฟส ($P_{a,av}$, $P_{b,av}$, $P_{c,av}$) โดยใช้สมการที่ (3.3) ถึง (3.5) จากนั้นจึงคำนวณหาค่ากระแสทางด้านแหล่งจ่าย (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) ตามสมการที่ (3.6) ถึง (3.8) (ขั้นตอนที่ 4 ของวิธี SDF) และนำค่ากระแสดังกล่าวไปหาค่ากระแสโหลดในแต่ละเฟส (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}) ตามสมการที่ (3.9) ถึง (3.11) (ขั้นตอนที่ 5 ของวิธี SDF) สุดท้ายจะได้กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนสามเฟส (i_{ca}^* , i_{cb}^* , i_{cc}^*) เมื่อคำนวณเสร็จสิ้นแล้วจะทำการส่งข้อมูลกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยทั้งสามเฟสออกจากช่องสัญญาณไอซี DAC712 ตัวที่ 1 ถึง 3 ตามลำดับ จากการอธิบายแผนภูมิการโปรแกรมข้างต้น เป็นการคำนวณเพียงรอบแรกเท่านั้น โดยการคำนวณในรอบต่อไป จะเริ่มต้นทำการโหลดข้อมูลอินพุตแรงดันและกระแสไฟฟ้าค่าใหม่ และดำเนินการซ้ำเดิมตามลำดับขั้นตอนที่ได้อธิบายไว้อีกครั้ง ดังแผนภูมिरูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แผนภูมิการ โปรแกรมการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี

4.8 การทดสอบชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี

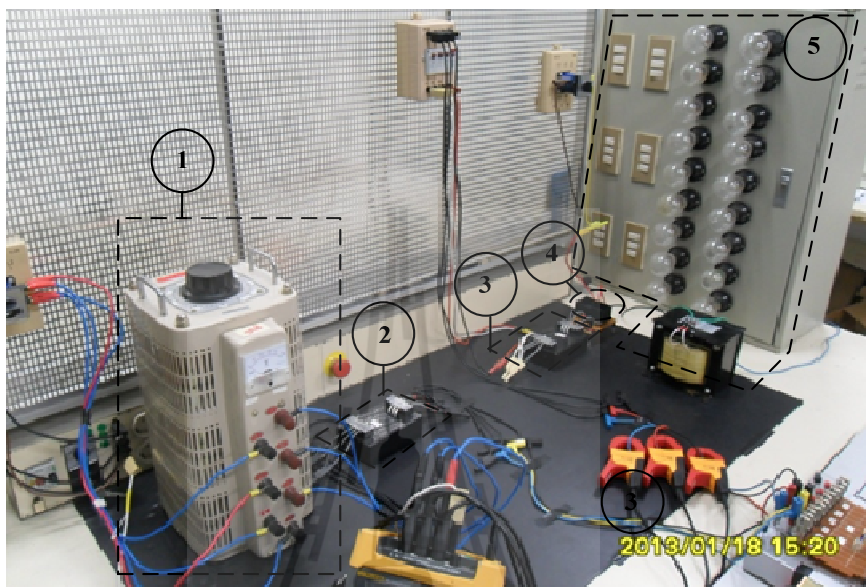
การอธิบายตั้งแต่หัวข้อที่ 4.2 ถึง 4.7 เป็นการนำเสนออุปกรณ์ การใช้งานบอร์ด eZdsp™F28335 และการโปรแกรมสำหรับใช้สร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ซึ่งเมื่อทำการต่ออุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน จะได้ชุดตรวจจับฮาร์มอนิกดังกล่าวดังรูปที่ 4.14 และจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณารูปที่ 3.7 ในบทที่ 3 เมื่อนำมาสร้างจริงแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 โดยแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลังจะถูกแทนด้วยหม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้และต่อเข้ากับโหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดความต้านทาน (ใช้ชุดโหลดหลอดไฟฟ้ากระแสตรงทดแทน) อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.14 ชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี

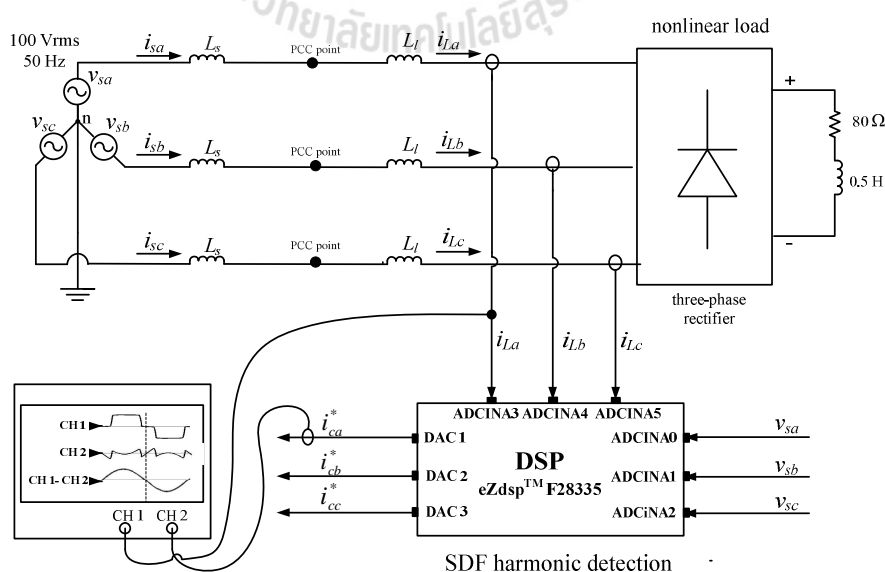
การทดสอบชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ที่สร้างขึ้นในทางปฏิบัติจะทำการทดสอบกับระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 4.15 โดยการตรวจสอบความถูกต้องของกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยที่ได้จากชุดตรวจจับฮาร์มอนิกดังกล่าว จะใช้วิธีการนำกระแสไฟฟ้าทางด้านโหลดของระบบไฟฟ้ากำลัง (i_L) ลบด้วยกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย (i_c^*) ที่ได้จากชุดตรวจจับฮาร์มอนิก ($i_L - i_c^*$) โดยการหักลบดังกล่าวจะใช้ฮอสซิลโลสโคปเป็นตัวดำเนินการดังรูปที่ 4.16 จากรูปดังกล่าวประกอบด้วย 3 ส่วน โดยส่วนแรก คือ ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา ส่วนที่สอง คือ ชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ที่ใช้บอร์ด eZdsp™f28335 และส่วนที่สาม คือ ฮอสซิลโลสโคปที่ใช้สำหรับดำเนินการนำกระแสไฟฟ้าทางด้านโหลดลบด้วยกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย การดำเนินการ

ดังกล่าวจะเปรียบเสมือนการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติในการกำจัดฮาร์มอนิก ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินการ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย (i_s) หลังการชดเชย โดยถ้าค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยที่ได้จากชุดตรวจจับฮาร์มอนิกมีความถูกต้อง จะส่งผลให้รูปสัญญาณของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายมีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์มากขึ้น ซึ่งดูได้จากผลการทดสอบรูปย่อยที่ 4 (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) ของรูปที่ 4.17 ถึง 4.19

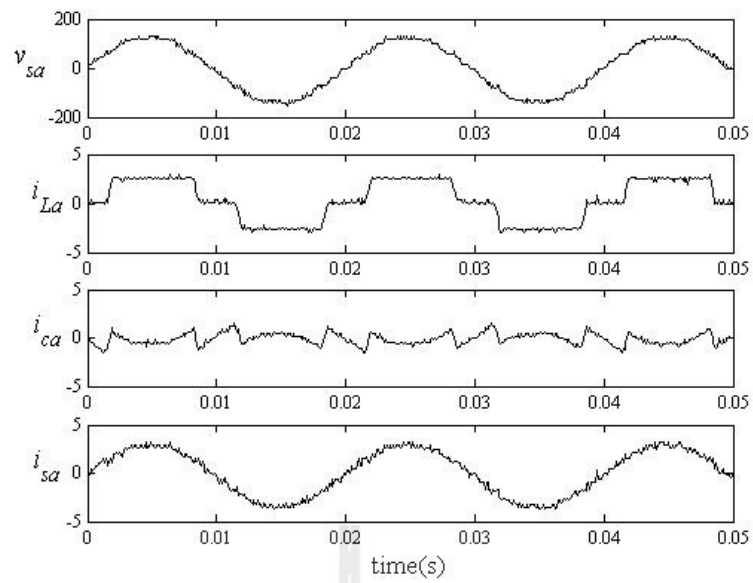


- ① voltage supply ② Source line inductance (L_s) ③ Load line inductance (L_l)
 ④ rectifier circuit ⑤ RL load of rectifier

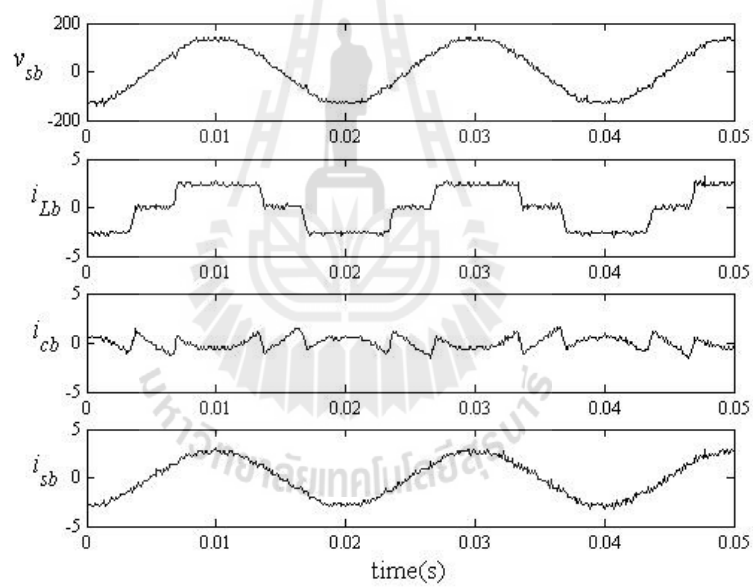
รูปที่ 4.15 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก



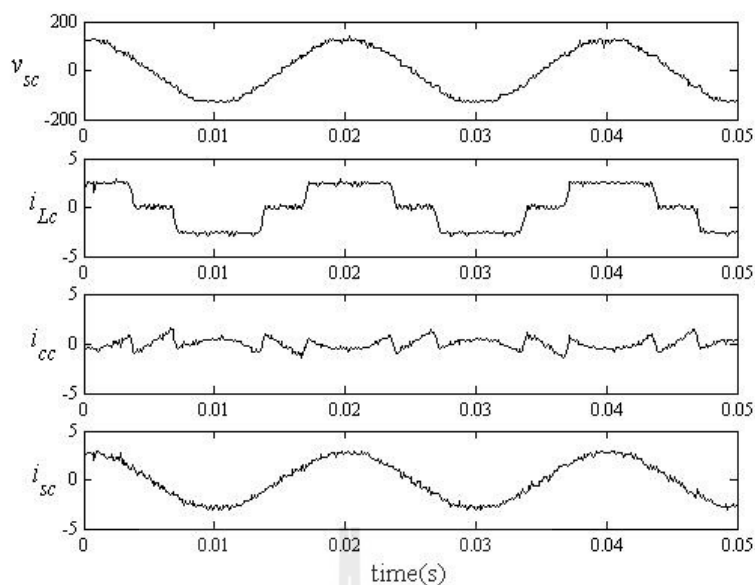
รูปที่ 4.16 การทดสอบชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบการตรวจจับฮาร์โมนิกกรณีเฟส a



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบการตรวจจับฮาร์โมนิกกรณีเฟส b



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบการตรวจจับฮาร์มอนิกกรณีเฟส c

จากรูปที่ 4.17 ถึง 4.19 สังเกตได้ว่า รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายที่ได้จากการทดสอบทั้งสามเฟส (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) มีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายก่อนทดสอบซึ่งจะมีรูปสัญญาณเหมือนกับกระแสไฟฟ้าทางด้านโหลด (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) ทุกประการ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยทั้งสามเฟส ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) ที่ได้จากชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ที่สร้างขึ้นมีความถูกต้อง โดยค่า $\%THD$ ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายหลังชดเชยทั้งสามเฟสดูได้จากตารางที่ 4.11 จากตารางดังกล่าวค่า $\%THD$ หลังการทดสอบของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกรณีเฟส a มีค่าเท่ากับ 3.23% กรณีเฟส b มีค่าเท่ากับ 3.37% และกรณีเฟส c มีค่าเท่ากับ 3.25% โดยที่ค่า $\%THD$ เฉลี่ยทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากับ 3.28% ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการทดสอบซึ่งมีค่า $\%THD$ เฉลี่ยทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากับ 25.71% อย่างไรก็ตาม การทดสอบดังกล่าวไม่ได้มีการฉีดกระแสชดเชยสู่ระบบไฟฟ้าจริง ดังนั้นผลค่า $\%THD$ ที่ได้จึงไม่ใช่ผลการชดเชยฮาร์มอนิก แต่เป็นเพียงผลการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของรูปสัญญาณการแสอ้างอิงที่ได้จากชุดตรวจจับฮาร์มอนิกเท่านั้น

ตารางที่ 4.11 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายทั้งสามเฟส

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย	
	ค่า %THD ก่อนการทดสอบ	ค่า %THD หลังการทดสอบ
<i>a</i>	26.07	3.23
<i>b</i>	25.63	3.37
<i>c</i>	25.42	3.25
เฉลี่ยทั้งสามเฟส	25.71	3.28

4.9 สรุป

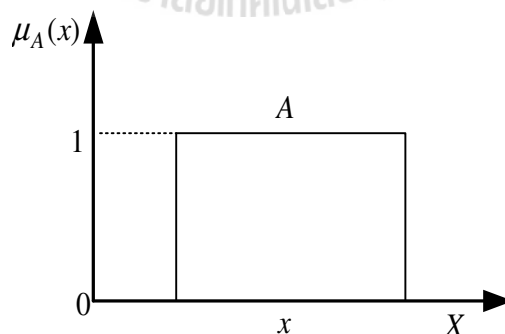
บทนี้ได้นำเสนอการสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ที่ใช้บอร์ด eZdspTM F28335 ซึ่งเนื้อหาได้อธิบายเกี่ยวกับอุปกรณ์และวงจรไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ถูกนำมาใช้สำหรับสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิก รวมไปถึงการนำเสนอเทคโนโลยีสถาปัตยกรรมของบอร์ด eZdspTM F28335 การทดสอบชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF พบว่า กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยที่ได้จากชุดตรวจจับฮาร์มอนิกมีความถูกต้อง โดยกระแสแหล่งจ่ายที่ได้จากการทดสอบนำสัญญาณกระแสไหลกลับด้วยกระแสชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์ และค่า %THD ของกระแสดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกระแสโหลด

บทที่ 5

การควบคุมแบบฟัซซีและการประยุกต์ใช้ควบคุมกระแสดัดเซย ของวงจรกรองกำลังแอททีฟ

5.1 กล่าวนำ

ฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) หรือฟัซซีได้ถูกนำเสนอขึ้นโดย Lotfi A. Zadeh ในปี 1965 (Zadeh L. A., 1965, อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) ซึ่งต่อมาได้เป็นที่รู้จักและได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในงานด้านระบบควบคุม การควบคุมแบบฟัซซี (fuzzy control) เป็นวิธีการควบคุมที่ให้ประสิทธิผลสูง ซึ่งจะอาศัยข้อมูลความรู้และประสบการณ์การทำงานของผู้เชี่ยวชาญเป็นพื้นฐานในการออกแบบจึงทำให้การควบคุมแบบดังกล่าวมีความฉลาดเปรียบเสมือนกับมนุษย์ อีกทั้งการควบคุมแบบฟัซซียังไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำของระบบจึงเหมาะสมอย่างยิ่งกับระบบที่มีความซับซ้อนคลุมเครือ มีความไม่เป็นเชิงเส้น และหลายอินพุต อย่างก็ตามในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการนำตัวควบคุมฟัซซีมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการควบคุมกระแสดัดเซยของวงจรกรองกำลังแอททีฟพร้อมกับเทคนิคสเปซเวกเตอร์พีดับเบิ้ลยูเอ็มบนแกนดีคิวซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอทบทวนทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแบบฟัซซี ได้แก่ ฟัซซีเซต การดำเนินการทางฟัซซีเซตฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกตัวแปรภาษากฎของฟัซซี และการอนุมานฟัซซี ซึ่งแต่ละส่วนจะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2 ถึง 5.7 ตามลำดับ นอกจากนี้ในแต่ละหัวข้อจะได้อธิบายการออกแบบโครงสร้างส่วนต่าง ๆ ของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับใช้ควบคุมกระแสดัดเซยร่วมกับเทคนิคสเปซเวกเตอร์พีดับเบิ้ลยูเอ็มบนแกนดีคิวด้วยเช่นกัน



รูปที่ 5.1 ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของเซตชัดเจน

5.2 ฟัซซีเซต

ฟัซซีเซตมีความแตกต่างไปจากเซตชัดเจนแบบปกติ ดังนั้นเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างเซตชัดเจนกับฟัซซีเซตในที่นี่จะเริ่มต้นจากการอธิบายความหมายของเซตชัดเจนก่อน จากนั้นจึงจะอธิบายความหมายของฟัซซีเซตดังต่อไปนี้

เซตชัดเจน (crisp set) คือ เซตที่มีการกำหนดขอบเขตของเซตอย่างชัดเจนซึ่งจะให้ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0 และ 1 เท่านั้น (ตรรกะบูลีน) โดย 0 หมายถึง การไม่เป็นสมาชิกของเซต และ 1 หมายถึง การเป็นสมาชิกของเซตสำหรับรูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของเซตชัดเจนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 จากรูปดังกล่าว ค่าความเป็นสมาชิกของเซตชัดเจน A ($\mu_A(x)$) ที่ตำแหน่งตัวแปร x ต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ X สามารถแสดงได้ดังฟังก์ชันตามสมการที่ (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

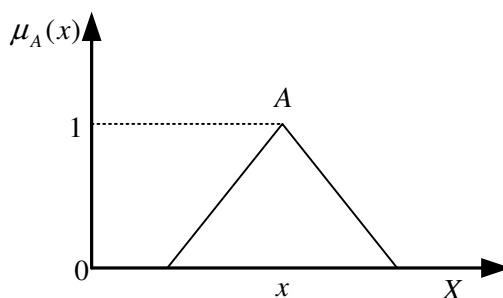
ฟัซซีเซต (fuzzy set) คือ เซตที่มีความคลุมเครือ ไม่มีการกำหนดขอบเขตที่ชัดเจนค่าความเป็นสมาชิกมีมากกว่า 2 ค่า หรือเป็นตรรกะหลายระดับ โดยรูปร่างของฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกมีได้หลายรูปแบบ เช่น รูปร่างแบบสามเหลี่ยม รูปร่างแบบสี่เหลี่ยม และรูปร่างแบบเกาส์เซียน เป็นต้น (ดูได้จากหัวข้อที่ 5.4) อย่างไรก็ตามเพื่อให้เข้าใจความเข้าใจในที่นี่จะยกตัวอย่างการอธิบายฟัซซีเซตกรณีรูปร่างของฟังก์ชันเป็นแบบสามเหลี่ยมดังรูปที่ 5.2 จากรูปดังกล่าว ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A ที่ตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ $\mu_A(x)$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไประหว่าง 0 ถึง 1 โดยฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกเป็นไปตามสมการที่ (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

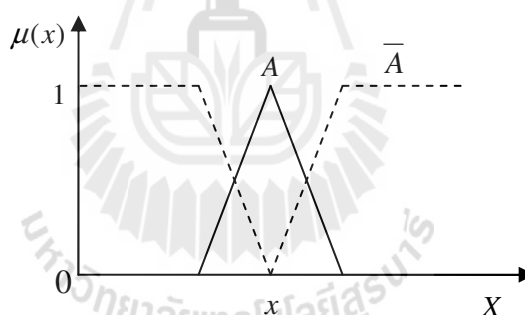
$0 < \mu_A(x) < 1$ เมื่อ x อยู่ในเซต A เพียงบางส่วน



รูปที่ 5.2 ฟังก์ชันแสดงความความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต

5.3 การดำเนินการทางฟัซซีเซต

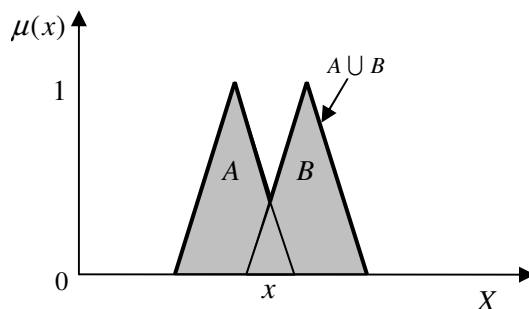
การดำเนินการทางฟัซซีเซต (fuzzy set operations) จะมีความหมายเหมือนกับเซตชัดเจนทั่วไป แต่จะให้ค่าเชิงตัวเลขที่แตกต่างกัน สำหรับเซตชัดเจนจะให้ผลว่าตัวแปรสมาชิกอยู่หรือไม่อยู่ในเซต แต่สำหรับฟัซซีเซตการดำเนินการจะให้ผลว่าตัวแปรสมาชิกอยู่ในเซตด้วยระดับความความเป็นสมาชิกเท่าไร พิจารณาตัวดำเนินการในทฤษฎีเซต 3 แบบ คือ ส่วนเติมเต็ม (complement) ยูเนียน (union) และอินเตอร์เซกชัน (intersection) โดยการอธิบายในที่นี้จะกำหนดให้ฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B ซึ่งอยู่บนเอกภพสัมพัทธ์ X



รูปที่ 5.3 ส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A

ส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A หรือ NOT A ($\bar{A}$) คือ เซตที่ประกอบด้วยตัวแปรสมาชิก x ที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ X แต่ไม่อยู่ในฟัซซีเซต A (ส่วนที่แสดงเป็นเส้นประ) ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งค่าความเป็นสมาชิกของ $\bar{A}$ ($\mu_{\bar{A}}(x)$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.3) จากสมการดังกล่าว ค่าความเป็นสมาชิกของส่วนเติมเต็มจะมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าระดับความความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 กับค่าระดับความความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A

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

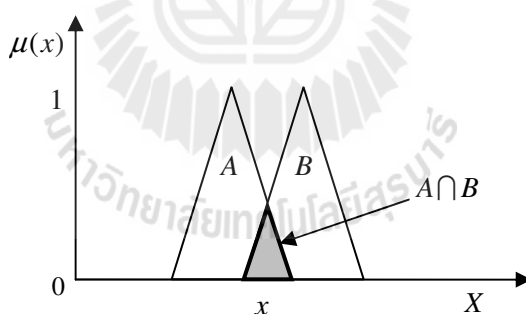


รูปที่ 5.4 การยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B

ยูเนียนของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B ($A \cup B$) แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 คือ เซตที่ประกอบด้วยตัวแปรสมาชิก x ที่อยู่ในฟัซซีเซต A และ B ทั้งหมด(ส่วนที่แรเงา)ซึ่งสามารถพิจารณาเป็นความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5.4) จากสมการดังกล่าว ค่าความเป็นสมาชิกของการยูเนียนกันระหว่างฟัซซีเซต A และ B ($\mu_{A \cup B}(x)$) คือ ค่ามากที่สุด (maximum) ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเป็นสมาชิกของทั้งสองฟัซซีเซต

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

โดยที่ $\vee$ หมายถึง OR ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบหาค่า maximum ระหว่างฟัซซีเซต



รูปที่ 5.5 การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และ B

อินเตอร์เซกชัน ของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B ($A \cap B$) ดังรูปที่ 5.5 คือ เซตที่ประกอบด้วยตัวแปรสมาชิก x ที่เหมือนกันของฟัซซีเซต A และ B (ส่วนแรเงา) ซึ่งสามารถเขียนพิจารณาความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (5.5) จากสมการดังกล่าว ค่าความเป็นสมาชิกของการอินเตอร์เซกชันกันระหว่างฟัซซีเซต A และ B ($\mu_{A \cap B}(x)$) คือ ค่าน้อยที่สุด (minimum) ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเป็นสมาชิกของทั้งสองฟัซซีเซต

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

โดยที่ $\wedge$ หมายถึง AND ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบหาค่า minimum ระหว่างฟัซซีเซต นอกจากการดำเนินการต่าง ๆ ของฟัซซีเซตจะให้ความหมายเหมือนกับเซตชัดเจนแล้วฟัซซีเซตยังมีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เหมือนกับเซตชัดเจนด้วยเช่นกัน ดังต่อไปนี้

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

$$\text{ถ้า } (A \subset B) \cap (B \subset C) \text{ แล้วจะได้ว่า } A \subset C$$

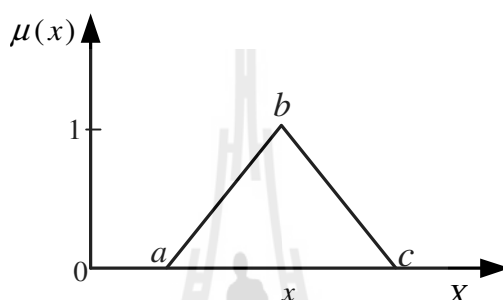
กฎของ De Morgan

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

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

5.4 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก

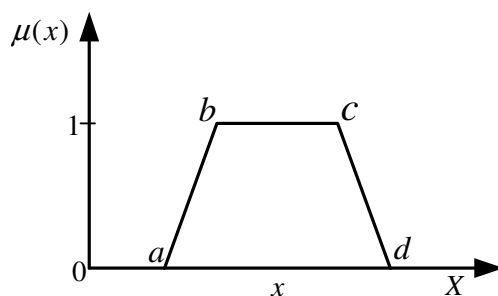
ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก (membership function) คือ ฟังก์ชันสำหรับการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการศึกษาซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวสามารถมีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมกับปัญหาที่ศึกษาและจะถูกกำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญอย่างไรก็ตามรูปร่างฟังก์ชันความสมาชิกที่นิยมใช้มีอยู่ 4 รูปแบบ คือ ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม(triangular membership function: trimf) ฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยมคางหมู(trapezoidal membership function: trapmf) ฟังก์ชันรูปเกาส์เซียน (Gaussian membership function: gaussmf) และฟังก์ชันรูประฆังคว่ำ (generalized bell membership function: gbellmf) ดังนี้



รูปที่ 5.6 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกแบบรูปสามเหลี่ยม

ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 3 ตำแหน่งคือตำแหน่งจุด a, b, c ดังรูปที่ 5.6 จากรูปดังกล่าว การคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ ($\mu(x)$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.6) ซึ่งจะแยกออกเป็น 5 กรณีด้วยกัน ดังนี้

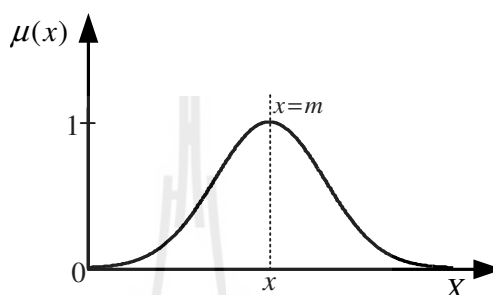
$$\mu(x) = \text{trimf}(x, [a \ b \ c]) = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & ; a < x < b \\ 1 & ; x = b \\ (c-x)/(c-b) & ; b < x < c \\ 0 & ; x \geq c \end{cases} \quad (5.6)$$



รูปที่ 5.7 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกแบบรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

ฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยมคางหมูประกอบด้วยพารามิเตอร์ตำแหน่งทั้งหมด 4 ตำแหน่งคือตำแหน่งจุด a, b, c, d ดังรูปที่ 5.7 โดยการคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ จะใช้สมการที่ (5.7) ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 กรณีเช่นกัน

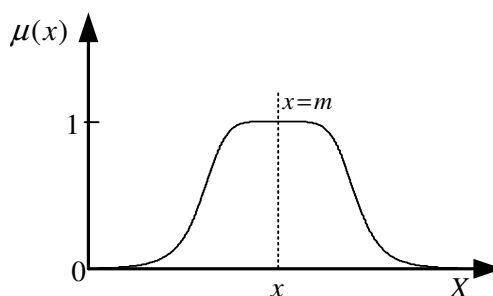
$$\mu(x) = \text{trapmf}(x, [a \ b \ c \ d]) = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & ; a < x < b \\ 1 & ; b \leq x \leq c \\ (d-x)/(d-c) & ; c < x < d \\ 0 & ; x \geq d \end{cases} \quad (5.7)$$



รูปที่ 5.8 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกแบบรูปเกาส์เซียน

ฟังก์ชันรูปเกาส์เซียน แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 ซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ 2 ตัวคือ σ และ m ซึ่งค่า σ หมายถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะใช้สำหรับกำหนดความกว้างของรูปกราฟ ส่วนค่า m หมายถึงค่าเฉลี่ยจะใช้สำหรับกำหนดค่าตำแหน่งกึ่งกลางของรูปกราฟแบบเกาส์เซียนการคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (5.8)

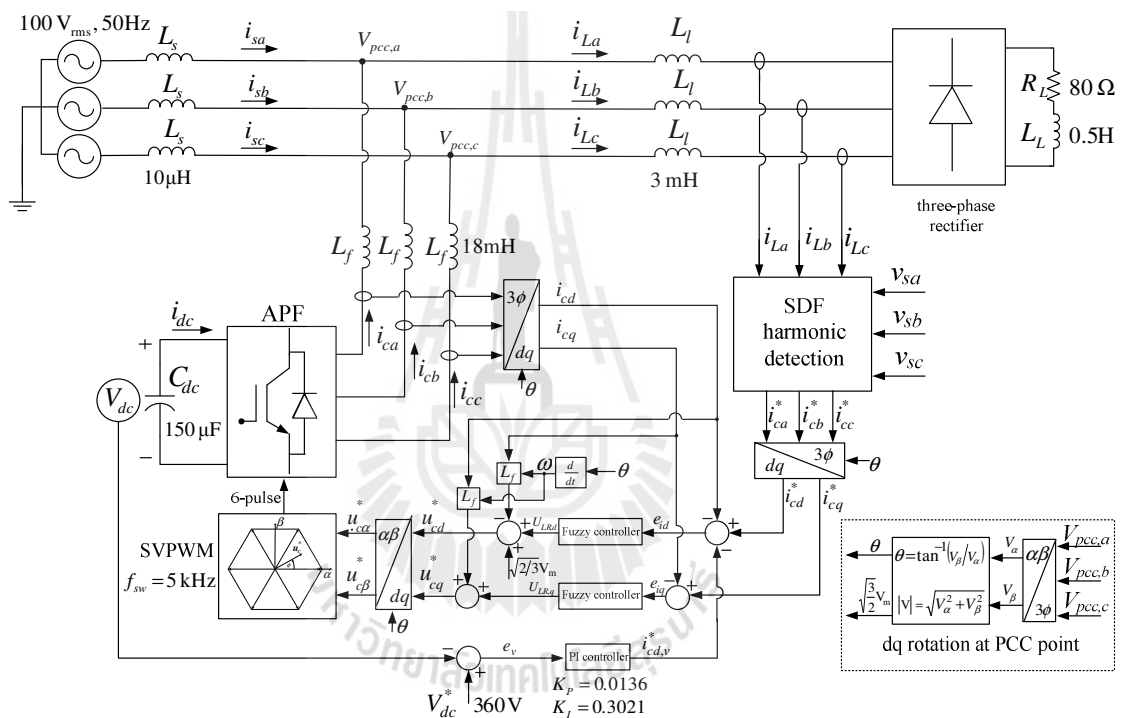
$$\mu(x) = \text{gussmf}(x, [\sigma \ m]) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.8)$$



รูปที่ 5.9 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกแบบรูปประฆังคว่ำ

ฟังก์ชันรูปประฆังคว่ำ ดังรูปที่ 5.9 ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ 3 ตัวคือ a , b , m (พารามิเตอร์ a และ b จะใช้สำหรับกำหนดความกว้างของรูปกราฟแบบประฆังคว่ำส่วน m ใช้กำหนดค่าตำแหน่งกึ่งกลางของรูปกราฟเช่นเดียวกับกรณีเกาส์เซียน) การคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ สามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการที่ (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 5.10 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่สำหรับควบคุมกระแสขดเคช

5.4.1 การออกแบบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่สำหรับ

ระบบควบคุมกระแสขดเคชของวงจรรอกกำลังแอคทีฟ

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 จากรูปดังกล่าว ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุลที่มีพิกัดแรงดัน 100 V_{rms} 50 Hz ต่อเข้ากับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน (R) เท่ากับ 80 Ω อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่มีค่าเท่ากับ 0.5 H การฉีดกระแสขดเคชฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าใช้วงจรรอกกำลังแอคทีฟที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน การควบคุมการฉีดกระแสขดเคช (i_c) ใช้ตัว

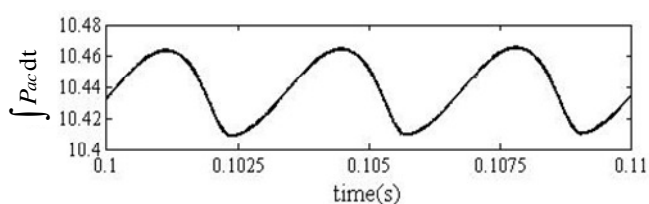
ควบคุมฟัซซี (Fuzzy controller) บนแกนดีคิว (dq-axis) ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์อุปกรณ์ไอจีบีทีแบบสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็มหรือเทคนิค SVPWM (Narongrit T., Areerak K-L. and Areerak K-N., 2012) การควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง (V_{dc}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่ปรากฏในรูปได้จากการออกแบบด้วยวิธีต่าง ๆ อธิบายได้ดังนี้

การออกแบบค่าแรงดันบัลไฟตรง (V_{dc}^*) จะใช้วิธีการเลือกค่าแรงดันที่มีขนาดมากกว่า 1.5 เท่าของค่าขดแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (Benchaita L., Saadate S. and Nia A.S., 1999) ทั้งนี้เนื่องจากการกำหนดทิศทางกรไหลของกระแสชดเชย คือ จากวงจรกรองกำลังแอกทีฟไปยังโหลด ดังนั้นค่าแรงดัน V_{dc}^* จึงจำเป็นต้องมีค่ามากกว่าค่า V_{pcc} ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้ค่าเท่ากับ 360 V (ประมาณ 2.5 เท่าของค่าขด V_{pcc} (ค่าขด $V_{pcc} \approx 142$ V))

การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) จะใช้หลักวิธีการออกแบบของ Thierry Thomas และคณะ (Thomas T., Haddad K., Joos G. and Jaafari A., 1998) โดยอาศัยการเลือกค่าตัวเก็บประจุที่มากกว่าค่าตัวเก็บประจุ $C_{dc,min}$ ซึ่งค่า $C_{dc,min}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.10) โดยการคำนวณจะอาศัยค่าปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟสามเฟส (P_{ac}) และค่า V_{dc}^*

$$C_{dc,min} = \frac{\Delta \int P_{ac} dt}{\Delta V_{dc}^* \times V_{dc}^*} \quad (5.10)$$

โดยที่ ΔV_{dc}^* คือ ค่าขนาดการกระเพื่อม (ripple) ของสัญญาณค่า V_{dc}^* ที่ดักคร่อมตัวเก็บประจุโดยปกติควรจะกำหนดให้มีค่าน้อยทั้งนี้เพื่อรักษาสมรรถนะดีของการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้ตรงตามที่ได้ออกแบบค่า V_{dc}^* ไว้ก่อนหน้านี้ โดยในที่นี้ผู้วิจัยได้กำหนดใช้ค่า ΔV_{dc}^* สำหรับการออกแบบมีค่าเท่ากับ 5 V (< 2%)



รูปที่ 5.11 ผลรวมแบบอินทิเกรตของปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ

สำหรับค่า $\Delta \int P_{ac} dt$ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.11 จากรูปดังกล่าว คือ สัญญาณการอินทิเกรตของค่า P_{ac} ที่เกิดขึ้นในระบบพิจารณาซึ่งมีค่า $\Delta \int P_{ac} dt$ ประมาณเท่ากับ

0.052 (10.462-10.410) นอกจากนี้ จากการออกแบบค่า V_{dc}^* ได้เท่ากับ 360 V จึงทำการแทนค่าลงในสมการที่ (5.10) จะได้ว่า

$$C_{dc, \min} = \frac{0.052}{5 \times 360} = 28.88 \mu F \quad (\text{ผู้นำวิจัยเลือกใช้ } C_{dc} = 150 \mu F)$$

การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) จะใช้วิธีการของ Ingram and Round (Ingram D.M.E. and Round S.D., 1997) คือ เลือกค่าที่มีขนาดไม่เกินค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f(\max)}$) ที่ทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะกระแสอ้างอิงที่มีความชันสูงสุดได้ โดยการคำนวณถูกแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยสูงสุดเทียบกับเวลาหรือค่าความชันสูงสุดของกระแสอ้างอิง ($\max(\frac{d i_c^*}{dt})$) โดยอาศัยองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกลำดับ (Harmonic order) ที่มีขนาดกระแสมากที่สุด ($i_{h(\max)}(t)$) ดังสมการที่ (5.11) และ (5.12) ดังนี้

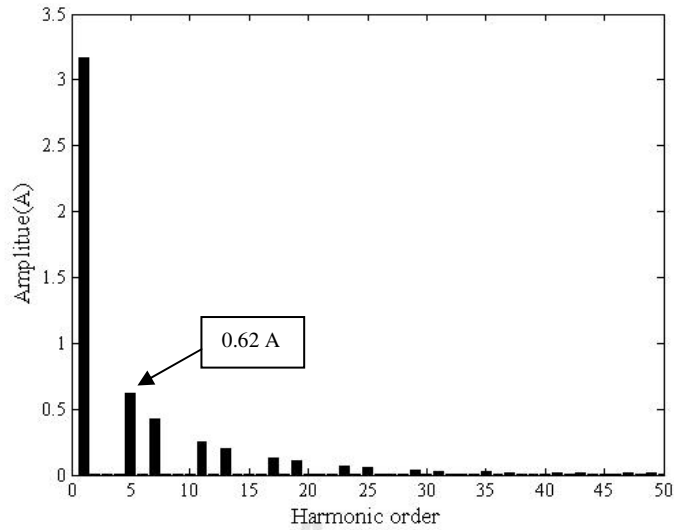
$$i_{h(\max)}(t) = A \sin(2\pi f t) \quad (5.11)$$

$$\max(\frac{d i_c^*}{dt}) \approx A 2\pi f \quad (5.12)$$

โดยที่ A คือ แอมพลิจูดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่มีขนาดกระแสสูงสุด (A)
 f คือ ความถี่ของลำดับฮาร์มอนิกที่มีขนาดกระแสสูงสุด (Hz)

จากรูปที่ 5.12 แสดงสเปกตรัมขนาดกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 5.10 ซึ่งสังเกตได้ว่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ($f_5 = 250$ Hz) มีขนาดกระแสมากที่สุดเท่ากับ 0.62 A ดังนั้นเมื่อทำการแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (5.12) จะได้ว่า

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



รูปที่ 5.12 สเปกตรัมฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุดหรือ $L_{f(\max)}$ จากสมการที่ (5.13) ดังนี้

$$L_{f(\max)} = \frac{V_{dc}^* - V_{pcc}}{\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right)} \quad (5.13)$$

แทนค่า V_{dc}^* และค่า $\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right)$ ลงในสมการที่ (5.13) จะได้ว่า

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

การออกแบบตัวคุมแบบพีไอสำหรับใช้ควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงในรูปที่ 5.10 จะใช้สมการที่ (5.14) และ (5.15) ตามลำดับ (พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์, 2554) โดยกำหนดให้ค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ (Modulation index: M) เท่ากับ 0.8 ค่าความถี่ธรรมชาติ (natural frequency: ω_n) เท่ากับ 10π rad/s และค่าอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio: ζ) มีค่าเท่ากับ 0.707 (พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์, 2554) ซึ่งการคำนวณสุดท้ายจะได้ผล K_p เท่ากับ 0.0136 และ K_i เท่ากับ 0.3021 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$K_{Pv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{4}{M} \zeta \omega_n C_{dc} \quad (5.14)$$

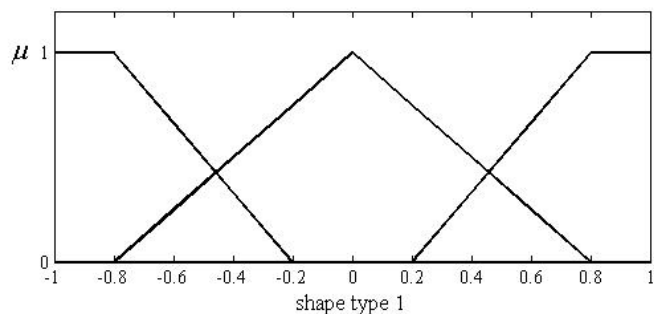
$$K_{Iv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{2}{M} \omega_n^2 C_{dc} \quad (5.15)$$

$$K_{Pv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{4}{0.8} 0.707(10\pi)(150 \times 10^{-6}) = 0.0136$$

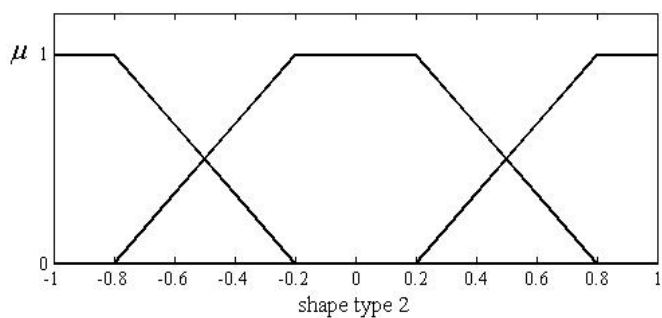
$$K_{Iv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{2}{0.8} (10\pi)^2 (150 \times 10^{-6}) = 0.3021$$

การออกแบบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี

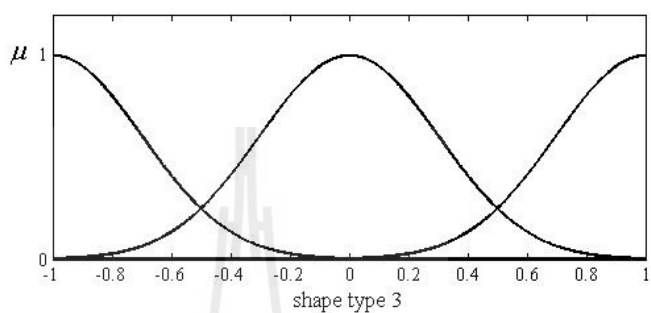
จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังรูปที่ 5.10 ที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว ในที่นี้ผู้วิจัยจะเริ่มต้นทำการพิจารณาการออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีก่อน โดยในหัวข้อนี้จะเป็นการออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีในส่วนของรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก (membership function shape) ของอินพุตและเอาต์พุตควบคุม สำหรับนำไปใช้ควบคุมการฉีดกระแสชดเชยให้กับวงจรรองกำลังแอคทีฟ โดยในการออกแบบในที่นี้ใช้วิธีการทดสอบเปรียบเทียบการใช้ 4 รูปแบบฟังก์ชันสมาชิก ได้แก่ ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกแบบรูปสามเหลี่ยม แบบรูปสี่เหลี่ยมคางหมู แบบรูปเกาส์เซียน และแบบรูปประฆังคว่ำ ดังรูปที่ 5.13 ถึง 5.16 ตามลำดับ โดยในการทำการทดสอบโครงสร้างส่วนอื่น ๆ ของตัวควบคุมฟัซซีจะทำการกำหนดใช้เหมือนกัน ได้แก่ การกำหนดตัวแปรภาษาของอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี (อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.5) กฎของฟัซซี (อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.6) และวิธีการอนุมานของฟัซซีแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุดของ Mamdani ที่มีการทำดีฟัซซีแบบการหาจุดศูนย์กลางหรือ COG (ดูได้จากหัวข้อที่ 5.7) ทั้งนี้เพื่อพิจารณาเฉพาะผลของรูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกที่มีต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามวิธีการอนุมานของฟัซซีผู้วิจัยจะทำการทดสอบในแต่ละวิธีเพื่อเลือกใช้อีกครั้งหนึ่งในหัวข้อที่ 5.7.3



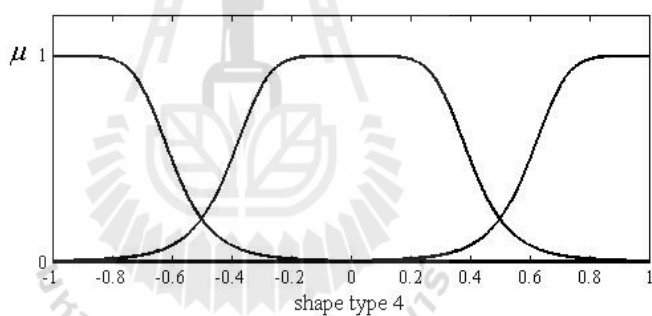
รูปที่ 5.13 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกแบบรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 5.14 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกแบบรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 5.15 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกแบบรูปเกาส์เซียน



รูปที่ 5.16 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกแบบรูปประพงค์ว่า

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบลักษณะรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีสำหรับ
ใช้ควบคุมกระแสชดเชย

Shape type	ค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่าย หลังการชดเชย				เวลาที่ใช้ในการจำลอง สถานการณ์ (s) ต่อ 5 คาบสัญญาณ
	เฟส a	เฟส b	เฟส c	เฉลี่ย	
1	1.61	1.76	1.81	1.73	428.24
2	1.85	1.73	1.69	1.76	431.44
3	1.89	1.64	1.85	1.80	440.96
4	2.10	1.92	2.08	2.04	438.23

จากผลการทดสอบลักษณะรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกดังตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า รูปร่างฟังก์ชันสมาชิก (shape type) ทั้ง 4 รูปแบบใช้เวลาสำหรับการจำลองสถานการณ์ต่อ 5 คาบ สัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันดังค่าที่ปรากฏในตาราง อย่างไรก็ตามผลค่า %THD เฉลี่ยของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยกรณี shape type 1 (รูปร่างสามเหลี่ยม) ให้ค่า %THD เฉลี่ยดีที่สุดเท่ากับ 1.73% ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีแบบสามเหลี่ยมสำหรับนำไปใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟต่อไป

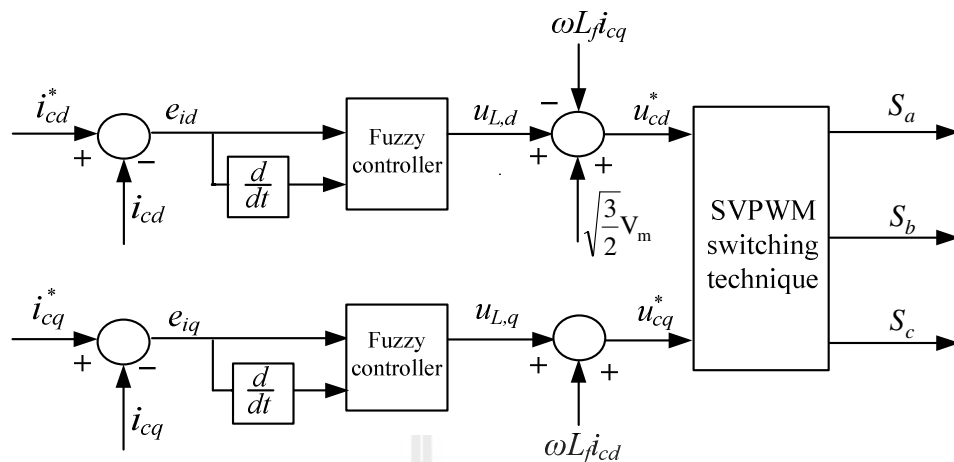
5.5 ตัวแปรภาษา

ตัวควบคุมฟัซซีถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อให้มีความฉลาดเหมือนกับมนุษย์ ซึ่งมนุษย์สามารถคิด อ่าน เข้าใจตัดสินใจ รวมถึงสามารถสรุปต่อเหตุการณ์ที่ซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตามมนุษย์มิได้มีกลไกการคิดแบบเชิงตัวเลขเช่นเดียวกับคอมพิวเตอร์หากแต่ใช้ภาษาช่วยในการอธิบายให้ความหมายแทนซึ่งทำให้เข้าใจได้ง่ายกว่าการอธิบายในเชิงตัวเลข ระบบการควบคุมแบบฟัซซีประกอบด้วยฟัซซีเซตซึ่งใช้ห้รับระบุค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรภายในระบบโดยตัวแปรดังกล่าวในระบบการควบคุมแบบฟัซซีจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบของการใช้ภาษาอธิบายให้ความหมายแทนเช่นเดียวกับความคิดของมนุษย์ ซึ่งเรียกว่า ตัวแปรภาษา (linguistic variables) หรือสามารถเรียกว่าตัวแปรฟัซซีโดยตัวแปรภาษาจะให้ค่าเป็นคำพูดที่มีความหมายตามที่ต้องการ เช่น “ช้า” “พอดี” หรือ “เร็ว” เป็นต้น ซึ่งค่าของตัวแปรเหล่านี้จะเรียกว่า ค่าเชิงภาษา (linguistic value) ซึ่งจะถูกนำไปแปลงเป็นค่าเชิงตัวเลขสำหรับประมวลผลด้วยฟังก์ชันสมาชิกต่อไป

5.5.1 การออกแบบตัวแปรภาษาสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.10 สามารถเขียนแยกเฉพาะส่วนของระบบการควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีบนแกนดีคิวได้ดังรูปที่ 5.17 จากรูปดังกล่าวแสดง การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฟัซซีบนแกนดีและคิว โดยอินพุต คือ ค่าผลต่างระหว่างค่ากระแสอ้างอิงบนแกนดีและคิว (i_{cd}^*, i_{cq}^*) กับค่ากระแสชดเชยจริง (i_{cd}, i_{cq}) ค่าความผิดพลาด (error: e_{id}, e_{iq}) ดังสมการที่ (5.16) และอินพุตค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด (error rate) ตามสมการที่ (5.17) สำหรับเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมฟัซซีจะถูกกำหนดให้เป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (L_f) ของวงจรรอกำลังแอกทีฟบนแกนดีและคิว (voltage: $U_{L,d}, U_{L,q}$) และค่า $U_{L,d}, U_{L,q}$ ดังกล่าวจะถูกนำไปดำเนินการทางคณิตศาสตร์และผ่านเทคนิคการการสวิตช์แบบ SVPWM สุดท้ายแล้วจะได้พัลส์สวิตช์สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรรอกำลังแอกทีฟสำหรับฉีดกระแสชดเชยต่อไป อย่างไรก็ตามตัวควบคุมฟัซซีทั้งสองแกนดังกล่าวผู้วิจัยใช้การออกแบบที่เหมือนกัน (ใช้ตัวควบคุมที่เหมือนกันทั้งสองแกน) ดังนั้นการอธิบายเกี่ยวกับการกำหนดตัวแปรทางภาษาของฟัซซีในที่นี้จะหมายถึงตัวควบคุมฟัซซีของทั้งสอง

แกน การออกแบบกำหนดตัวแปรภาษา และค่าเชิงภาษาสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยกรณีที่กำหนดใช้ค่าเชิงภาษา 3 ค่า แสดงได้ดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.17 ระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี

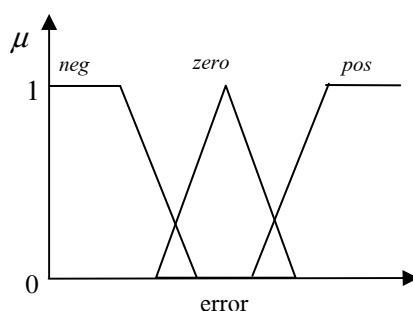
$$\text{error}(d) = e_{id} = i_{cd}^* - i_{cd}, \text{error}(q) = e_{iq} = i_{cq}^* - i_{cq} \quad (5.16)$$

$$\text{error rate}(d) = \frac{de_{id}}{dt}, \text{error rate}(q) = \frac{de_{iq}}{dt} \quad (5.17)$$

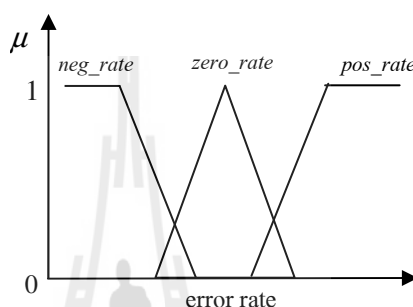
ตารางที่ 5.2 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของระบบควบคุมกระแสชดเชย

กรณีมีฟัซซีเซต 3 ค่าเชิงภาษา

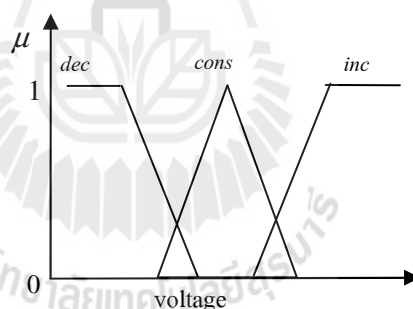
ค่าของระบบ	ตัวแปรภาษาและความหมาย		ค่าเชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	error ($e_{i,dq}$)	ค่าความผิดพลาด	neg (negative)	$i_{c,dq}^* < i_{c,dq}$ (น้อยกว่า)
			zero	$i_{c,dq}^* = i_{c,dq}$ (เท่ากับ)
			pos (positive)	$i_{c,dq}^* > i_{c,dq}$ (มากกว่า)
	error rate ($\frac{de_{i,dq}}{dt}$)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



รูปที่ 5.18 ค่าเชิงภาษาของตัวแปรอินพุต error



รูปที่ 5.19 ค่าเชิงภาษาของตัวแปรอินพุต errorrate



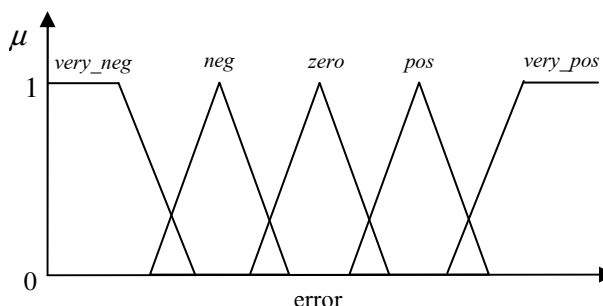
รูปที่ 5.20 ค่าเชิงภาษาของตัวแปรเอาต์พุต voltage

จากตารางที่ 5.2 อินพุต error (ค่าความผิดพลาด) อินพุต error rate (ค่าความผิดพลาด) และเอาต์พุต voltage (ค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ) ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรทางภาษา ในขณะที่ค่าเชิงภาษาของ error กำหนดให้ประกอบด้วย 3 ค่า คือ “neg” “zero” “pos” ดังฟังก์ชันเซต ดังรูปที่ 5.18 ส่วนค่าเชิงภาษาของตัวแปร error rate กำหนดให้มี 3 ค่าเช่นกัน คือ “neg_rate” “zero_rate” “pos_rate” ดังรูปที่ 5.19 และค่าเชิงภาษาของตัวแปร voltage ประกอบด้วย “dec” “cons” “inc” ดังรูปที่ 5.20 สำหรับค่าเชิงภาษาต่าง ๆ ดังกล่าวมีความหมายดังที่อธิบายไว้แล้ว ในตารางที่ 5.2 อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าเชิงภาษาเพียง 3 ค่าดังกล่าวถือเป็นพื้นฐานการของ ออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมฟัซซีสำหรับนำไปใช้ควบคุมกระแสขดลวด โดยถ้าต้องการความ

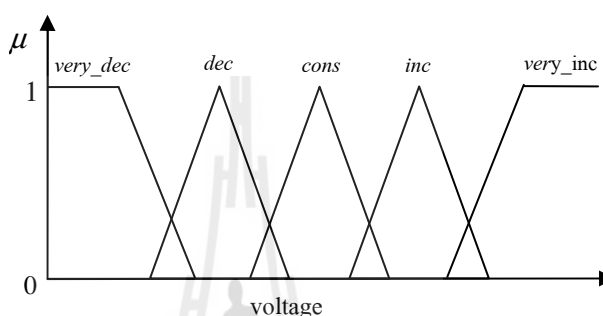
ละเอียดในการควบคุมเพื่อให้ได้สมรรถนะของตัวควบคุมดียิ่งขึ้นสามารถทำได้โดยการพิจารณา กำหนดเพิ่มค่าเชิงภาษาของตัวควบคุมได้และในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้พิจารณาเพิ่มค่าเชิงภาษาของ อินพุต error เป็นจำนวน 5 คำ คือ “very_neg” “neg” “zero” “pos” “very_pos” ดังรูปที่ 5.21 ซึ่งจาก การกำหนดค่าดังกล่าวจะทำให้ได้เอาต์พุต voltage สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยละเอียดเพิ่มขึ้น เป็น 5 ค่าเชิงภาษาเช่นกัน คือ “very_dec” “dec” “cons” “inc” “very_inc” ดังรูปที่ 5.22 อย่างไรก็ตาม สำหรับจำนวนค่าเชิงภาษาของอินพุต errorrate ผู้วิจัยยังคงเลือกใช้เพียง 3 คำเช่นเดิม (รูปที่ 5.19) คือ “neg_rate” “zero_rate” “pos_rate” ทั้งนี้เพื่อจำกัดความซับซ้อนของตัวควบคุมฟัซซี่ ไม่ให้มีซับซ้อนมากเกินไป อีกทั้งในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นให้ความสำคัญของค่าอินพุต error เป็น หลักจึงพิจารณาเพิ่มค่าเชิงภาษาของตัวแปรอินพุตเฉพาะค่า error เท่านั้น สำหรับความหมายของค่า เชิงภาษาของอินพุต error และเอาต์พุต voltage กรณี 5 ค่าเชิงภาษา แสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของระบบควบคุมกระแสชดเชยกรณีค่าอินพุต error และ ค่าเอาต์พุต voltage มีฟัซซี่เซต 5 ค่าเชิงภาษา

ค่าของ ระบบ	ตัวแปรภาษาและความหมาย		ค่าเชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	error ($e_{i,dq}$)	ค่าความ ผิดพลาด	veryneg (very negative)	$i_{c,dq}^* \ll i_{c,dq}$ (น้อยกว่ามาก)
			neg (negative)	$i_{c,dq}^* < i_{c,dq}$ (น้อยกว่า)
			Zero	$i_{c,dq}^* = i_{c,dq}$ (เท่ากับ)
			pos (positive)	$i_{c,dq}^* > i_{c,dq}$ (มากกว่า)
			verypos (very positive)	$i_{c,dq}^* \gg i_{c,dq}$ (มากกว่ามาก)
	error rate ($\frac{de_{i,dq}}{dt}$)	อัตราการ เปลี่ยนแปลง ของค่าความ ผิดพลาด	neg_rate	ลบ
			zero_rate	คงที่
			pos_rate	บวก
เอาต์พุต	Output voltage ($u_{L,dq}$)	ค่า แรงดันไฟฟ้า ที่ตกคร่อม L_f	verydec(very decrease)	ลดลงมาก
			dec (decrease)	ลดลง
			cons(constant)	คงที่
			inc(increase)	เพิ่มขึ้น
			veryinc (very increase)	เพิ่มขึ้นมาก



รูปที่ 5.21 ค่าเชิงภาษาของตัวแปรอินพุต error กรณี 5 ค่าเชิงภาษา



รูปที่ 5.22 ค่าเชิงภาษาของตัวแปรเอาต์พุต voltage กรณี 5 ค่าเชิงภาษา

5.5.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมฟัซซี

กรณี ใช้ฟัซซี 3 ค่าเชิงภาษาและ 5 ค่าเชิงภาษา

การทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลัง แยกที่ระบบดังรูปที่ 5.10 โดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีที่มีการกำหนดใช้ค่าเชิงภาษาของอินพุต error และเอาต์พุต voltage เท่ากับ 3 ค่า และ 5 ค่า แสดงผลได้ดังตารางที่ 5.4 โดยโครงสร้างส่วนอื่น ๆ ของ ฟัซซี ได้แก่ กฎของฟัซซีได้จากหัวข้อที่ 5.6 โดยกรณีค่าเชิงภาษา 3 ค่าใช้กฎข้อที่ 4 ถึง 12 (9 กฎ) ส่วนกรณี 5 ค่าเชิงภาษาใช้กฎข้อที่ 1 ถึง 15 (15 กฎ) และสำหรับวิธีการอนุมานของฟัซซีใช้แบบ ค่าสูงสุด-ต่ำสุดของ Mamdani ที่มีการทำดีฟัซซีแบบ COG สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 5.7 เช่นกัน

จากตารางที่ 5.4 สังเกตได้ว่ากรณีการกำหนดใช้ค่าเชิงภาษาของอินพุต error และ เอาต์พุต voltage เท่ากับ 5 ค่าเชิงภาษา ให้ผลการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลัง แยกที่ฟ ที่ดีกว่ากรณีการกำหนดใช้ค่าเชิงภาษาเท่ากับ 3 ค่าเชิงภาษา โดยกรณีใช้ 5 ค่าเชิงภาษาให้ค่า %THD เฉลี่ยเท่ากับ 1.51% ในขณะที่กรณีการกำหนดใช้ 3 ค่าเชิงภาษาให้ค่า %THD เฉลี่ยมากกว่าเท่ากับ 1.73% อย่างไรก็ตาม เวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ต่อ 5 คาบสัญญาณ กรณีที่ 5 ค่าเชิงภาษา ใช้ เวลาในการประมวลผลที่มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากความซับซ้อนที่เพิ่มมากขึ้นของโครงสร้างตัว ควบคุมฟัซซี

ตารางที่ 5.4 ผลเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมพีชชี
กรณีที่ใช้พีชชีเซต 3 ค่าเชิงภาษาและ 5 ค่าเชิงภาษา

จำนวนค่า เชิงภาษา	ค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่าย หลังการชดเชย				เวลาที่ใช้ในการจำลอง สถานการณ์ (s) ต่อ 5 คาบสัญญาณ
	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

5.6 กฎของพีชชี

กฎของพีชชีคือเงื่อนไขและข้อปฏิบัติของตัวควบคุมพีชชีซึ่งจะถูกออกแบบหรือกำหนดขึ้นโดยผู้เชี่ยวชาญในระบบที่ต้องการควบคุมนั้นๆ ซึ่งรูปแบบของกฎพีชชีที่เป็นพื้นฐานจะประกอบด้วยเงื่อนไข IF-THEN (ถ้า-แล้ว) ดังนี้

IF x is A

THEN y is B

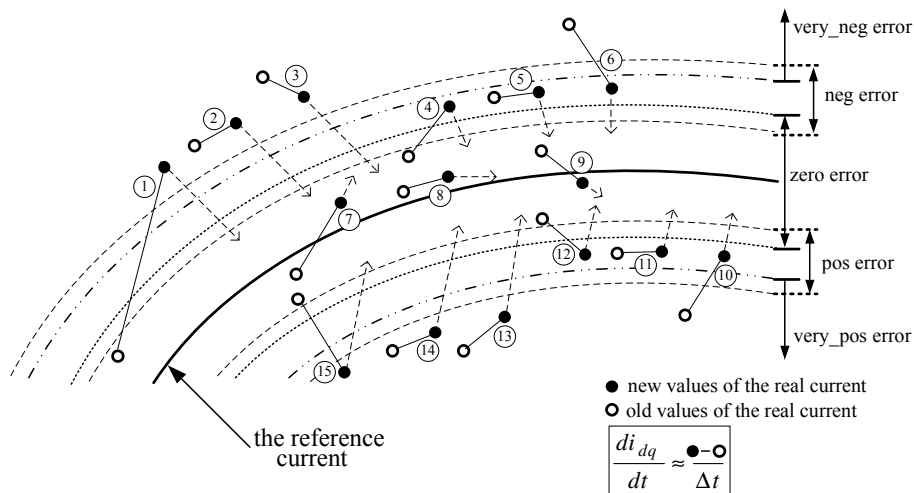
โดยที่ x และ y เป็นตัวแปรภาษาและ A และ B เป็นค่าเชิงภาษา

จากรูปแบบของกฎของพีชชีที่ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ IF และ THEN ซึ่งเมื่อเงื่อนไขของ IF เป็นจริงแล้ว ส่วน THEN จะถูกประเมิน ในทางทฤษฎีของพีชชีค่าเงื่อนไขของ IF จะมีความค่าเป็นสมาชิกของพีชชีในระดับหนึ่ง ส่วน THEN จะถูกประเมินและจะให้ค่าที่สัมพันธ์ในระดับค่าความเป็นสมาชิกดังกล่าวด้วยสำหรับค่าเงื่อนไขในส่วนของ IF และส่วนประเมินของ THEN สามารถมีได้หลายค่า ดังรูปแบบต่อไปนี้

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

THEN p is D q is E

จากรูปแบบกฎในข้างต้น จะพบว่าทุกเงื่อนไขในส่วนของ IF จะถูกประเมินไปพร้อม ๆ กัน และรวมกันด้วยตัวดำเนินการทางเซตเช่น อินเตอร์เซกชัน (AND) หรือยูเนียน (OR) การกำหนดจำนวนกฎในระบบควบคุมปกติจะไม่ให้มีมากเกินไป โดยจะเลือกใช้กฎเท่าที่จำเป็นเท่านั้น ทั้งนี้ เพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนของตัวควบคุมพีชชี



รูปที่ 5.23 การจำลองการวิเคราะห์การควบคุมกระแสชดเชยสำหรับการออกแบบกฎฟัซซี

5.6.1 การออกแบบกฎของฟัซซีสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย

จากการกำหนดค่าเชิงภาษาของอินพุตตัวแปร error จำนวน 5 ค่า และ อินพุต error_rate จำนวน 3 ค่า เพราะฉะนั้นจำนวนกฎที่เป็นไปได้ของระบบควบคุมนี้จึงมีเท่ากับ 15 กฎ ($5 \times 3 = 15$) ซึ่งแต่ละกฎได้ทำการออกแบบโดยการวิเคราะห์รูปสัญญาณดังรูปที่ 5.23 และมีรายละเอียดของแต่ละกฎดังนี้

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: กรณีที่ใช้จำนวนค่าเชิงภาษาของอินพุตตัวแปร error และอินพุต error_rate อย่างละ 3 ค่า จะให้จำนวนกฎที่เป็นไปได้เท่ากับ 9 กฎ ($3 \times 3 = 9$) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎข้อที่ 4 ถึง 12 เช่นกัน

จากกฎฟัซซีสำหรับควบคุมกระแสชดเชยทั้ง 15 กฎผู้วิจัยจะยกตัวอย่างการอธิบายความหมายของกฎข้อที่ 1 4 8 12 และ 15 ได้ดังนี้

ความหมายของกฎข้อที่ 1 ถ้าค่า error ($e_{i,dq}$) อยู่ในเซตของ *very_neg* และค่า error rate อยู่ในเซตของ *neg_rate* แล้วกำหนดให้ค่า output voltage อยู่ในเซตของ *very_dec* ซึ่งหมายความว่าถ้าค่ากระแสอ้างอิง ($i_{c,dq}^*$) น้อยกว่าค่ากระแสชดเชยจริง ($i_{c,dq}$) มาก ๆ และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชยจริง ($\frac{di_{dq}}{dt}$) มีค่าเป็นบวกแล้วกำหนดให้ลดระดับแรงดันไฟฟ้า $U_{L,dq}$ ลงมาก ๆ

ความหมายของกฎข้อที่ 4 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ *neg* และค่า error rate อยู่ในเซตของ *neg_rate* แล้ว กำหนดให้ค่า output voltage อยู่ในเซตของ *dec* ซึ่งหมายความว่าถ้า $i_{c,dq}^*$ น้อยกว่า $i_{c,dq}$ และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลง $i_{c,dq}$ เป็นบวกแล้วกำหนดให้ลดระดับแรงดันเอาต์พุต $U_{L,dq}$ ลง

ความหมายของกฎข้อที่ 8 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ *zero* และค่า error rate อยู่ในเซตของ *zero_rate* แล้ว กำหนดให้ค่า output voltage อยู่ในเซตของ *cons* ซึ่งหมายความว่าถ้า $i_{c,dq}^*$ เท่ากับค่า $i_{c,dq}$ และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของ $i_{c,dq}$ เท่ากับศูนย์แล้ว กำหนดให้เอาต์พุต $U_{L,dq}$ มีระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่

ความหมายของกฎข้อที่ 12 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ *dec* และค่า error rate อยู่ในเซตของ *pos_rate* แล้ว กำหนดให้ค่า output voltage อยู่ในเซตของ *inc* ซึ่งหมายความว่าถ้า $i_{c,dq}^*$ มากกว่าค่า $i_{c,dq}$ และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของ $i_{c,dq}$ เป็นลบแล้ว กำหนดให้เอาต์พุต $U_{L,dq}$ เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น

ความหมายของกฎข้อที่ 15 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ *very_dec* และค่า error rate อยู่ในเซตของ *pos_rate* แล้ว กำหนดให้ค่า output voltage อยู่ในเซตของ *very_inc* ซึ่งหมายความว่าถ้า $i_{c,dq}^*$ มากกว่าค่า $i_{c,dq}$ มาก ๆ และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของ $i_{c,dq}$ เป็นลบแล้ว กำหนดให้เอาต์พุต $U_{L,dq}$ เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นมาก ๆ

จำนวนกฎของฟัซซีทั้งหมดในข้างต้น สามารถใช้เมทริกซ์ขนาด 3×5 ในการแสดงได้ดังรูปที่ 5.24 ซึ่งการใช้เมทริกซ์แสดงกฎทั้งหมดดังกล่าว เรียกว่า หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ (fuzzy associative memory: FAM) การใช้ FAM ในการแสดงกฎจะสามารถแสดงอยู่ในรูปของเมทริกซ์ขนาด $M \times N$ สำหรับกรณี 2 อินพุตควบคุม และในรูปของเมทริกซ์ $M \times N \times K$ ในกรณี 3 อินพุตควบคุม เป็นต้นโดยที่ M และ N คือ จำนวนของค่าเชิงภาษาของแต่ละอินพุตเช่นระบบควบคุม

กระแสชดเชยที่มี 2 อินพุต (error และ error rate) ซึ่งประกอบด้วยตัวแปร error ที่มีค่าเชิงภาษาเท่ากับ 5 และกรณีตัวแปร error rate ที่มีจำนวนค่าเชิงภาษาเท่ากับ 3 ดังนั้น FAM ของระบบสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ขนาด 3×5 ได้ดังรูปที่ 5.24

		error				
		very_neg	neg	zero	pos	very_pos
error rate	neg_rate	very_dec	dec	inc	inc	very_inc
	zero_rate	very_dec	dec	cons	inc	very_inc
	pos_rate	very_dec	dec	dec	inc	very_inc

รูปที่ 5.24 กฎเมทริกซ์สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยในรูปแบบ FAM

จากกฎทั้ง 15 ข้อในข้างต้นเมื่อพิจารณากฎจะสังเกตได้ว่า กฎข้อที่ 1 2 และ 3 มีเป้าหมายการควบคุมที่เหมือนกัน คือ เมื่อค่าอินพุต error มีค่าเป็นลบมาก (very_neg) และที่ค่าอินพุต error rateใด ๆ จะกำหนดให้ค่าเอาต์พุต voltage ต้องลดระดับแรงดันที่ติดกรอบตัวเหนี่ยวนำมาก (very_dec) ดังนั้นจึงทำให้สามารถยุบรวมกฎทั้งสามข้อดังกล่าวเป็นกฎข้อเดียวกันได้โดยกำหนดให้เป็นกฎข้อที่ 1 ใหม่ ในทำนองเดียวกันกลุ่มกฎข้อที่ 4 5 6 กลุ่มกฎข้อที่ 10 11 12 และกลุ่มกฎข้อที่ 13 14 15 ก็สามารถยุบรวมเป็นกฎข้อที่ 2 ข้อที่ 6 และข้อที่ 7 ใหม่เช่นกัน ตามลำดับกลุ่มสำหรับกฎข้อที่ 7 8 และ 9 ที่เหลือจะถูกกำหนดลำดับข้อกฎใหม่ให้เป็นกฎข้อที่ 3 4 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งจากการพิจารณายุบรวมกลุ่มกฎและกำหนดลำดับกฎใหม่จะทำให้ลดกฎฟัซซีเหลือเพียง 7 ข้อ จากทั้งหมด 15 ข้อ จากผลดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีที่ได้มีความซับซ้อนน้อยลงดังสังเกตได้จากผลการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมฟัซซีกรณีที่ใช้กฎฟัซซีจำนวน 15 กฎและกรณีที่ใช้กฎฟัซซีจำนวน 7 กฎ ดังตารางที่ 5.5 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่า %THD เฉลี่ย ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ระบบรูปที่ 5.10 ของทั้งสองกรณีจำนวนกฎมีค่าเท่ากัน นั้นหมายความว่า การยุบรวมกฎยังคงให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีเหมือนเดิม แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือค่าเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ซึ่งสังเกตได้ว่ากรณีที่ใช้กฎฟัซซีเท่ากับ 7 กฎ ใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่น้อยกว่าเท่ากับ 361.46 วินาที ในขณะที่กรณี 15 กฎ ต้องใช้เวลามากกว่าเท่ากับ 535.04 จากผลดังกล่าวหมายถึงสามารถลดความซับซ้อนของตัวควบคุมฟัซซีได้โดยยังคงสมรรถนะการควบคุมได้ดีเหมือนเดิม

กฎข้อที่ 1 IF error = very_neg THEN voltage = very_dec (กฎข้อที่ 1 2 3)
 กฎข้อที่ 2 IF error = neg THEN voltage = dec (กฎข้อที่ 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 (กฎข้อที่ 10 11 12)
 กฎข้อที่ 7 IF error = very_pos THEN voltage = very_inc (กฎข้อที่ 13 14 15)

ตารางที่ 5.5 ผลเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมฟัซซีกรณีที่ใช้กฎฟัซซีจำนวน 15 กฎและกรณีที่ใช้กฎฟัซซีจำนวน 7 กฎ

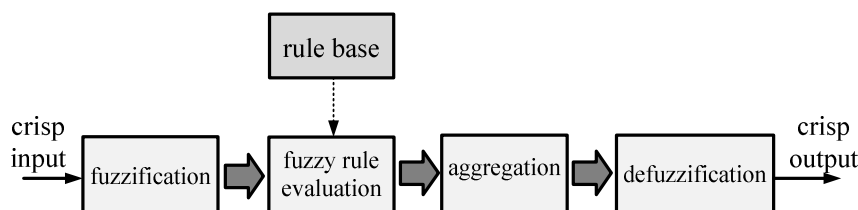
จำนวนกฎฟัซซี	ค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่าย หลังการชดเชย				เวลาที่ใช้ในการจำลอง สถานการณ์ (s) ต่อ 5 คาบสัญญาณ
	เฟส a	เฟส b	เฟส c	เฉลี่ย	
15	1.4424	1.5457	1.5460	1.5122	535.04
7	1.4424	1.5457	1.5460	1.5122	361.46

5.7 การอนุมานฟัซซี

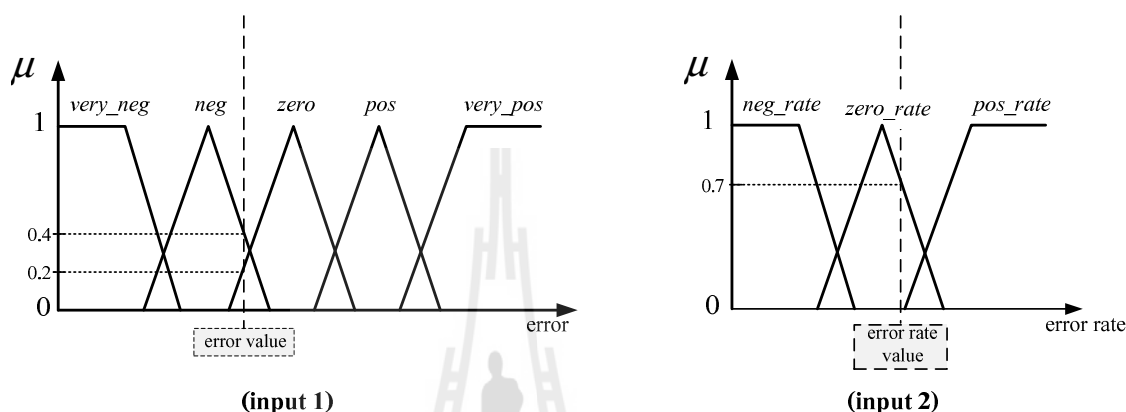
การอนุมานฟัซซี (fuzzy inference) คือ กระบวนการส่งค่า (mapping) อินพุตของระบบควบคุมไปเป็นเอาต์พุตโดยใช้หลักทฤษฎีของฟัซซีเซต วิธีการอนุมานที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธีการ คือ การอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani และการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno ซึ่งมีรายละเอียดต่อไปนี้

5.7.1 การอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani

การอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง ซึ่งการอนุมานแบบวิธีดังกล่าวได้ถูกนำเสนอในปี 1974 โดยศาสตราจารย์ Mamdani (Mamdani E.H., 1974, อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) แห่งมหาวิทยาลัยลอนดอน (London university) ซึ่งในครั้งแรกที่นำเสนอได้นำไปใช้กับระบบการควบคุมเครื่องจักรไอน้ำและหม้อต้มไอน้ำ กระบวนการอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani ประกอบด้วย 4 ส่วนที่สำคัญ คือ การทำฟัซซี (fuzzification) การประเมินกฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) การรวมกฎ (aggregation) และการทำให้ฟัซซี (defuzzification) ดังแสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 5.25 โดยในส่วนของการประเมินกฎของฟัซซีต้องอาศัยฐานกฎ (rule base) ในการวิเคราะห์ร่วมด้วย



รูปที่ 5.25 กระบวนการอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani

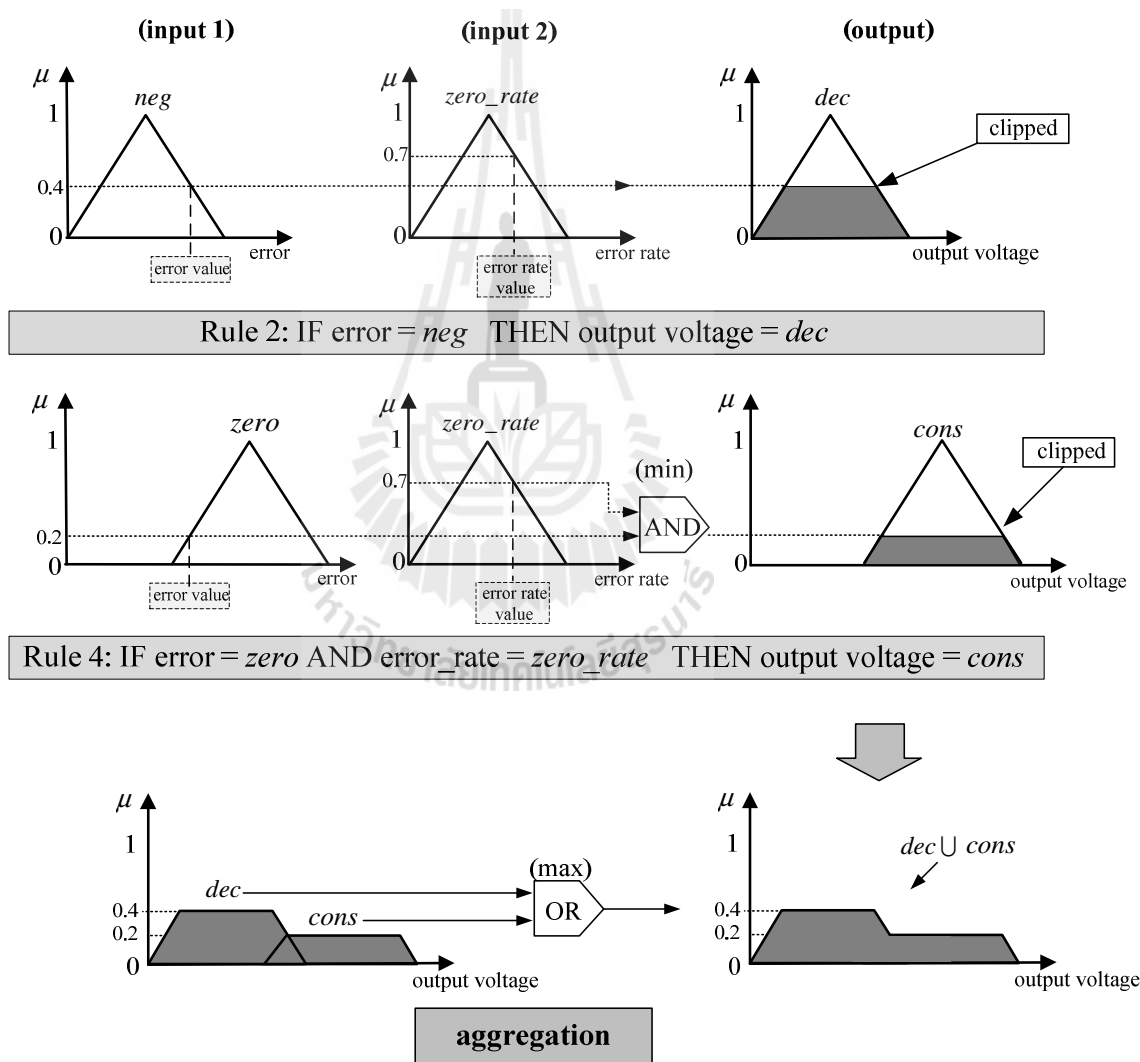


รูปที่ 5.26 ตัวอย่างการทำฟัซซีของระบบควบคุมกระแสชดเชย

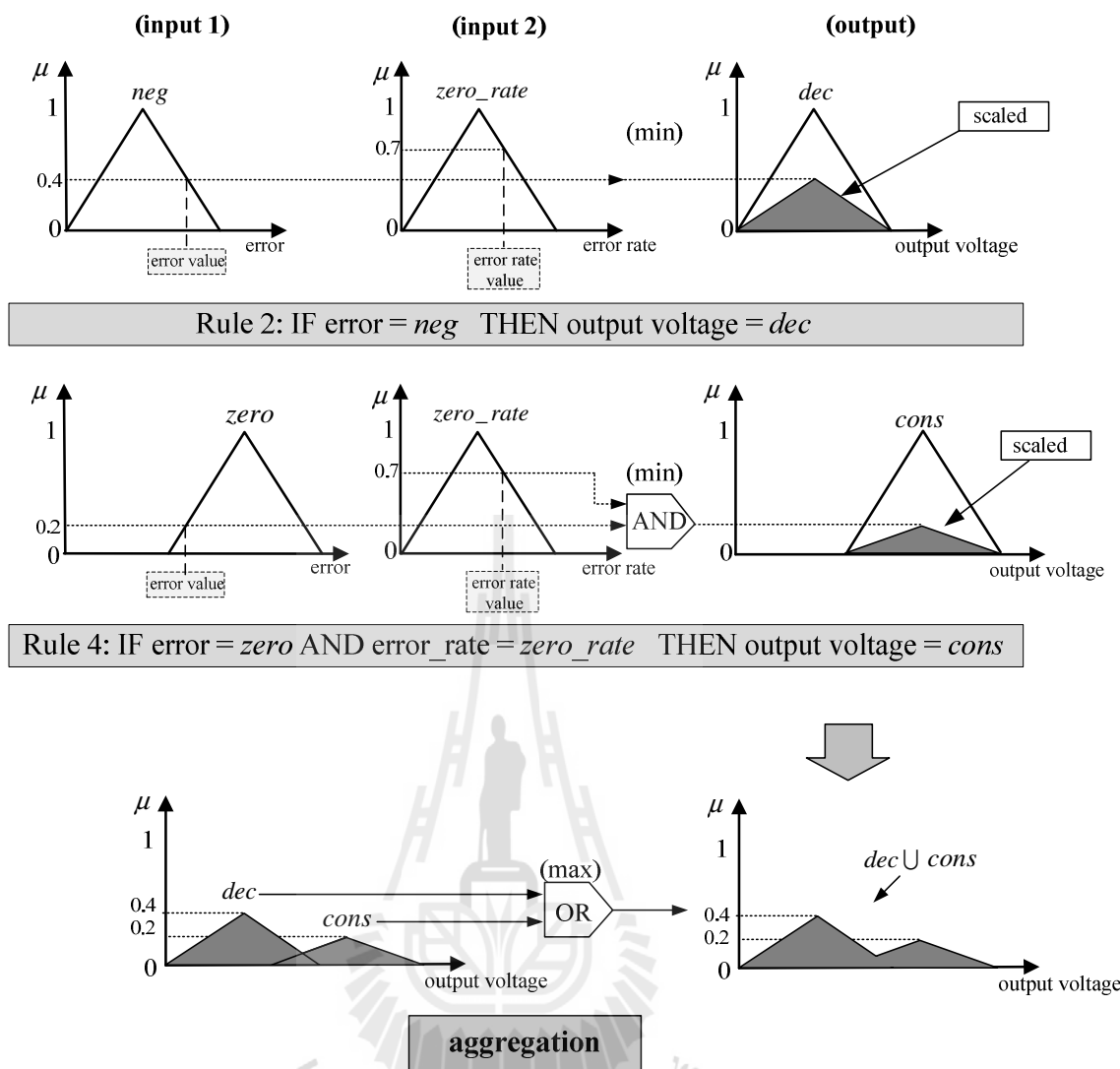
การทำฟัซซี คือ การระบุค่าเชิงภาษา และการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต (crisp input) ระบบที่ต้องการควบคุม โดยค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตจะสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันแสดงสมาชิกที่ถูกเลือกใช้ (สามารถดูรายละเอียดการคำนวณได้ในหัวข้อที่ 5.4) ยกตัวอย่างการทำฟัซซีสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยได้ดังรูปที่ 5.26 โดยการอธิบายได้ทำการสมมุติให้ค่า error และค่า error rate อยู่ตำแหน่งปรากฏดังรูป คือ ค่าอินพุต error ตกอยู่ในเซตค่าเชิงภาษา neg และ zero ที่ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ และกรณีอินพุต error rate มีค่าอยู่ในเซตค่าเชิงภาษา zero_rate ด้วยค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.7

การประเมินกฎของฟัซซี คือ การตรวจสอบค่าเชิงภาษาของตัวแปรอินพุตทุกตัวภายในระบบควบคุมว่าอยู่ในกฎหรือเงื่อนไขส่วน IF ในข้อใดและด้วยค่าความเป็นสมาชิกเท่าไร จากนั้นจึงจะดำเนินการกำหนดค่าเอาต์พุตเชิงภาษาตามส่วนของ THEN ในกฎนั้น ๆ ด้วยวิธีการตัดยอด (clipped) หรือวิธีการปรับขนาด (scaled) ฟัซซีเซตของเอาต์พุตด้วยค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของตัวแปรอินพุตนั้น ๆ (ค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของตัวแปรอินพุตจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้เชื่อมระหว่างอินพุตแต่ละตัวในส่วน IF เช่น AND (min) หรือ OR (max) หรืออาจไม่พิจารณาตัวดำเนินการเชื่อมต่อนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบเป็นต้น)

การรวมกฎ คือ การหาผลลัพธ์ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตจากกฎที่ได้รับการประเมินแล้ว(กฎที่เงื่อนไขเป็นจริง) โดยจะรวมพีชชีเซตค่าเชิงภาษาของเอาต์พุตของทุกกฎที่เป็นจริงให้เป็นเซตเดียวกันเพียงหนึ่งเซต ทั้งนี้เนื่องจากค่าของตัวแปรอินพุตหนึ่งค่าสามารถอยู่ในเงื่อนไขของกฎได้หลายกฎพร้อมกัน สำหรับการรวมพีชชีเซตค่าเชิงภาษาของเอาต์พุตของทุกกฎจะใช้ตัวดำเนินการยูเนียน(OR) เป็นตัวดำเนินการซึ่งหมายถึงการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าสูงสุดพีชชีเซต การรวมกฎที่ได้จากการประเมินแบบตัดค่ายอดจะเรียกว่า การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด (maximum-minimum) ส่วนกรณีการรวมกฎที่ใช้กระบวนการประเมินกฎแบบการคูณเรียกว่า การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ผลคูณ (maximum-product)



รูปที่ 5.27 การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด



รูปที่ 5.28 การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ผลคูณ

ตัวอย่างการประเมินกฎของฟัซซีและการรวมกฎสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย เช่น จากการทำฟัซซีพบว่า ค่าอินพุต error และค่า errorrate เข้าเงื่อนไขของกฎข้อที่ 2 และ 4 คือ

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

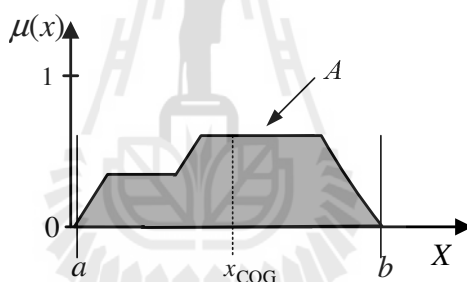
กฎข้อที่ 4 IF error = *zero* AND error_rate = *zero_rate* THEN voltage = *cons*

จากกฎในข้างต้นการประเมินผลในส่วนของ THEN แบบการตัดยอดฟัซซีเซตค่าเชิงภาษาของเอาต์พุตด้วยค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของตัวแปรอินพุตสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 5.27 และสำหรับการประเมินผลในส่วนของ THEN แบบการคูณฟัซซีเซตค่าเชิงภาษาของเอาต์พุตด้วยค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของตัวแปรอินพุตอธิบายได้ดังรูปที่ 5.28 เช่นกัน

การทำดีฟัซซี่ คือ ขั้นตอนในการแปลงค่าผลลัพธ์ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตจากผลรวมกฎให้อยู่ในรูปของค่าเอาต์พุตชัดเจน (crisp output) โดยวิธีการทำดีฟัซซี่มีหลายวิธีด้วยกัน 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 โดยในแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธี COG

การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วงหรือวิธี COG ของเซตผลผลลัพธ์ฟังก์ชันสมาชิกฟัซซี่เซตเอาต์พุต (A) สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.29 ซึ่งอาศัยการคำนวณหาค่าเอาต์พุตชัดเจนตามสมการที่ (5.18) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการคำนวณหาจุดศูนย์กลางถ่วงจะใช้นิยามแบบประมาณค่าโดยการชักตัวอย่างดังสมการที่ (5.19) ตัวอย่างการทำดีฟัซซี่ของระบบควบคุมกระแสชดเชยดังรูปที่ 5.30 โดยได้ทำการสมมติให้ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของฟัซซี่เซตเอาต์พุตมีค่าดังปรากฏในรูปดังกล่าว



รูปที่ 5.29 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ COG

$$x_{\text{COG}} = \frac{\int_a^b \mu(x) x dx}{\int_a^b \mu(x) dx} \quad (5.18)$$

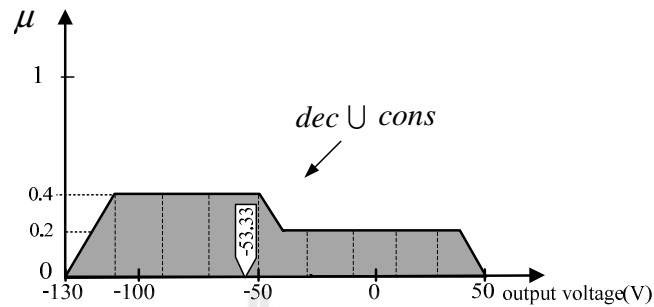
$$x_{\text{COG}} = \frac{\sum_{x=a}^b \mu(x) x}{\sum_{x=a}^b \mu(x)} \quad (5.19)$$

โดยที่ x คือ ค่าตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต

$\mu(x)$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่ง x

จากรูปที่ 5.30 การคำนวณหาค่าเอาต์พุต x_{COG} สามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

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



รูปที่ 5.30 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ COG

สำหรับค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ COG เท่ากับ -53.33 ให้ความหมายว่าระบบควบคุมกระแสชดเชยต้องลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ -53.33 V เพื่อให้กระแสชดเชยมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามการคำนวณแบบ COG แบบประมาณจะมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นเมื่อกำหนดให้การชักตัวอย่างมีมากยิ่งขึ้น

การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธี BOA

การทำดีฟัซซี่เพื่อหาค่าของเอาต์พุตโดยใช้วิธี BOA คือการกำหนดเงื่อนไขค่าความเป็นสมาชิก $(\mu(x)^*)$ ของเซตผลผลิตลัพธ์ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตดังสมการที่ (5.20) เป็นตัวกำหนดค่าเอาต์พุตของระบบที่ต้องการควบคุม

$$\mu(x)^* \geq \frac{\sum \mu(x)}{2} \quad (5.20)$$

จากสมการที่ (5.20) ผลรวมค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของเซตเอาต์พุตแต่ละตำแหน่ง x จะถูกนำมาหารด้วยค่า 2 เพื่อจะได้ค่าเงื่อนไขค่า $\mu(x)^*$ สำหรับนำไปตรวจสอบเพื่อหาค่าเอาต์พุตที่มีการคำนวณตามสมการที่ (5.21)

$$\mu(x)_n^* = \mu(x)_{n-1}^* + \mu(x)_n \quad (5.21)$$

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

จากสมการที่ (5.21) ค่าความเป็นสมาชิกของรอบการตรวจสอบที่ 0 ($\mu(x)_0^*$) จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 และจากนั้นจะทำการตรวจสอบค่าความเป็นสมาชิกที่ตำแหน่ง x ค่าแรกโดยถ้าค่าความเป็นสมาชิกไม่เป็นไปตามค่าเงื่อนไขสมการที่ (5.20) จะทำการเพิ่มจำนวนรอบการตรวจสอบเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่า $\mu(x)_n^*$ จะเป็นไปตามเงื่อนไข ($\mu(x)_n^* \geq \mu(x)^*$) โดยค่าตำแหน่ง x ที่ทำให้เงื่อนไขเป็นจริงดังกล่าวจะถูกใช้เป็นค่าเอาต์พุตของระบบควบคุม (x_{BOA}) ยกตัวอย่างกับระบบควบคุมกระแสชดเชยที่มีเซตผลลัพธ์ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตดังรูปที่ 5.31 ซึ่งพิจารณาข้อมูลค่าความเป็นสมาชิกที่ตำแหน่ง x ต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5.6 จากตารางดังกล่าวสามารถคำนวณหาค่าเงื่อนไข $\mu(x)^*$ ได้ดังนี้

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

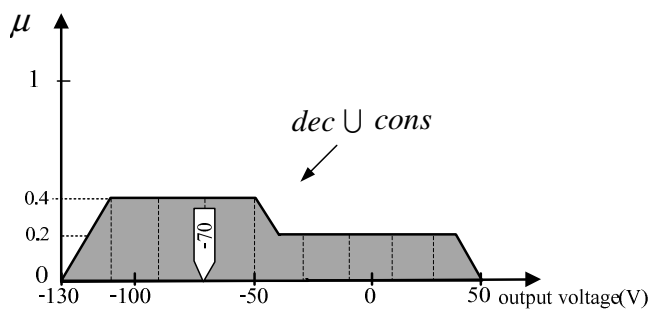
ตารางที่ 5.6 ข้อมูลค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซตเอาต์พุตระบบควบคุมกระแสชดเชย

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

จากค่าเงื่อนไข $\mu(x)^*$ ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 1.2 ดังกล่าวจึงดำเนินการคำนวณค่า $\mu(x)_n^*$ ตามสมการที่ (5.21) เพื่อตรวจสอบหาค่าเอาต์พุตของระบบควบคุมดังตารางที่ 5.7 ซึ่งสุดท้ายแล้วจะพบว่าจำนวนรอบการตรวจสอบที่ $n=3$ ให้ค่า $\mu(x)_3^* = 1.2$ เป็นไปตามเงื่อนไข ($\mu(x)_n^* \geq \mu(x)^*$) ซึ่งที่ $n=3$ ค่าตำแหน่ง x มีค่าเท่ากับ -70 ดังนั้นการตัดฟuzzyด้วยวิธี BOA ให้ค่าเอาต์พุตเท่ากับ -70 ซึ่งหมายถึงระบบควบคุมกระแสชดเชยต้องลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ -70 V ดังรูปที่ 5.31

ตารางที่ 5.7 การตรวจสอบค่าความเป็นสมาชิกภาพ

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



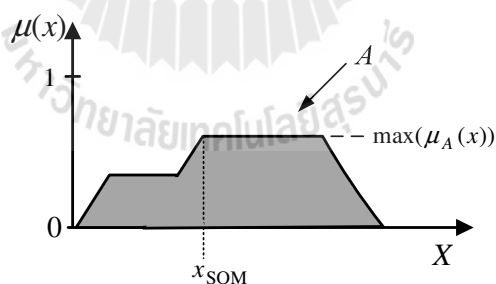
รูปที่ 5.31 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ BOA

การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธี SOM

การทำดีฟัซซี่แบบ SOM เป็นวิธีการหาค่าเอาต์พุตโดยการหาค่าตำแหน่ง x ที่น้อยที่สุดที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุด ซึ่งค่าเอาต์พุตดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.32 และคำนวณได้จากสมการที่ (5.22) ดังนี้

$$x_{\text{SOM}} = \min\{x \mid \mu(x) = \max(\mu_A(x))\} \quad (5.22)$$

โดยที่ $\mu_A(x)$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตเอาต์พุต A ทุกตำแหน่ง x
 $\max(\mu_A(x))$ คือ การเปรียบเทียบหาค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดของฟัซซี่เซต
 เอาต์พุต A ทุกตำแหน่ง x



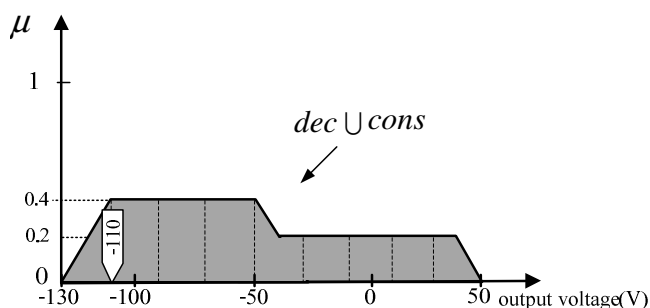
รูปที่ 5.32 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ SOM

ตัวอย่างการทำดีฟัซซี่แบบ SOM สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.33 จากรูปดังกล่าว สามารถคำนวณหาค่าเอาต์พุตได้ดังต่อไปนี้

$$\max(\mu_A(x)) = 0.4 \quad ; \quad A = \text{dec} \cup \text{cons}$$

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

จากค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำฟัซซีแบบ SOM เท่ากับ -110 ดังกล่าวให้
ความหมายว่าระบบควบคุมกระแสชดเชยต้องลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกร้อมตัวเหนี่ยวนำมี
เท่ากับ -110 V



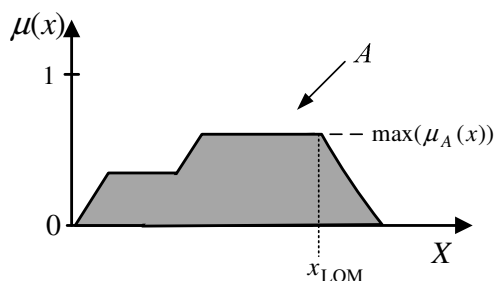
รูปที่ 5.33 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำฟัซซีแบบ SOM

การทำฟัซซีด้วยวิธี LOM

การทำฟัซซีแบบ LOM เป็นวิธีการหาค่าเอาต์พุตที่คล้ายกับวิธี SOM แต่ใช้การหา
ค่าตำแหน่ง x ที่มากที่สุดที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดแทนซึ่งค่าเอาต์พุตดังกล่าวสามารถพิจารณา
ได้ดังรูปที่ 5.34 และการคำนวณแสดงได้ดังสมการที่ (5.23) สำหรับตัวอย่างการทำฟัซซีแบบ
LOM สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.35 จากรูปดังกล่าว การ
คำนวณหาค่าเอาต์พุตได้ดังต่อไปนี้

$$x_{\text{LOM}} = \max\{x \mid \mu(x) = \max(\mu_A(x))\} \quad (5.23)$$

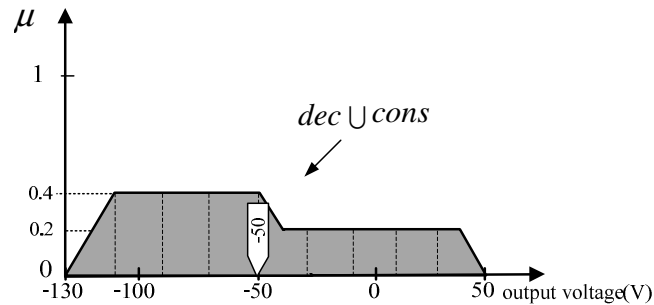
จากค่าเอาต์พุตให้ความหมายว่าระบบควบคุมกระแสชดเชยต้องลดระดับ
แรงดันไฟฟ้าที่ตกร้อมตัวเหนี่ยวนำมีเท่ากับ -50 V



รูปที่ 5.34 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำฟัซซีแบบ LOM

$$\max(\mu_A(x)) = 0.4 \quad ; \quad A = dec \cup cons$$

$$x_{SOM} = \max\{x \mid \mu(x) = \max(\mu_A(x))\} = -50$$

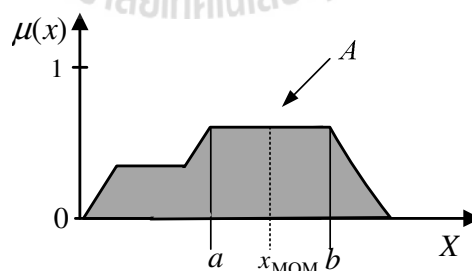


รูปที่ 5.35 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ LOM

การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธี MOM

การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธี MOM เป็นวิธีการหาค่าเอาต์พุตโดยใช้การคำนวณหาค่าเฉลี่ยตำแหน่ง x ที่อยู่ในช่วงค่าความเป็นสมาชิกระดับสูงสุด ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.36 จากรูปดังกล่าวค่า a คือ ค่าตำแหน่ง x ที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดค่าแรก (สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (5.22)) และ b คือค่าตำแหน่ง x ที่ระดับความเป็นสมาชิกสูงสุดค่าสุดท้าย (คำนวณหาได้จากสมการที่ (5.23)) และค่า x_{MOM} คือ ค่าตำแหน่ง x เอาต์พุตของระบบซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.24) ดังนี้

$$x_{MOM} = \frac{a + b}{2} \quad (5.24)$$

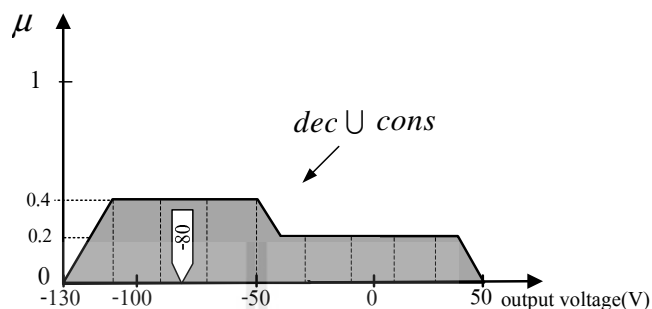


รูปที่ 5.36 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ MOM

ตัวอย่างการทำดีฟัซซี่แบบ MOM สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.37 จากรูปดังกล่าว จะเห็นว่าค่า a และ b มีค่าเท่ากับ -110 และ -50 ตามลำดับ ดังนั้นค่าเอาต์แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ MOM จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

โดยค่าเอาต์พุตเท่ากับ -80 ดังกล่าวให้ความหมายว่าระบบควบคุมกระแสชดเชย ต้องลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีเท่ากับ -80 V



รูปที่ 5.37 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ MOM

5.7.2 การอนุมานฟัซซี่แบบ Takagi-Sugeno

ในปี ค.ศ 1985 Takagi and Sugeno (Takagi K. and Sugeno M., 1985, อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) ได้นำเสนอวิธีการอนุมานฟัซซี่ที่แตกต่างจาก Mamdani ในส่วนของรูปแบบของฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต โดย Takagi-Sugeno ได้ใช้เส้นตรงแทนการใช้ฟังก์ชันสมาชิกแบบฟัซซี่เซตและส่วนของกฎเงื่อนไขและการประเมินจึงสามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

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 (ฟัซซี่เซต)

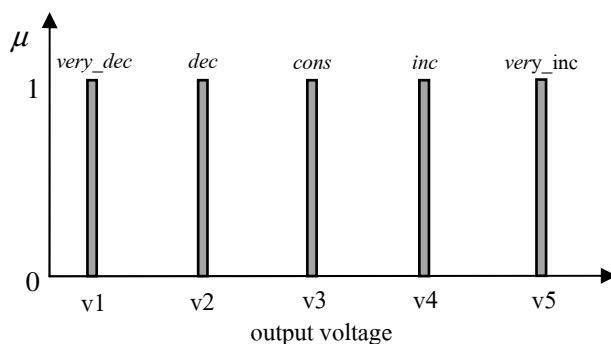
$f(x, y)$ คือ ฟังก์ชันเส้นตรงแกนสัมพัทธ์แกน x,y

สำหรับฟังก์ชัน $f(x, y)$ ที่นิยมใช้ คือ ฟังก์ชันแบบจำลองฟัซซี่ของ Takagi-Sugeno อันดับศูนย์ (zero order Takagi-Sugeno fuzzy model) ซึ่งฟังก์ชัน $f(x, y)$ จะเป็นเพียงค่าคงที่ (k) เท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่อนข้างสะดวกและง่ายในขั้นตอนการรวมกฎ สำหรับรูปแบบของกฎและการประเมินที่ใช้แบบจำลองฟัซซี่อันดับศูนย์ดังกล่าว จะมีลักษณะดังนี้

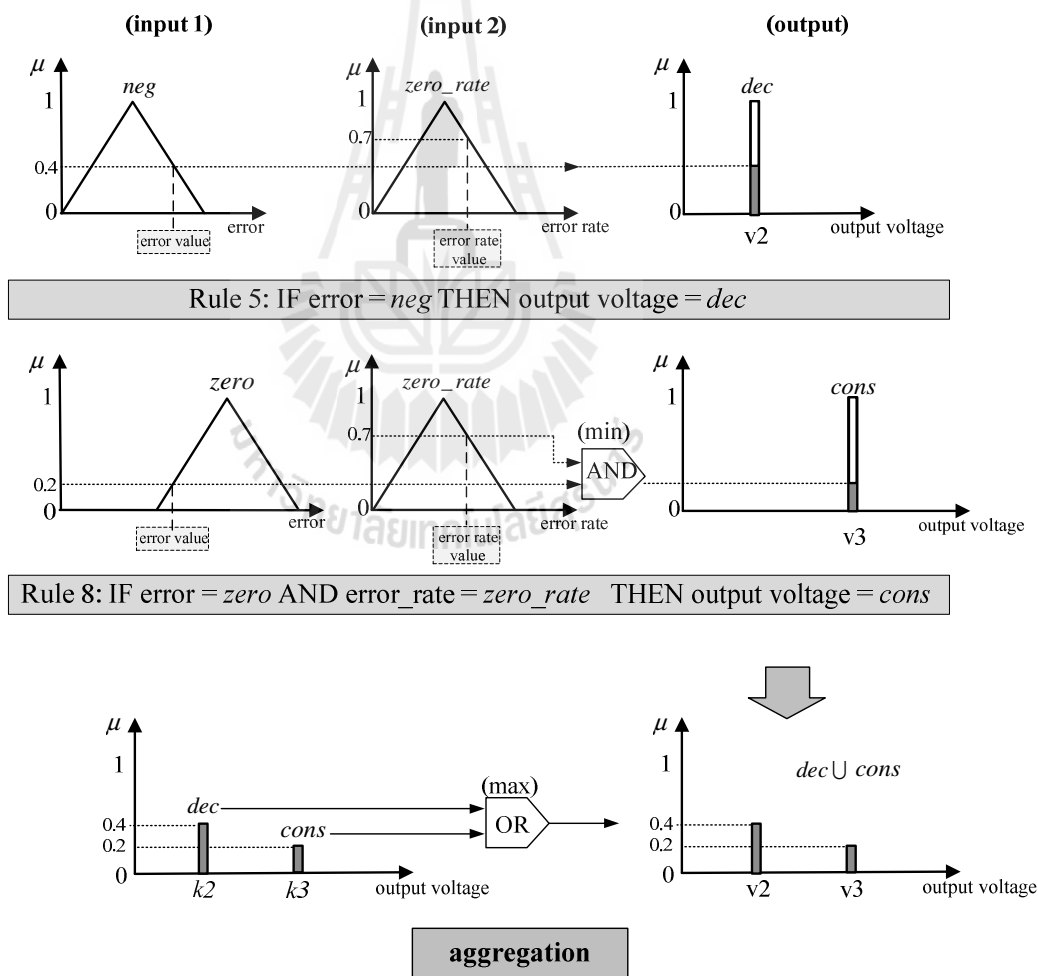
IF x is A AND y is B

THEN z is k

ยกตัวอย่างการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno กับระบบควบคุมกระแสชดเชย โดยรูปแบบฟังก์ชันเอาต์พุตที่เป็นเส้นตรงค่าคงที่ (v1-v5) แสดงได้ดังรูปที่ 5.38 การประเมินกฎ และการรวมกฎของข้อที่ 2 และ 4 แสดงได้ดังรูปที่ 5.39



รูปที่ 5.38 ค่าเชิงภาษาของตัวแปรเอาต์พุต output voltage



รูปที่ 5.39 การอนุมานแบบ Takagi-Sugeno

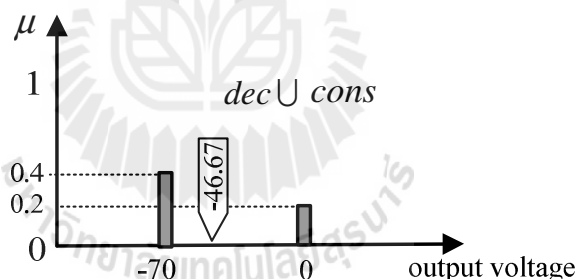
สำหรับการทำดีฟัซซี่เพื่อหาค่าเอาต์พุตของระบบควบคุมของการอนุমানแบบ Takagi-Sugeno เรียกว่าค่าน้ำหนักเฉลี่ย (weighted average หรือ WA) ซึ่งมีการคำนวณตามสมการที่ (5.25) โดยที่ m คือ เลขจำนวนจริง 1, 2, 3 ..., m

$$x_{WA} = \frac{\sum_{m=1}^m \mu(v_m) \times v_m}{\sum_{m=1}^m \mu(v_m)} \quad (5.25)$$

ตัวอย่างการทำดีฟัซซี่แบบ WA ของระบบควบคุมกระแสชดเชยแสดงได้ดังรูปที่ 5.40 โดยที่กำหนดให้ค่า k_2 และ k_3 เท่ากับ -70 และ 0 ตามลำดับ การคำนวณเพื่อหาค่าเอาต์พุตแสดงได้ดังนี้

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

จากค่าเอาต์พุตเท่ากับ -46.67 หมายความว่า ระบบควบคุมกระแสชดเชยจะต้องลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีเท่ากับ -46.67 V เพื่อลดระดับกระแสชดเชยลง



รูปที่ 5.40 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ WA

5.7.3 การทดสอบวิธีการอนุমানฟัซซี่สำหรับควบคุมกระแสชดเชย

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบวิธีการอนุমানแบบ Mamdeni และวิธี Takagi-Sugeno ที่ใช้วิธีการทำดีฟัซซี่ด้วยวิธีต่าง ๆ ดังที่ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ทั้งเพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของระบบรูปที่ 5.10 โดยผลการทดสอบดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 5.8 จากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่าการอนุমানฟัซซี่ของ Mamdeni แบบค่าสูงสุด-ต่ำสุดกรณีวิธีการดีฟัซซี่แบบ COG ให้ผลค่า %THD เฉลี่ยของกระแสทางด้านแหล่งจ่าย ภายหลังการชดเชยน้อยที่สุดเท่ากับ 1.51% ส่วนการอนุমানฟัซซี่ของ Mamdeni แบบค่าสูงสุด-ผลคูณวิธีการดีฟัซซี่แบบ BOA ให้ผลค่า %THD เฉลี่ยน้อยที่สุด เท่ากับ 1.53% ในขณะที่การอนุমান

ฟัซซีของ Takagi-Sugeno วิธีการดีฟัซซีแบบ WA ให้ผลค่า $%THD$ เฉลี่ยเท่ากับ 1.49% จากค่า $%THD$ ที่ดีที่สุดทั้งสามกรณีดังกล่าวถือได้ว่าให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลของเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ต่อ 5 คาบสัญญาณพบว่ากรณีการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno ใช้เวลาน้อยที่สุดเท่ากับ 287.58 วินาที ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno ที่มีการทำดีฟัซซีแบบ WA เป็นโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับนำไปใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟต่อไป

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบวิธีการอนุมานฟัซซีแบบ Mamdeni และ Takagi-Sugeno

วิธีการทำ ดีฟัซซี	ค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่าย หลังการชดเชย				เวลาที่ใช้ในการจำลอง สถานการณ์ (s) ต่อ 5 คาบสัญญาณ
	เฟส a	เฟส b	เฟส c	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

5.8 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอระบบการควบคุมแบบฟัซซีในส่วนของพื้นฐานทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับฟัซซี ได้แก่ ฟัซซีเซต การดำเนินการทางฟัซซีเซต ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกตัวแปรภาษา กฎของฟัซซี การอนุมานฟัซซี และการดีฟัซซีฟิเคชัน โดยการนำเสนอได้อธิบายสำหรับการนำไปใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ นอกจากนี้ยังได้มีการออกแบบ

โครงสร้างระบบการควบคุมแบบฟัซซีส่วนต่าง ๆ สำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้วิธีการทดสอบเปรียบเทียบวิธีต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอได้แก่ การทดสอบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก การทดสอบจำนวนค่าเชิงภาษา การทดสอบจำนวนกฎ และการทดสอบเปรียบเทียบวิธีการอนุมานของฟัซซี ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า การกำหนดใช้รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกแบบสามเหลี่ยม จำนวนค่าเชิงภาษาของอินพุต error ใช้จำนวน 5 ค่าเชิงภาษา คือ “very_neg” “neg” “zero” “pos” “very_pos” อินพุต errorrate ใช้ 3 ค่าเชิงภาษา คือ “neg_rate” “zero_rate” “pos_rate” และค่าเอาต์พุต voltage ใช้ 5 ค่าเชิงภาษา คือ “very_dec” “dec” “cons” “inc” “very_inc” จำนวนกฎของฟัซซี 7 กฎ และวิธีการอนุมานฟัซซีใช้แบบ Takagi-Sugeno ที่มีการทำดีฟัซซีฟิเคชันแบบการหาค่าน้ำหนักเฉลี่ยให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุด ซึ่งผู้วิจัยจะใช้ตัวควบคุมฟัซซีที่มีโครงสร้างส่วนต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวสำหรับควบคุมกระแสชดเชยต่อไป อย่างไรก็ตามในบทนี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงผลของจุดตำแหน่งต่าง ๆ ของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตฟัซซีเซต ซึ่งการนำเสนอการออกแบบจุดตำแหน่งต่าง ๆ ของฟังก์ชันสมาชิกดังกล่าวจะได้นำเสนอในบทต่อไป



บทที่ 6

การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรอง กำลังแอกทีฟด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

6.1 กล่าวนำ

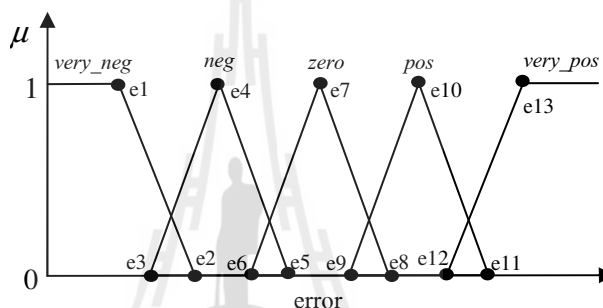
การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว ในบทนี้จะได้นำเสนอการออกแบบในส่วนของการพารามิเตอร์จุดฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyร่วมไปถึงได้พิจารณาออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใหม่ด้วยเช่นกัน โดยการออกแบบในที่นี่จะนำเสนอใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่าวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS) โดยมีเป้าหมายในการค้นหาค่า คือ ความคลาดเคลื่อนระหว่างกระแสชดเชยกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกจะต้องมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งค่าที่น้อยที่สุดดังกล่าวจะส่งผลทำให้ได้ค่า $%THD$ ทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังจากชดเชยมีค่าน้อยที่สุดเช่นกันรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyและวงจรกรองกำลังแอกทีฟอธิบายไว้ในหัวข้อ 6.2 ถึง 6.4 ดังต่อไปนี้

6.2 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyสำหรับควบคุมกระแสชดเชย

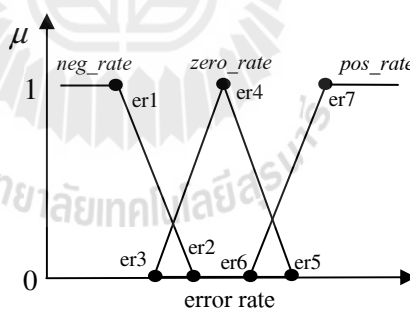
ในบทที่ผ่านมาผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเพื่อออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzyสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชย โดยโครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzyที่ได้ คือ ตัวควบคุมฟuzzyที่มีลักษณะรูปร่างแสดงความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมสำหรับค่าอินพุต error และค่า error rate การอนุมานฟuzzyใช้แบบ Sugeno อันดับศูนย์ ซึ่งจะใช้เส้นตรงโทแทนการใช้ฟuzzyเซตของค่าเอาต์พุต voltage สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย นอกจากนี้ผู้วิจัยได้กำหนดใช้ค่าเชิงภาษาสำหรับการควบคุมประกอบด้วยอินพุต error ใช้จำนวน 5 ค่าเชิงภาษา คือ “very_neg” “neg” “zero” “pos” “very_pos” อินพุต errorrate ใช้ 3 ค่าเชิงภาษา คือ “neg_rate” “zero_rate” “pos_rate” และค่าเอาต์พุต voltage ใช้ 5 ค่าเชิงภาษา คือ “very_dec” “dec” “cons” “inc” “very_inc” จากโครงสร้างของตัวควบคุมที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นสามารถเขียนสรุปแสดงเป็นรูปได้ดังรูปที่ 6.1 ถึง 6.3

จากรูปที่ 6.1 จะสังเกตได้ว่าโครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกของค่าอินพุต error ปรากฏตำแหน่งของฟuzzyเซตทั้งหมด 13 จุดตำแหน่ง คือ e1 ถึง e13 และจากรูปที่ 6.2 โครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกของค่าอินพุต error rate ปรากฏตำแหน่งฟuzzyเซตจำนวน 7 จุดตำแหน่ง คือ er1 ถึง er7 และกรณีโครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกค่าเอาต์พุต voltage ปรากฏตำแหน่งของเส้นตรงโทจำนวน 5 จุดตำแหน่ง คือ v1 ถึง v5 ดังรูปที่ 6.3 โดยทั้ง 25 จุดตำแหน่งดังกล่าวในหัวข้อนี้จะใช้วิธีการออกแบบโดยการสุ่มใช้ชุดข้อมูลจำนวน 5 ชุด ตามตารางที่ 6.1 ถึง 6.3 จากชุดข้อมูลตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก

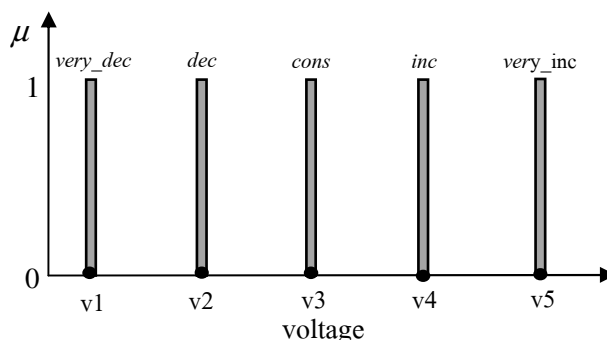
ของตัวควบคุมฟัซซีทั้ง 5 ชุด ดังกล่าวทำการทดสอบจำลองสถานการณ์ใช้ควบคุมกระแสชดเชยของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังรูปที่ 5.10 ในบทที่ 5 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยได้ดังตารางที่ 6.4 สังเกตได้ว่าที่ตำแหน่งจุดข้อมูลฟังก์ชันสมาชิกที่ต่างกันมีผลต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยโดยชุดข้อมูลที่ 1 ให้ผลค่า %THD น้อยที่สุดเท่ากับ 1.47% ซึ่งหมายถึงตัวควบคุมฟัซซีที่ออกแบบโดยใช้ชุดข้อมูลที่ 1 ให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยดีที่สุดเช่นกัน ด้วยเหตุนี้จุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกทั้ง 25 จุดดังกล่าวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องออกแบบให้แต่ละจุดมีความเหมาะสมเพื่อที่จะทำให้ตัวควบคุมฟัซซีมีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยดีที่สุดหรือให้ค่า %THD น้อยที่สุด ซึ่งในหัวข้อที่ 6.4 จะเป็นการนำเสนอการออกแบบจุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี โดยใช้วิธีการค้นหาที่เหมาะสมทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่าการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว



รูปที่ 6.1 โครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกของค่า error



รูปที่ 6.2 โครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกของค่า error rate



รูปที่ 6.3 โครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกของค่าเอาต์พุต voltage

ตารางที่ 6.1 การออกแบบจุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต error โดยวิธีการสุ่ม

ชุดข้อมูล	อินพุต error												
	<i>very_neg</i>		<i>nec</i>			<i>zero</i>			<i>Pos</i>			<i>very_pos</i>	
	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13
1	-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
2	-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
3	-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
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	-0.22	-0.15	-0.17	-0.12	-0.08	-0.10	-0.02	0.08	0.06	0.10	0.15	0.13	0.20

ตารางที่ 6.2 การออกแบบจุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต errorrate โดยวิธีการสุ่ม

ชุดข้อมูล	อินพุต errorrate						
	<i>neg_rate</i>		<i>zero_rate</i>			<i>pos_rate</i>	
	er1	er2	er3	er4	er5	er6	er7
1	-0.55	-0.05	-0.10	0.00	0.10	0.05	0.55
2	-2.00	-0.07	-0.13	0.00	1.21	1.19	1.78
3	-1.87	-0.46	-1.17	-0.01	0.45	0.09	0.98
4	-10.52	-2.16	-3.23	0.09	1.23	1.20	3.76
5	-0.10	-0.03	-0.08	0.01	0.09	0.04	0.11

ตารางที่ 6.3 การออกแบบจุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต voltage โดยวิธีการสุ่ม

ชุดข้อมูล	เอาต์พุต voltage				
	<i>very_dec</i>	<i>dec</i>	<i>cons</i>	<i>inc</i>	<i>very_inc</i>
	v1	v2	v3	v4	v5
1	-190.00	-60.00	0.00	60.00	190.00
2	-350.00	-250.00	100.00	170.00	450.00
3	-500.00	-95.65	-10.37	78.15	270.50
4	-150.00	-80.00	-40.00	50.00	300.00
5	-250.00	-10.00	75.00	200.00	550.00

ตารางที่ 6.4 ผลค่า %THD จากการทดสอบตัวควบคุมพีชชีที่ออกแบบโดยใช้วิธีการสุ่ม
ชุดข้อมูลจุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชี

ชุดข้อมูล	ค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่าย			
	เฟส a	เฟส b	เฟส c	ค่าเฉลี่ย
ก่อนการชดเชย				
-	26.37	26.40	26.40	26.39
หลังการชดเชย				
1	1.47	1.45	1.48	1.47
2	2.48	2.49	2.71	2.57
3	1.97	2.33	2.02	2.11
4	1.58	1.52	1.63	1.57
5	1.86	1.57	1.64	1.69

6.3 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีตามเชิงปรับตัว

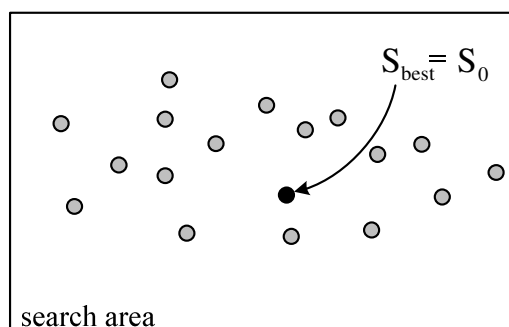
การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดแบบตามเชิงปรับตัวเป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามดั้งเดิม ทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงสมรรถนะการค้นหาให้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามหลักการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวยังคงใช้พื้นฐานของวิธีการค้นหาแบบตามดั้งเดิม ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดของอัลกอริทึมแบบตามได้ดังนี้

การค้นหาแบบตาม

การค้นหาค่าที่เหมาะสมแบบตาม (Tabu Search: TS) เป็นอัลกอริทึมที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization) ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวได้ถูกคิดค้นโดย Glover ในปี 1989 (Glover F, 1989, อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) และต่อมาได้ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบันเนื่องจากเป็นอัลกอริทึมที่มีความสามารถในการหลีกเลี่ยงคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่นและยังสามารถทำการค้นหาคำตอบจนกระทั่งให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (near global solution) ได้ สำหรับขั้นตอนการค้นหาแบบตามสามารถอธิบายได้ดังนี้

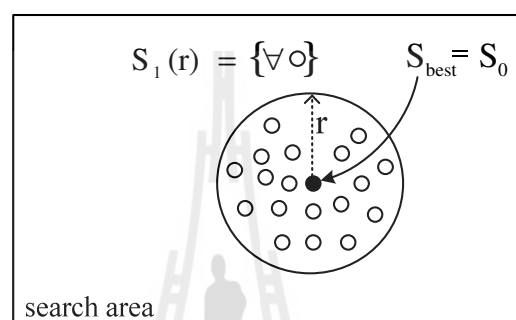
ขั้นที่ 1 กำหนดให้ count เป็นจำนวนรอบของการค้นหาและ $\text{count}_{\max}$ เป็นจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น (initial solution) หรือชุดพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหาภายในพื้นที่การค้นหา (search area) จำนวน M คำตอบ แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุด เป็นคำตอบเริ่มต้น (S_0) ซึ่งหมายถึง S_0 มีสถานะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นและกำหนดให้ค่า $S_{\text{best}} = S_0$ ดังรูปที่ 6.4



○ initial M solution

รูปที่ 6.4 การสุ่มคำตอบเริ่มต้น S_0 ในพื้นที่ค้นหา

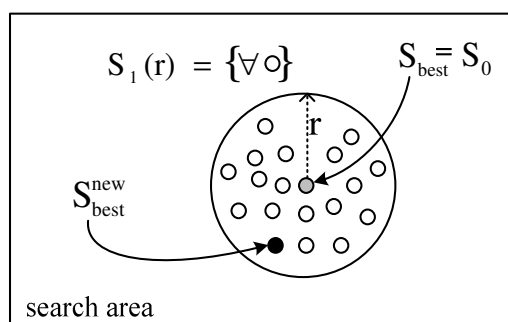


○ neighborhood N solution

รูปที่ 6.5 คำตอบรอบข้างภายในรัศมีการค้นหารอบ S_0

ขั้นที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบใหม่จำนวน N คำตอบ โดยคำตอบใหม่ดังกล่าวจะอยู่บริเวณรอบ ๆ คำตอบ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา (radius: r) กำหนดให้ $S_1(r)$ เป็นเซตของคำตอบที่ประกอบด้วยคำตอบใหม่ทั้งหมด N คำตอบซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.5

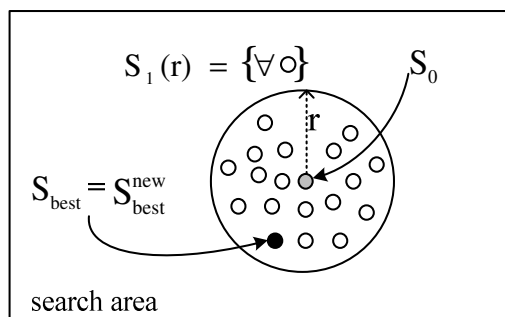
ขั้นที่ 4 ทำการประเมินค่าความเหมาะสมของคำตอบใหม่ที่อยู่ภายใน $S_1(r)$ ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุดกำหนดให้คำตอบนั้นเป็น S_{best}^{new} แสดงดังรูปที่ 6.6



○ neighborhood N solution

รูปที่ 6.6 การกำหนดคำตอบรอบข้างที่ดีที่สุดเป็น S_{best}^{new}

ขั้นที่ 5 ถ้าคำตอบ S_{best}^{new} ดีกว่า S_{best} จะกำหนดให้ S_{best} เท่ากับ S_{best}^{new} ดังรูปที่ 6.7 แต่ถ้า S_{best}^{new} ไม่ดีกว่า S_{best} จะกำหนดให้ค่า S_{best} คือค่าเดิม

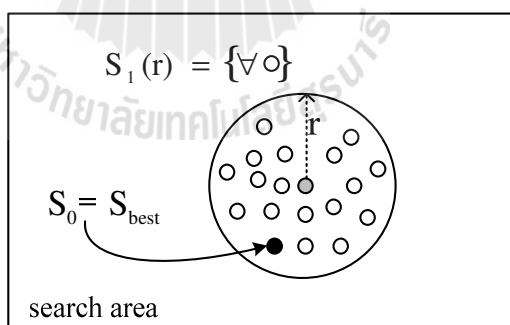


○ neighborhood N solution

รูปที่ 6.7 การกำหนดให้ S_{best}^{new} เป็น S_{best}

ขั้นที่ 6 กำหนดให้ S_0 เท่ากับ S_{best} ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.8

ขั้นที่ 7 ถ้า $count < count_{max}$ ให้กลับไปเริ่มที่ขั้นที่ 3 ใหม่ และทำการค้นหาจนกระทั่งได้ค่าเหมาะสมที่ต้องการ แต่ถ้า $count > count_{max}$ ให้หยุดการค้นหาโดยคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาจนครบจำนวนรอบสูงสุด จะเป็นคำตอบของระบบการค้นหา



○ neighborhood N solution

รูปที่ 6.8 การกำหนดให้ S_{best} เป็น

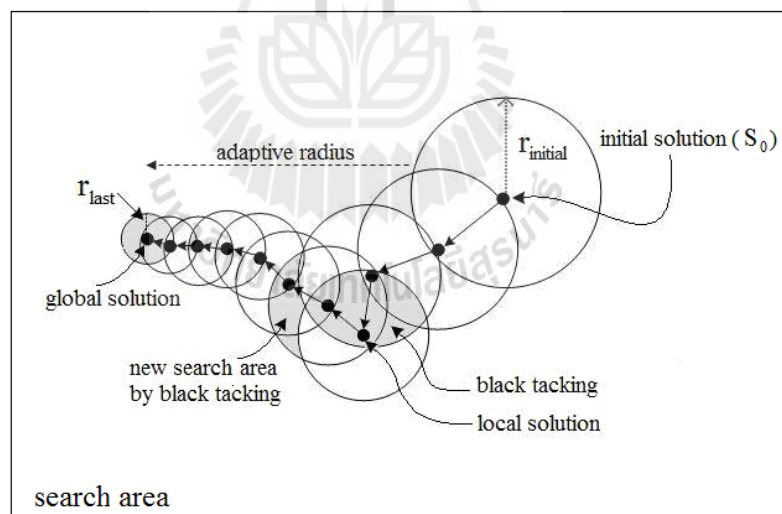
การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) เกิดขึ้นเนื่องจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูพื้นฐานยังให้ประสิทธิภาพการค้นหาไม่ดีเพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้

งานต่าง ๆ ในปี พ.ศ 2545 กองพันอารีรักษ์ และ สราวุฒิ สุจิตจร จึงได้พัฒนาและปรับปรุงสมรรถนะการค้นหของอัลกอริทึมดังกล่าวโดยการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในอัลกอริทึม (กองพันอารีรักษ์ และ สราวุฒิ สุจิตจร, 2545) โดยกลไกแรก คือ การเดินย้อนรอย (black tacking) กลไกดังกล่าวเป็นขั้นตอนที่อนุญาตให้ระบบการค้นหาสามารถกลับไปค้นหาคำตอบบริเวณพื้นที่เดิมที่เคยถูกค้นหามาก่อน ซึ่งผลจากการทำดังกล่าวจะทำให้ระบบการค้นหามีโอกาสที่จะค้นหาคำตอบในบริเวณใหม่และหลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ กลไกที่สอง คือ การปรับค่ารัศมีการค้นหา (adaptive radius) ซึ่งจะทำให้การปรับลดค่ารัศมีการค้นหาตามสมการที่ (6.1) ในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง สำหรับแผนภาพลักษณะการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวดูได้จากรูปที่ 6.9

$$r_{\text{new}} = \frac{r_{\text{old}}}{DF} \quad (6.1)$$

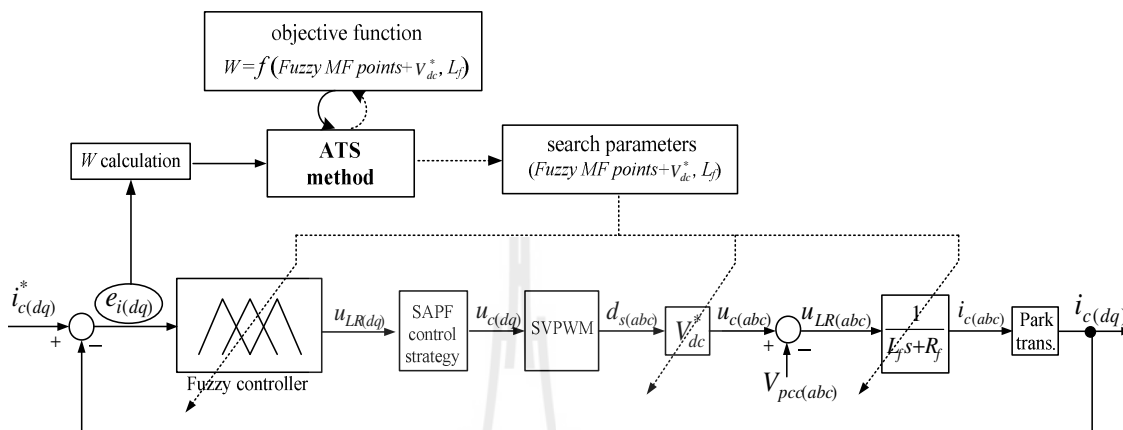
โดยที่ DF คือ ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมีการค้นหา (Decreasing Factor)



รูปที่ 6.9 การค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว

6.4 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

6.4.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 6.10 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธี ATS

การนำวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวหรือวิธี ATS เข้ามาช่วยในการค้นหาค่าพารามิเตอร์จุดตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีที่เหมาะสมทั้ง 25 ค่าพารามิเตอร์ในรูปที่ 6.1 ถึง 6.3 สามารถแสดงโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 6.10 จากรูปดังกล่าว นอกจากจะทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟัซซีแล้ว ผู้วิจัยยังได้พิจารณาออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใหม่ด้วยเช่นกัน คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (V_{dc}^*) และค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการออกแบบจะถูกแสดงไว้เป็นเส้นประภายในรูป สำหรับค่าวัตถุประสงค์ของการค้นหา (cost value) ในที่นี้ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสชดเชยบนแกนดีคิว (W) ที่น้อยที่สุด รายละเอียดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วยวิธี ATS สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ของการออกแบบจุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกทั้ง 25 ค่าพารามิเตอร์และค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จะอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของระบบการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวและแกนสามเฟสร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ด้วยวิธี SVPWM (ดูได้จากรูปที่ 6.10) บน M-file ของโปรแกรม MATLAB แทนการใช้โปรแกรม Simulink ทั้งนี้เพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนและเวลาในการคำนวณในส่วนที่ไม่จำเป็นเช่น การคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย เป็นต้น อีกทั้งยังทำให้โปรแกรมทำงานได้รวดเร็ว

ขึ้น การคำนวณของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังกล่าวบน M-file สามารถเขียนเป็นแผนภาพการคำนวณโปรแกรมดังรูปที่ 6.11 ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 ดำเนินการรับค่าอินพุตค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหาได้แก่ ค่าจุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่ทั้ง 25 ค่าพารามิเตอร์ (e1-e13, er1-er7, v1-v5) และค่าพารามิเตอร์ V_{dc} และค่า L_f ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ขั้นที่ 2 โหลดข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณ ได้แก่ ค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนดีคิว ($i_{c(dq)}^*$) ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ จุด PCC ($v_{pcc(abc)}$) ค่ามุมสำหรับการแปลงแกนดีคิว (θ_{pcc}) และค่าขนาดแรงดัน V_{pcc} โดยข้อมูลดังกล่าวได้จากการจำลองสถานการณ์ระบบรูปที่ 5.10 ในบทที่ 5 ด้วยโปรแกรม Simulink แล้วทำการบันทึกจัดเก็บข้อมูลไว้สำหรับการเรียกใช้อย่างสะดวกและรวดเร็ว (look up table)

ขั้นที่ 3 กำหนดค่าเริ่มต้น (initial value setup (for k=0)) ของตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดใช้ในโปรแกรมการคำนวณ โดยในที่นี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้ทุกค่าพารามิเตอร์มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0

ขั้นที่ 4 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว ($u_{c(dq)}$) จากกระบวนการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว (control strategy) ตามสมการที่ (6.2) (พลลสิทธิ์ สานติประพันธ์, 2554)

$$u_{cd} = u_{LR,d} - \omega i_{cq} + \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \text{ และ } u_{cd} = u_{LR,q} + \omega i_{cd} \quad (6.2)$$

โดยที่ค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_f และ R_f ($R_f=0$) บนแกนดีคิว ($u_{LR(dq)}$) ก็คือค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่บนแกนดีและคิวตามลำดับ

ขั้นที่ 5 คำนวณค่าฟังก์ชันการสวิตช์บนแกนสามเฟส ($d_{s(abc)}$) โดยอาศัยการคำนวณจากสมการที่ (6.3) ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ด้วยวิธี SVPWM

$$\begin{bmatrix} d_{sa} \\ d_{sb} \\ d_{sc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_a \\ c_b \\ c_c \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

โดยที่ค่าสถานะการสวิตช์ $c_{(abc)}$ ได้จากกระบวนการสวิตช์แบบวิธี SVPWM

จากค่า $d_{s(abc)}$ ที่ได้จากการคำนวณ เมื่อนำไปคูณกับค่า V_{dc}^* ก็จะได้ค่าแรงดันของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟส $u_{c(abc)}$ ($u_{c(abc)} = d_{s(abc)} V_{dc}^*$)

ขั้นที่ 6 จำนวนค่ากระแสชดเชยบนแกนสามเฟส ($i_{c(abc)}$)

$$\frac{di_{c(abc)}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} i_{ck} + \frac{1}{L_f} d_{s(abc)} V_{dc}^* - \frac{1}{L_f} V_{pcc(abc)} ; R_f = 0 \quad (6.3)$$

จากสมการที่ (6.3) ทำการคำนวณประมาณค่า $i_{c(abc)}$ ด้วยไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference) แบบถอยหลัง (backward) สามารถแสดงได้ดังสมการ (6.4) ดังนี้

$$i_{c(abc)}(k) = \Delta t \times \left(\frac{d_{s(abc)}(k) V_{dc}^* - V_{pcc(abc)}(k)}{L_f} \right) + i_{c(abc)}(k-1) \quad (6.4)$$

โดยที่ Δt คือ ช่วงเวลาการชักตัวอย่าง (sampling time) ในที่นี้กำหนด $\Delta t = 1e-5$ วินาที ดังนั้นการคำนวณหา $i_{c(abc)}$ ในหนึ่งคาบจะต้องใช้จำนวนจุดข้อมูลเท่ากับ 2000 ค่า ($k_{\max} = 2000$)

ขั้นที่ 7 จำนวนแปลงค่ากระแสชดเชยบนแกนสามเฟสหรือ $i_{c(abc)}$ กลับไปอยู่บนแกนดี

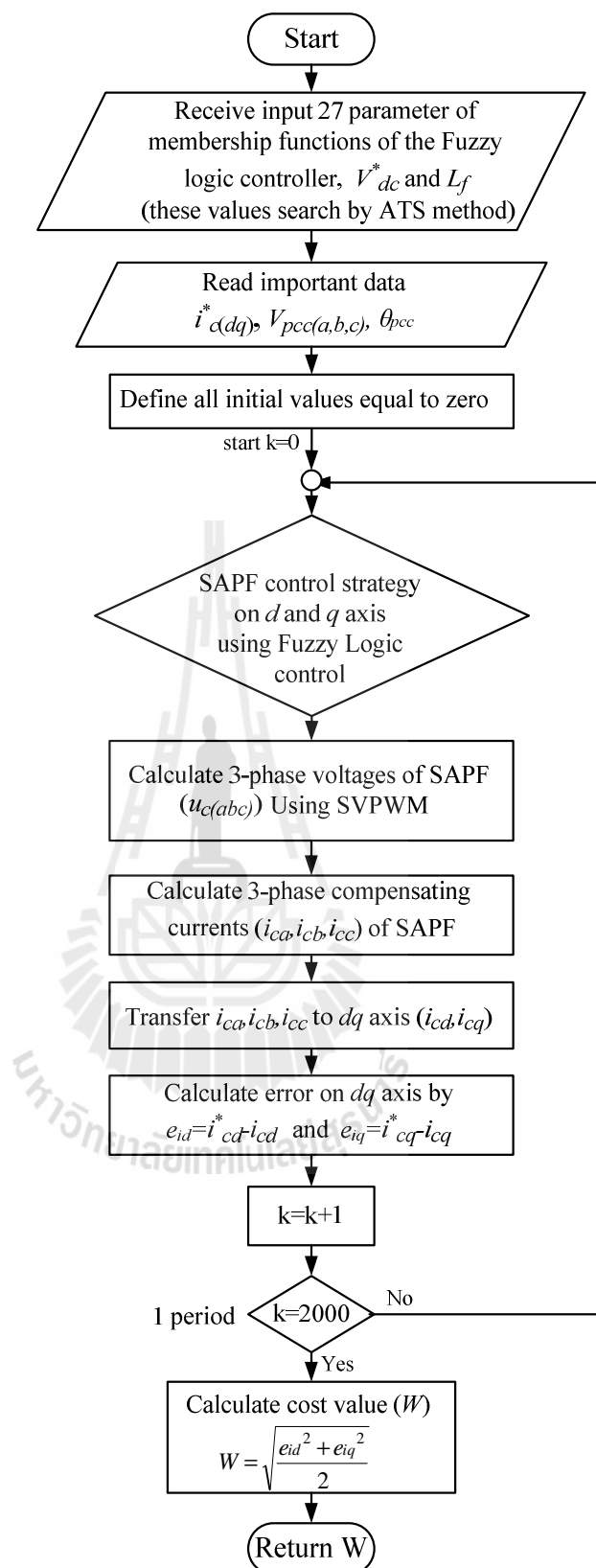
คิว $i_{c(dq)}$

ขั้นที่ 8 จำนวนค่าความคลาดเคลื่อน W หรือค่า cost value สำหรับการค้นหาตามสมการที่ (6.5) ดังนี้

$$W = \sqrt{\frac{e_{id}^2 + e_{iq}^2}{2}} \quad (6.5)$$

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

หมายเหตุ: การแปลงแกนจากแกนสามเฟสไปอยู่บนแกนดีคิวใช้สมการการแปลงแกนของ Park (Park's transformation) (Chang Q. C., Liping W. and Guohui Y, 2009)



รูปที่ 6.11 แผนภาพโปรแกรมการคำนวณของฟังก์ชันวัตถุประสงค์การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่และค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในข้างต้น ลำดับต่อมาจะเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบแนวโน้มความสัมพันธ์ของค่า cost value (W) กับค่า $\%THD$ ของกระแสทางด้านแหล่งจ่าย โดยการทดสอบจะใช้ข้อมูลของพารามิเตอร์ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่ 5 ชุดข้อมูลที่กำหนดตามตารางที่ 6.1 ถึง 6.3 เช่นเดิมและค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ค่า V_{dc}^* และค่า L_f จะใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบไว้ในบทที่ 5 คือ ค่า V_{dc}^* เท่ากับ 360 V และค่า L_f เท่ากับ 18 mH ผลการทดสอบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 6.5 ซึ่งจะสังเกตแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่า W และค่า $\%THD$ ได้ว่าเมื่อค่า W ที่ได้จากการคำนวณของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งกรณี 5 ชุดข้อมูล มีค่าลดลงจะส่งผลให้ค่า $\%THD$ ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งหมายความว่า ถ้าการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซี่และค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธี ATS ให้ค่า W ที่น้อยที่สุด ก็จะประมาณได้ว่าให้ค่า $\%THD$ น้อยที่สุดด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบตัวควบคุมฟัซซี่ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการหาค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก

ชุดข้อมูล	ค่า $\%THD$ ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังการชดเชย				ค่า cost value (W)
	เฟส a	เฟส b	เฟส c	ค่าเฉลี่ย	
1	1.47	1.45	1.48	1.47	0.0765
2	2.48	2.49	2.71	2.57	0.1159
3	1.97	2.33	2.02	2.11	0.1089
4	1.58	1.52	1.63	1.57	0.0855
5	1.86	1.57	1.64	1.69	0.0935

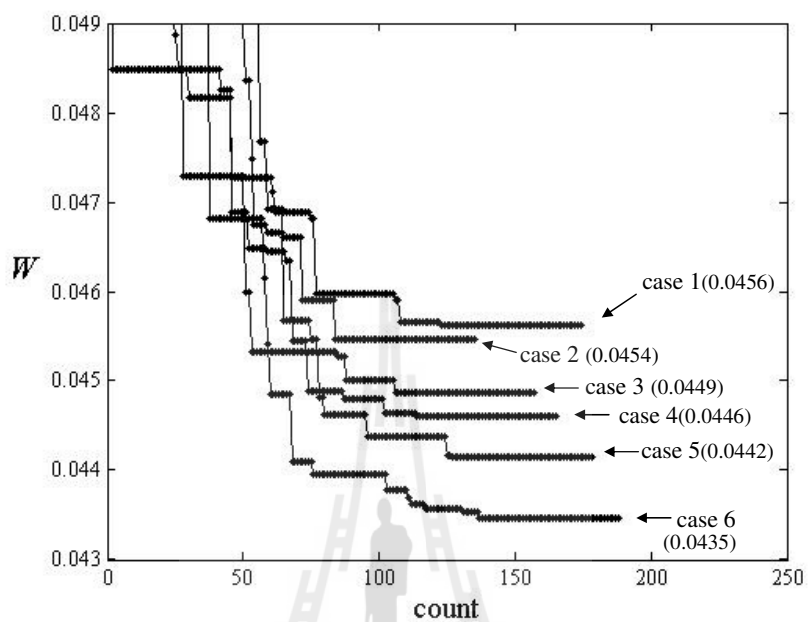
6.4.2 การทดสอบค่าขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซี่และพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

การกำหนดขอบเขตของการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของจุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่ทั้ง 25 พารามิเตอร์ และพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ค่า V_{dc}^* และค่า L_f มีความสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งเนื่องจากขอบเขตของพารามิเตอร์ทุกตัวจะมีผลต่อการค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (global solution) โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดการปรับขอบเขตของพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟค่า V_{dc}^* อยู่ในช่วงแรงดัน [213V-400V] โดยค่าแรงดันขอบเขตต่ำสุด 213V ได้มาจากค่า 1.5 เท่าของค่ายอดแรงดัน V_{pcc} (142 V) ส่วนกรณีค่าแรงดันขอบเขตสูงสุด 400V ได้มาจากการคำนึงถึงอุปกรณ์ที่เลือกใช้สร้างเป็นวงจรรองกำลังแอกทีฟจริงในอนาคตซึ่งสามารถรองรับการทำงานได้ไม่เกิน 400 V ค่า L_f ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดขอบเขตการค้นหาลู่อยู่ในช่วง [0 H - 0.22 H] โดยค่าขอบเขตสูงสุดดังกล่าวใช้ค่า $L_{f(max)}$ (0.22 H) ที่ได้จากการออกแบบตามสมการที่ (5.13) ในบทที่ 5 เป็นตัวกำหนด ส่วนขอบเขตต่ำสุดผู้วิจัยกำหนดการค้นหาลู่เริ่มต้น

จากค่า 0 H เป็นต้นไป สำหรับค่าพารามิเตอร์จุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่ ทั้ง 25 ตัว งานวิจัยนี้จะใช้วิธีการทดสอบการกำหนดขอบเขตการค้นหาให้ครอบคลุมชุดข้อมูลที่ 1 ตามตารางที่ 6.1 ถึง 6.3 ทั้งนี้เนื่องจากเป็นชุดข้อมูลที่ให้ผลการควบคุมที่ดีที่สุดจากการออกแบบโดยใช้วิธีการสุ่มการทดสอบเพื่อหาขอบเขตพารามิเตอร์ของจุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกดังกล่าว ถ้าพบว่าคำตอบที่ได้จากการค้นหาเข้าใกล้หรือชนขอบด้านใดก็จะทำการขยายขอบเขตด้านนั้นออกไป เพื่อเปิดโอกาสสำหรับการค้นหาที่ทำให้สามารถพบคำตอบที่ดีขึ้นได้ และถ้าคำตอบที่ได้ไม่ชนขอบด้านใดผู้วิจัยก็จะกำหนดให้ขอบเขตการค้นหานั้นในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของทั้ง 25 พารามิเตอร์ต่อไป สำหรับเงื่อนไขในทดสอบเพื่อการค้นหาค่าพารามิเตอร์จะกำหนดให้ ATS มีการเดินย้อนรอยเกิดขึ้นเมื่อไม่สามารถค้นหาพบคำตอบที่ดีกว่าคำตอบแบบวงกว้างเดิมได้ภายในจำนวน 30 รอบ และกำหนดให้ ATS หยุดการค้นหาเมื่อไม่สามารถค้นหาพบคำตอบที่ดีกว่าคำตอบแบบวงกว้างเดิมได้ภายในจำนวน 50 รอบนอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ ATS ในเบื้องต้นผู้วิจัยจะใช้การกำหนดแบบสุ่ม คือ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 ค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1 อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ ATS จะทำการทดสอบอีกครั้งในหัวข้อที่ 6.3.3 สำหรับผลการทดสอบกำหนดขอบเขตการค้นหาสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.6 ถึง 6.8 โดยแบ่งได้แบ่ง 6 กรณี (case 1-case 6)

การปรับขยายขอบเขตของพารามิเตอร์ที่ได้คำตอบเข้าใกล้หรือชนขอบเขตที่กำหนดเดิมไว้ในตารางที่ 6.6 ถึง 6.8 จะใช้วิธีการปรับขยายขอบเขตนี้ออกอีก 10 % ยกตัวอย่างเช่น ใน case 1 ตารางที่ 6.6 จะสังเกตได้ว่าคำตอบที่ได้จากการทดสอบค่าพารามิเตอร์ e1 มีค่าเท่ากับ -0.1832 ซึ่งผู้วิจัยพิจารณาแล้วพบว่าค่าเข้าใกล้กับค่าขอบเขต -0.19 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับขอบเขตดังกล่าวสำหรับการค้นหากรณีใหม่ (case 2) อีก 10% คือ -0.21 เป็นต้น สำหรับกรณีอื่น ๆ ก็ใช้วิธีการปรับเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ในกรณี case 5 จะพบว่าคำตอบของพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ที่ได้จากการค้นหาไม่ค่อยเข้าใกล้กับขอบเขตแล้วผู้วิจัยจึงทำการปรับขอบเขตเป็นครั้งสุดท้ายได้ดังกรณี case 6 โดยในกรณีดังกล่าวนอกจากจะปรับค่าพารามิเตอร์บางตัวที่ชนขอบเขตเดิมแล้ว ผู้วิจัยยังได้พิจารณาปรับขอบเขตทั้งสองฝั่งของฟังก์ชันสมาชิก (ฝั่งบวกและฝั่งลบ) ให้มีขนาดเท่ากันและครอบคลุมค่าขอบเขตเดิมเพื่อเพิ่มโอกาสการค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้างได้ดียิ่งขึ้น เช่น กรณีขอบเขตค่าพารามิเตอร์ e1 (ฝั่งบวก) [-0.15, -0.23] กับ e13 (ฝั่งลบ) [0.21, 0.14] จะทำการปรับขอบเขตทั้งสองฝั่งใหม่ให้สมดุลขนาด คือ e1 เท่ากับ [-0.145, -0.25] และ e13 เท่ากับ [0.25, 0.14] เป็นต้น สำหรับค่า μ ที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหากรณี case 1 ถึง case 6 จะมีค่าลดน้อยลงตามลำดับ ดังรูปที่ 6.12 โดยกรณี case 6 ให้ค่า μ น้อยที่สุดเท่ากับ 0.0435 ซึ่งถือเป็นการค้นหาพบคำตอบแบบวงกว้างที่ดีที่สุดในการทดสอบทั้ง 6 กรณีด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขอบเขตใน case 6 เป็น

ขอบเขตสำหรับการนำไปใช้ค้นหาค่าพารามิเตอร์จุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่ต่อไป



รูปที่ 6.12 การลู่เข้าของค่า W ทั้ง 6 กรณีการทดสอบปรับขอบเขตการค้นหาของค่าพารามิเตอร์จุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่



ตารางที่ 6.6 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case 1 และ case 2

พารามิเตอร์	case 1		case 2	
	ขอบเขตต่ำสุด-สูงสุด	ผลการทดสอบ	ขอบเขตต่ำสุด-สูงสุด	ผลการทดสอบ
พารามิเตอร์อินพุต error MF				
e1	[-0.15, -0.19]	-0.1832	[-0.15, -0.21]	-0.1870
e2	[-0.09,-0.11]	-0.1024	[-0.09,-0.11]	-0.0919
e3	[-0.12,-0.15]	-0.1419	[-0.12,-0.16]	-0.1548
e4	[-0.07,-0.09]	-0.0837	[-0.07,-0.09]	-0.0769
e5	[-0.02,-0.04]	-0.0292	[-0.02,-0.04]	-0.0372
e6	[-0.04,-0.06]	-0.0489	[-0.04,-0.06]	-0.0412
e7	[0.01,-0.01]	0.0062	[0.02,-0.01]	0.0109
e8	[0.06,0.04]	0.0454	[0.06,0.03]	0.0343
e9	[0.04,0.02]	0.0216	[0.04,0.01]	0.0175
e10	[0.09,0.07]	0.0798	[0.09,0.07]	0.0778
e11	[0.15,0.12]	0.1354	[0.15,0.12]	0.1210
e12	[0.11,0.09]	0.1027	[0.11,0.09]	0.0952
e13	[0.19, 0.15]	0.1549	[0.19, 0.14]	0.1815
พารามิเตอร์อินพุต error rate MF				
er1	[-0.50 ,0.60]	-0.5685	[-0.50 ,0.60]	-0.5514
er2	[-0.04,-0.06]	-0.0432	[-0.03,-0.06]	-0.0440
er3	[-0.09,-0.11]	-0.0929	[-0.08,-0.11]	-0.0824
er4	[0.01,-0.01]	-0.0030	[0.01,-0.01]	0.0071
er5	[0.11,0.09]	0.0959	[0.11,0.08]	0.0843
er6	[0.06,0.04]	0.0455	[0.06,0.03]	0.0338
er7	[0.60 ,0.50]	0.5424	[0.60 ,0.50]	0.5011
พารามิเตอร์เอาต์พุตvoltageMF				
v1	[-150,-230]	-228.30	[-150,-280]	-275.61
v2	[-50,-80]	-78.71	[-50,-100]	-64.05
v3	[-20,20]	-5.03	[-20,20]	-6.59
v4	[80,50]	52.61	[80,40]	42.00
v5	[230,150]	219.9	[280,150]	194.86
พารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ				
V_{dc}^*	[213, 400]	390.76	[213, 400]	397.37
L_f	[0.1,0]	0.0290	[0.1,0]	0.0296
ค่า cost value				
W	0.0456		0.0454	

ตารางที่ 6.7 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case 3 และ case 4

พารามิเตอร์	case 3		case 4	
	ขอบเขตต่ำสุด-สูงสุด	ผลการทดสอบ	ขอบเขตต่ำสุด-สูงสุด	ผลการทดสอบ
พารามิเตอร์อินพุต error MF				
e1	[-0.15, -0.21]	-0.2008	[-0.15, -0.23]	-0.2148
e2	[-0.09,-0.11]	-0.1000	[-0.09,-0.11]	-0.1088
e3	[-0.12,-0.17]	-0.1469	[-0.12,-0.17]	-0.1490
e4	[-0.06,-0.09]	-0.0896	[-0.06,-0.10]	-0.0933
e5	[-0.02,-0.05]	-0.0431	[-0.02,-0.05]	-0.0278
e6	[-0.03,-0.06]	-0.0490	[-0.03,-0.06]	-0.0575
e7	[0.02,-0.02]	0.0001	[0.02,-0.02]	0.0121
e8	[0.06,0.02]	0.0362	[0.06,0.02]	0.0532
e9	[0.04,0.01]	0.0313	[0.04,0.01]	0.0171
e10	[0.09,0.07]	0.0865	[0.10,0.07]	0.0867
e11	[0.15,0.11]	0.1253	[0.15,0.11]	0.1441
e12	[0.11,0.09]	0.1038	[0.11,0.09]	0.1021
e13	[0.21, 0.14]	0.1687	[0.21, 0.14]	0.1976
พารามิเตอร์อินพุต error rate MF				
er1	[-0.50 ,0.60]	-0.5967	[-0.50 ,0.70]	-0.6336
er2	[-0.03,-0.06]	-0.0409	[-0.03,-0.06]	-0.0520
er3	[-0.07,-0.11]	-0.0816	[-0.07,-0.11]	-0.0903
er4	[0.02, -0.01]	0.0171	[0.03, -0.01]	0.0019
er5	[0.11, 0.07]	0.0935	[0.11, 0.07]	0.0869
er6	[0.06, 0.02,]	0.0315	[0.06, 0.02,]	0.0572
er7	[0.60 ,0.45]	0.5228	[0.60 ,0.45]	0.5492
พารามิเตอร์เอาต์พุต voltage MF				
v1	[-150,-340]	-325.66	[-150,-410]	-355.63
v2	[-40,-100]	-62.46	[-40,-100]	-96.72
v3	[-20,20]	3.18	[-20,20]	19.63
v4	[80,30]	68.14	[80,30]	70.95
v5	[280,150]	208.57	[280,150]	266.20
พารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอคทีฟ				
V_{dc}^*	[213, 400]	396.07	[213, 400]	398.26
L_f	[0.1,0]	0.0288	[0.1,0]	0.02986
ค่า cost value				
W	0.0449		0.0446	

ตารางที่ 6.8 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case 5 และ case 6

พารามิเตอร์	case 5		case 6	
	ขอบเขตต่ำสุด-สูงสุด	ผลการทดสอบ	ขอบเขตต่ำสุด-สูงสุด	ผลการทดสอบ
พารามิเตอร์อินพุต error MF				
e1	[-0.15, -0.23]	-0.1539	[-0.14, -0.25]	-0.1808
e2	[-0.09, -0.12]	-0.1066	[-0.09, -0.12]	-0.0976
e3	[-0.12, -0.17]	-0.1433	[-0.10, -0.17]	-0.1568
e4	[-0.06, -0.11]	-0.0743	[-0.06, -0.11]	-0.0715
e5	[-0.02, -0.05]	-0.0341	[-0.01, -0.05]	-0.0328
e6	[-0.03, -0.07]	-0.0620	[-0.01, -0.07]	-0.0499
e7	[0.02, -0.02]	0.0086	[0.02, -0.02]	-0.0064
e8	[0.06, 0.02]	0.0276	[0.07, 0.01]	0.0300
e9	[0.04, 0.01]	0.0258	[0.05, 0.01]	0.0288
e10	[0.10, 0.07]	0.0995	[0.11, 0.06]	0.0890
e11	[0.17, 0.11]	0.1180	[0.17, 0.10]	0.1393
e12	[0.11, 0.09]	0.1011	[0.12, 0.09]	0.0980
e13	[0.21, 0.14]	0.1814	[0.25, 0.14]	0.2219
พารามิเตอร์อินพุต error rate MF				
er1	[-0.50, 0.70]	-0.5437	[-0.45, -0.70]	-0.5969
er2	[-0.03, -0.06]	-0.0568	[-0.02, -0.07]	-0.0268
er3	[-0.07, -0.11]	-0.0754	[-0.07, -0.11]	-0.0884
er4	[0.03, -0.01]	0.0125	[0.03, -0.03]	0.0123
er5	[0.11, 0.07]	0.0958	[0.11, 0.07]	0.0885
er6	[0.07, 0.02]	0.0325	[0.07, 0.02]	0.0273
er7	[0.60, 0.45]	0.5506	[0.70, 0.45]	0.5730
พารามิเตอร์เอาต์พุต voltage MF				
v1	[-150, -410]	-301.33	[-130, -500]	-371.42
v2	[-40, -120]	-59.31	[-30, -120]	-83.79
v3	[-20, 20]	-4.52	[-20, 20]	-6.54
v4	[100, 30]	67.88	[120, 30]	63.39
v5	[280, 150]	173.41	[500, 130]	287.60
พารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ				
V_{dc}^*	[213, 400]	397.13	[213, 400]	391.04
L_f	[0.1, 0]	0.0296	[0.1, 0]	0.2880
ค่า cost value				
W	0.0442		0.0435	

6.4.3 การทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวสำหรับ

ใช้ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีและวงจรรอกกำลังแอกทิฟ

การทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวสำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีและวงจรรอกกำลังแอกทิฟที่มีพารามิเตอร์ที่ต้องทำการทดสอบทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้างค่ารัศมีเริ่มต้น และค่าตัวประกอบปรับลดรัศมี โดยการทดสอบพารามิเตอร์ดังกล่าวจะใช้ค่า w จำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของคำตอบเป็นเกณฑ์พิจารณาเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ โดยจะพิจารณาให้ค่าสำคัญของค่า w เป็นค่าหลักในการตัดสินใจเลือก ส่วนค่าจำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะพิจารณาให้ค่าสำคัญเป็นอันดับรองลงมาตามลำดับ และสำหรับเงื่อนไขในทดสอบเพื่อการค้นหาค่าพารามิเตอร์จะกำหนดให้ ATS มีการเดินย้อนรอยเกิดขึ้นเมื่อไม่สามารถค้นหาพบคำตอบที่ดีกว่าคำตอบแบบวงกว้างเดิมได้ภายในจำนวน 30 รอบ และกำหนดให้ ATS หยุดการค้นหาเมื่อไม่สามารถค้นหาพบคำตอบที่ดีกว่าคำตอบแบบวงกว้างเดิมได้ภายในจำนวน 50 รอบเช่นเดียวกับการทดสอบหาขอบเขตการค้นหาพารามิเตอร์ในหัวข้อที่ผ่านมาผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ ATS ดังกล่าวจะนำเสนอต่อไปนี้

การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นของการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีและวงจรรอกกำลังแอกทิฟได้ทำการทดสอบที่ค่า 10 20 30 40 50 และ 60 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 6.9 จากตารางดังกล่าวสังเกตได้ว่ากรณีที่ใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 และ 50 ให้ผลค่า w เฉลี่ยดีเท่ากัน (น้อยเท่ากัน) คือ 0.0430 และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยจำนวนรอบการค้นหาที่พบคำตอบของกรณีคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 พบว่ามีค่าน้อยกว่าเท่ากับ 127.70 รอบ ในขณะที่กรณีคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 มีค่าเท่ากับ 222.40 รอบดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 สำหรับใช้ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีและวงจรรอกกำลังแอกทิฟต่อไป

ตารางที่ 6.9 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ครั้งที่ ค่าทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ							
ค่า W	0.0436	0.0437	0.0500	0.0441	0.0425	0.0448	0.0027
จำนวน	162	140	20	136	186	129.80	57.2517
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ							
ค่า W	0.0500	0.0419	0.0447	0.0501	0.0437	0.0461	0.0034
จำนวน	41	91	86	11	51	56.00	29.6648
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ							
ค่า W	0.0432	0.0426	0.0494	0.0473	0.0441	0.0453	0.0026
จำนวน	152	163	54	20	159	108.60	60.3477
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 คำตอบ							
ค่า W	0.0430	0.0424	0.0435	0.0426	0.0437	0.0430	0.0005
จำนวน	255	166	235	234	222	222.4	30.1237
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ							
ค่า W	0.0425	0.0420	0.0445	0.0430	0.0430	0.0430	0.0008
จำนวน	125	122	153	129	107	127.2000	14.8916
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 60 คำตอบ							
ค่า W	0.0440	0.0441	0.0433	0.0430	0.0442	0.0437	0.0004
จำนวน	127	112	104	55	187	117	42.5159

การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างของการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว สำหรับใช้ตัวควบคุมฟัซซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟทำการทดสอบใช้จำนวนคำตอบคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 20 30 40 50 และ 60 เช่นกัน ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 6.10 จากตารางดังกล่าวสังเกตได้ว่า การใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ ให้ผลค่า W เฉลี่ยดีที่สุด เท่ากับ 0.0428 ดังนั้นพารามิเตอร์จำนวนคำตอบรอบข้างของการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสำหรับใช้ออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟผู้วิจัยจึงเลือกใช้จำนวนเท่ากับ 40 คำตอบ

ตารางที่ 6.10 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ครั้งที่ ค่าทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน
จำนวนคำตอบใกล้เคียงเท่ากับ 10 คำตอบ							
ค่า W	0.0464	0.0436	0.0450	0.0433	0.0429	0.0442	0.0013
จำนวน	13	156	192	148	113	124.4	61.0986
จำนวนคำตอบใกล้เคียงเท่ากับ 20 คำตอบ							
ค่า W	0.0444	0.0414	0.0418	0.0443	0.0438	0.0431	0.0013
จำนวน	169	144	122	57	113	121	37.4005
จำนวนคำตอบใกล้เคียงเท่ากับ 30 คำตอบ							
ค่า W	0.0469	0.0435	0.0430	0.0441	0.0439	0.0443	0.0014
จำนวน	40	134	97	41	124	87.2	40.0070
จำนวนคำตอบใกล้เคียงเท่ากับ 40 คำตอบ							
ค่า W	0.0419	0.0433	0.0424	0.0434	0.0431	0.0428	0.0005
จำนวน	123	121	153	144	118	131.8	14.0200
จำนวนคำตอบใกล้เคียงเท่ากับ 50 คำตอบ							
ค่า W	0.0420	0.0437	0.0424	0.0429	0.0438	0.0430	0.0007
จำนวน	111	120	145	143	101	124	17.4126
จำนวนคำตอบใกล้เคียงเท่ากับ 60 คำตอบ							
ค่า W	0.0441	0.0421	0.0436	0.0427	0.0436	0.0432	0.0007
จำนวน	80	157	212	174	177	160	43.8132

การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น

การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น (r_{initial}) ของการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีและวงจรรอกกำลังแอกทิฟได้ทำการทดสอบใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 1 1.52 2.5 และ 3 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 6.11 จากตารางดังกล่าว พบว่า ค่า W เฉลี่ยของการใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 ให้ผลการทดสอบดีที่สุด คือ 0.0423 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 สำหรับการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีและวงจรรอกกำลังแอกทิฟ

ตารางที่ 6.11 ผลการทดสอบค่าร้อยละเริ่มต้น

ครั้งที่ ค่าทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 0.5							
ค่า W	0.0417	0.0433	0.0419	0.0438	0.0435	0.0428	0.0008
จำนวน	81	176	111	172	62	120.4	46.4870
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 1							
ค่า W	0.0426	0.0430	0.0428	0.0420	0.0412	0.0423	0.0006
จำนวน	142	34	93	133	99	100.2	38.1020
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 1.5							
ค่า W	0.0429	0.0431	0.0418	0.0429	0.0427	0.0427	0.0004
จำนวน	128	103	67	71	124	98.6	25.6484
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 2							
ค่า W	0.0418	0.0436	0.0436	0.0435	0.0421	0.0429	0.0008
จำนวน	78	61	117	118	96	94	22.1540
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 2.5							
ค่า W	0.0425	0.0426	0.0431	0.0433	0.0430	0.0429	0.0003
จำนวน	135	50	129	81	168	112.6	41.8502
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 3							
ค่า W	0.0430	0.0430	0.0432	0.0422	0.0470	0.0437	0.0017
จำนวน	146	122	98	135	28	105.8	42.0590

การทดสอบค่าตัวประกอบปรับลดครีมี

การทดสอบค่าตัวประกอบปรับลดครีมี (DF) ของการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมพีซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้ทำการทดสอบใช้ค่าตัวประกอบปรับลดครีมีเท่ากับ 1.010 1.025 1.050 1.075 1.100 1.200 และ 1.300 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 6.12 จากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่าการใช้ค่าตัวประกอบปรับลดครีมีเท่ากับ 1.075 ให้ผลการทดสอบค่า W เฉลี่ยดีที่สุด คือ 0.0422 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าตัวประกอบปรับลดครีมีเท่ากับ 1.1

ตารางที่ 6.12 ผลการทดสอบค่าตัวประกอบปรับลดรัศมี

ครั้งที่ ค่าทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน
ค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.01							
ค่า W	0.0439	0.0454	0.0465	0.0486	0.0447	0.0458	0.0016
จำนวน	77	22	67	64	33	52.6	21.2283
ค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.025							
ค่า W	0.0436	0.0420	0.0456	0.0430	0.0424	0.0433	0.0157
จำนวน	145	156	79	41	61	96.4	45.9112
ค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.05							
ค่า W	0.0428	0.0431	0.0431	0.0426	0.0418	0.0427	0.0004
จำนวน	63	61	106	65	122	83.4	25.5233
ค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.075							
ค่า W	0.0424	0.0416	0.0424	0.0419	0.0425	0.0422	0.0003
จำนวน	100	84	119	60	50	82.6	25.3109
ค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1							
ค่า W	0.0421	0.0425	0.0440	0.0429	0.0423	0.0428	0.0006
จำนวน	68	63	47	83	90	74.2	16.6301
ค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2							
ค่า W	0.0424	0.0429	0.0434	0.0437	0.0442	0.0433	0.0006
จำนวน	42	93	39	30	89	58.6000	26.7776
ค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3							
ค่า W	0.0478	0.0422	0.0460	0.0444	0.0438	0.0448	0.0019
จำนวน	85	25	25	33	82	50	27.5245

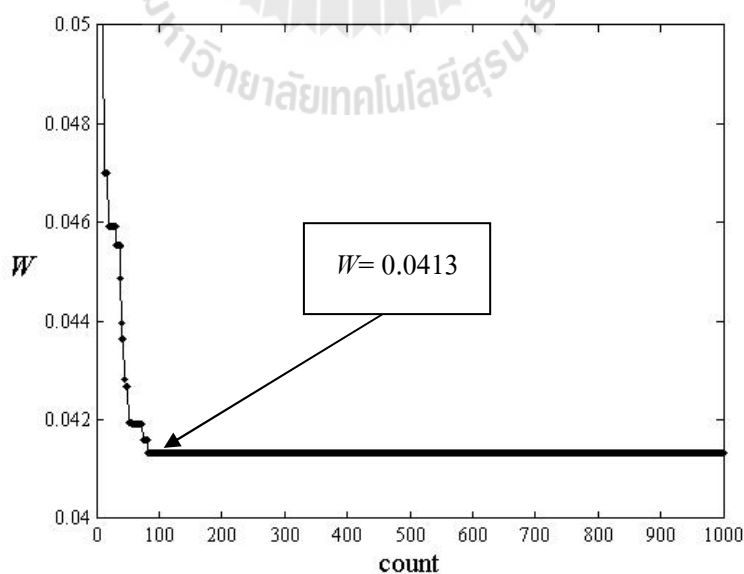
จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวทั้งหมดข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวสำหรับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทิฟ คือเลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบจำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบเลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 และค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.075

จากรูปที่ 6.13 แสดงผลการลู่เข้าของค่า W ที่ดีที่สุดกรณีระบบการค้นหาใช้พารามิเตอร์ ATS ที่ได้จากการทดสอบ (test ATS parameters) ที่จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 57 รอบ ซึ่งค่า W ที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.0418 (ภายใต้เงื่อนไขการค้นหาให้ ATS หยุดการค้นหาเมื่อไม่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบแบบวงกว้างเดิมได้ภายในจำนวน 50 รอบ) จากค่า W ดังกล่าวจะพบว่ามีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณี case 6 ในหัวข้อที่ผ่านมาซึ่งยังไม่ได้มีการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่เหมาะสมสำหรับผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของจุดฟังก์ชันสมาชิกทั้ง 25 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีและค่า V_{dc}^* และค่า L_f ของวงจรกรองกำลังแอททิฟแสดงไว้แล้วดังตารางที่ 6.13

6.4.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีและวงจรกรองกำลังแอททิฟ

ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

หลังจากที่ได้ขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์จุดฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอททิฟ อีกทั้งยังได้ทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ ATS เรียบร้อยแล้วในหัวข้อที่ 6.3.2 และ 6.3.3 ที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้จึงได้ทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีดังกล่าวทั้ง 25 ค่า และค่าพารามิเตอร์ V_{dc}^* และค่า L_f ของวงจรกรองกำลังแอททิฟ โดยการออกแบบในหัวข้อนี้กำหนดเงื่อนไขในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ คือกำหนดให้มีการค้นหาเป็นจำนวน 1000 รอบ และให้ระบบการค้นหาแบบ ATS มีการเดินถอยหลังเมื่อไม่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบแบบวงกว้างเดิมได้ภายในจำนวน 100 รอบ ซึ่งผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวแสดงการลู่เข้าของค่า W ได้ดังรูปที่ 6.14

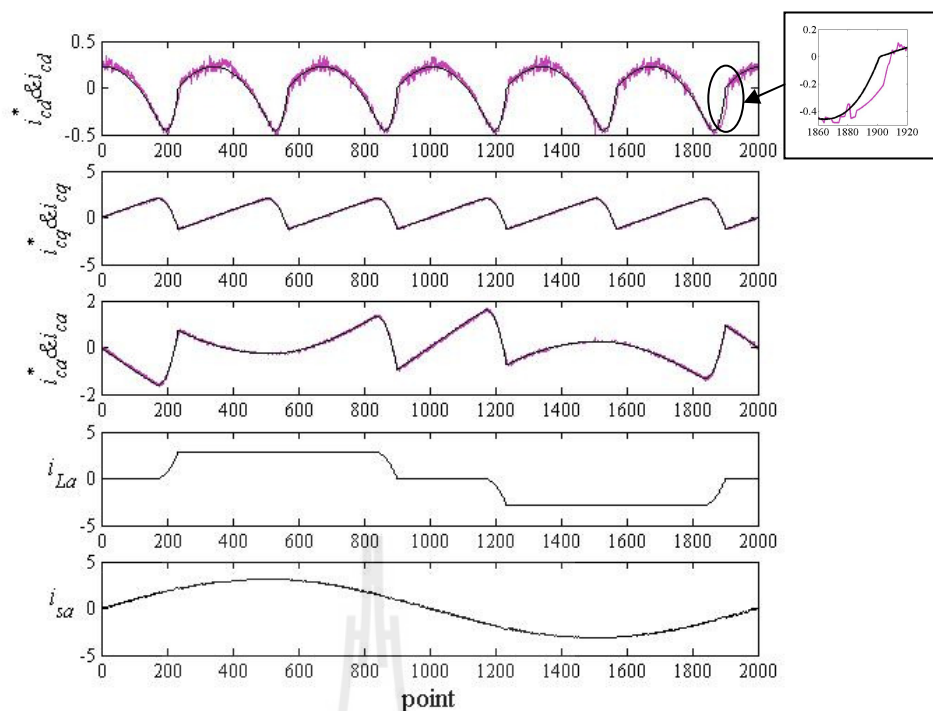


รูปที่ 6.14 การลู่เข้าของค่า W สำหรับการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีและวงจรกรองกำลังแอททิฟ

จากรูปที่ 6.14 แสดงผลการลู่เข้าของค่า W ที่ค่าเท่ากับ 0.0413 ในจำนวนรอบการ ค้นหาสูงสุดเท่ากับ 1000 รอบ โดยในช่วงรอบการค้นหาที่ 74 ถึง 81 ค่า W มีค่าเท่ากับ 0.0415 ซึ่งค่า W ดังกล่าวถือเป็นคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิง ปรับตัว สามารถค้นหาพบคำตอบค่าที่ดีกว่าได้ที่ค่าเท่ากับ 0.0413 ในรอบการค้นหาที่ 82 ดังรูปที่ 6.14 ซึ่งแสดงให้เห็นการหลุดออกจากจุดคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่นสู่บริเวณค้นหาที่ให้คำตอบที่ดีขึ้น สำหรับค่าพารามิเตอร์จุดฟังก์ชันสมาชิกทั้ง 25 จุด ของตัวควบคุมฟัซซีและพารามิเตอร์ของ วงจรกรองกำลังแอกทีฟดูได้จากตารางที่ 6.14 ซึ่งผลค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเมื่อนำไปจำลอง สถานการณ์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสขดลวดของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดง ได้ดังรูปที่ 6.15 (การจำลองสถานการณ์ในที่นี้จะดำเนินการโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงคบน โปรแกรม M-file ทั้งนี้เพื่อพิจารณาถึงผลของฟังก์ชันวัตถุประสงคที่มีต่อการค้นพบค่าพารามิเตอร์ ที่เหมาะสมของตัวควบคุมฟัซซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟ)

ตารางที่ 6.14 ค่าพารามิเตอร์จุดฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี ATS

อินพุต error												
very_neg		neg			zero			pos			very_pos	
e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13
-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
อินพุต error rate												
neg_rate				zero_rate				pos_rate				
er1		er2		er3		er4		er5		er6		er7
-0.5085		-0.0628		-0.0826		-0.0169		0.0931		0.0354		0.4780
เอาต์พุต voltage												
very_dec		dec		cons		inc		very_inc				
v1		v2		v3		v4		v5				
-308.06		-119.03		10.407		92.922		541.26				
พารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ												
V_{dc}^*							L_f					
369.69							0.0270					



รูปที่ 6.15 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยบนโปรแกรม M-file

จากรูปที่ 6.15 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแยกที่ฟที่ใช้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีชชีและวงจรกรองกำลังแยกที่ฟตามตารางที่ 6.14 โดยในรูปกราฟย่อยที่ 1 2 และ 3 คือ รูปสัญญาณของกระแสชดเชยเทียบกับกระแสอ้างอิงบนแกนคิวดและแกนสามเฟสกรณีเฟส a ตามลำดับ (i_{cd}^* & i_{cd} , i_{cq}^* & i_{cq} และ i_{ca}^* & i_{ca}) ซึ่งรูปสัญญาณกระแสชดเชยจะสังเกตเห็นเป็นเส้นทึบปานเนื่องจากผลการสวิตช์ส่วนรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงจะเห็นเป็นเส้นกราฟเรียบสำหรับรูปกราฟย่อยที่ 4 แสดงรูปสัญญาณของกระแสโหลดกรณีเฟส a (i_{La}) และรูปกราฟย่อยที่ 5 คือรูปสัญญาณของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยกรณีเฟส a (i_{sa}) เช่นกัน จากรูปกราฟย่อยที่ 1 และ 2 จะสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณกระแสชดเชยทั้งแกนคิวดและคิวดภาพรวมมีลักษณะการเหยียบทับ (tracking) ตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง โดยคำนวณค่า error บนแกนคิวด (e_{id}) ได้เท่ากับ 0.0326 และค่า error บนแกนคิวด (e_{iq}) เท่ากับ 0.0504 (ค่า W เท่ากับ 0.0413) แต่เมื่อพิจารณารูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงบนแกนคิวดในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (ช่วงที่มีความชันสูงมาก) จะสังเกตเห็นว่ากระแสชดเชยไม่สามารถเหยียบทับรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงได้ทันทั่วทั้งที่ซึ่งดูได้จากรูปขยายที่แสดงไว้ภายในรูปที่ 6.15 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปกราฟย่อยที่ 5 จะเห็นได้ว่ารูปสัญญาณของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีก่อนการชดเชย (รูปสัญญาณกระแสทางด้านแหล่งจ่ายก่อนการชดเชยจะมีลักษณะเหมือนกับกระแสทางด้านโหลดทุกประการ) และเมื่อวัดค่า $\%THD$ ภายหลังการชดเชยของกระแสดังกล่าวได้ค่าเท่ากับ 1.23% ซึ่งมีค่าน้อยลง

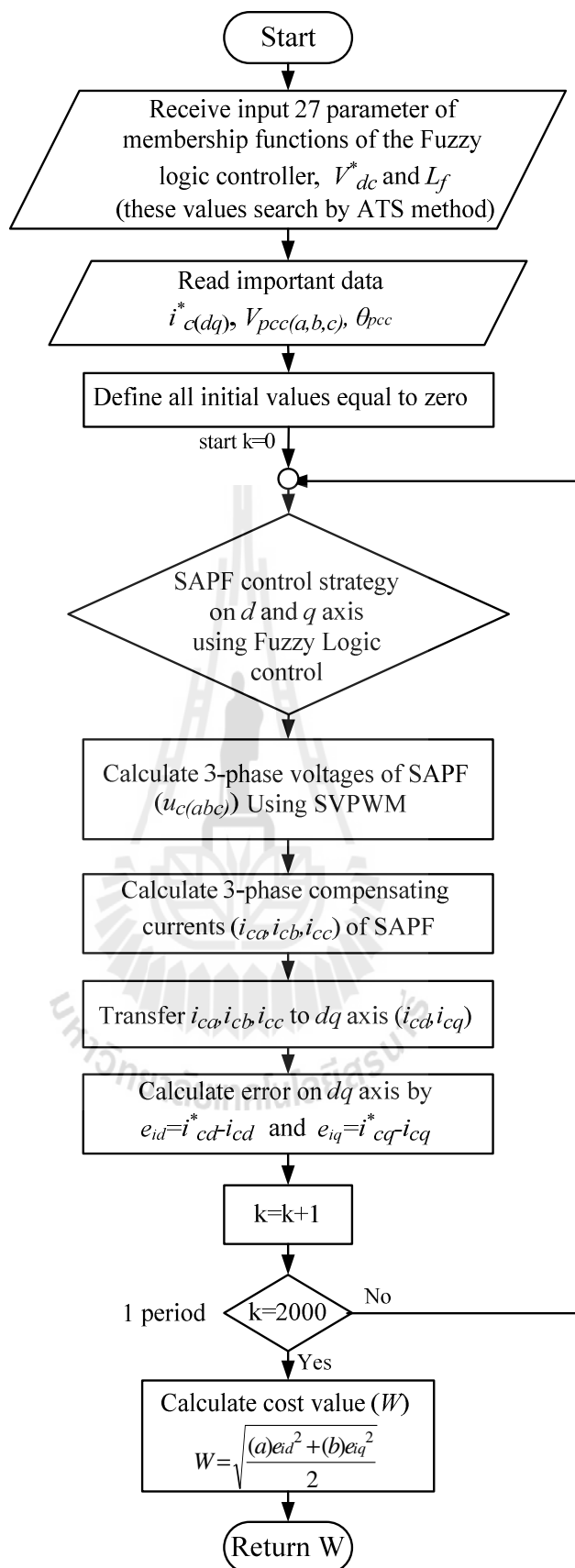
เมื่อเทียบกับกรณีการออกแบบโดยใช้วิธีการสุ่มตามชุดข้อมูลที่ 1 (1.47%) อย่างไรก็ตาม ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบนั้นยังคงไม่เหมาะสมกับระบบมากนัก เนื่องจากมีรูปสัญญาณของ กระแสชดเชยบนแกนดีบางช่วงที่ยังไม่สามารถเหยียบทับสัญญาณกระแสอ้างอิงได้ตามพื้นที่ที่ ดังนั้นในหัวข้อต่อไปผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่เพื่อแก้ไขปัญหา ดังกล่าวและจะทำให้การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วย ATS สามารถค้นพบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

6.4.5 การปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับใช้ค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

แบบฟัซซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการค้นหาตามเชิงปรับตัว

ในหัวข้อที่ 6.4.4 ที่ผ่านมามีได้ทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซี และวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธี ATS ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ พารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบแล้วพบว่า มีบางช่วงของรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงบนแกนดีที่ กระแสชดเชยไม่สามารถเหยียบทับได้พื้นที่ดังนั้นในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจึงได้พิจารณาปรับปรุง ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่โดยการปรับปรุงในที่นี้จะยังคงใช้โครงสร้างหลักของฟังก์ชัน วัตถุประสงค์เดิมเพียงแต่จะทำการพิจารณาการคำนวณค่า w ใหม่ โดยกำหนดให้มีการปรับน้ำหนัก ความสำคัญของค่า e_{id} และ e_{iq} ให้มีความสมดุลมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดกระแสอ้างอิงของ แกนดีและคิวมีค่าต่างกัน กล่าวคือ กระแสอ้างอิงบนแกนดี (i_{cd}^*) มีค่าเท่ากับ $0.2239 \text{ V}_{\text{rms}}$ ซึ่งน้อยกว่า กระแสอ้างอิงบนแกนคิว (i_{cq}^*) ที่มีค่าเท่ากับ $1.1410 \text{ V}_{\text{rms}}$ ดังนั้นเมื่อคำนวณค่า e_{id} และ e_{iq} โดยปกติ แล้วค่า e_{iq} ก็จะสูงกว่าค่า e_{id} ดังเช่นในกรณีผลการออกแบบในหัวข้อที่ผ่านมามีค่า e_{iq} มีค่าเท่ากับ 0.0504 ส่วนค่า e_{id} มีค่าเท่ากับ 0.0326 เป็นต้น ด้วยเหตุดังกล่าวจึงอาจส่งผลให้ระบบการค้นหา แบบ ATS ค้นพบคำตอบค่า w น้อยที่สุดที่เกิดจากผลของค่า e_{iq} ที่ลดน้อยลงเพียงค่าเดียว (เพราะค่า e_{id} มีค่าน้อยอยู่แล้วเมื่อเทียบกับค่า e_{iq} ระบบการค้นหา ATS อาจไม่สนใจค้นหาคำตอบที่ทำให้ค่า e_{id} มีค่าลดลงอีก) สำหรับการปรับน้ำหนักค่าความสำคัญของค่า e_{id} และ e_{iq} ในที่นี้จะใช้วิธีการ คูณด้วยค่าตัวประกอบ a และ b ดังสมการที่ (6.4) โดยกำหนดให้ค่าตัวประกอบ a เท่ากับ 1 และ ค่าตัวประกอบ b เท่ากับ 0.1962 ซึ่งค่า b ดังกล่าวคืออัตราส่วนของกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย บนแกนดีและคิว ($b = i_{cd}^* / i_{cq}^*$) จากการคำนวณค่า w ดังสมการที่ (6.4) นำมาเขียนเป็นแผนภาพการ คำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่แสดงได้ดังรูปที่ 6.16

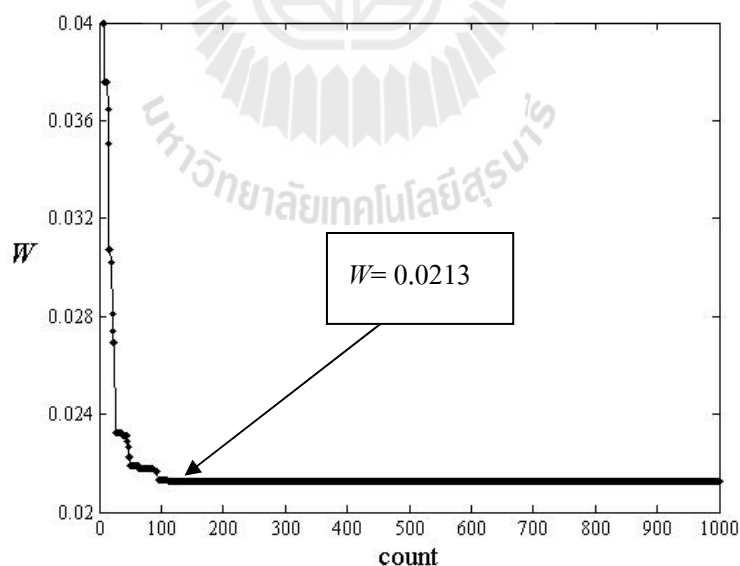
$$w = \sqrt{\frac{(a)e_{id}^2 + (b)e_{iq}^2}{2}} \quad (6.4)$$



รูปที่ 6.16 แผนภาพโปรแกรมการคำนวณของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่

ตารางที่ 6.15 ค่าพารามิเตอร์จุดฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่และวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี ATS กรณีใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2

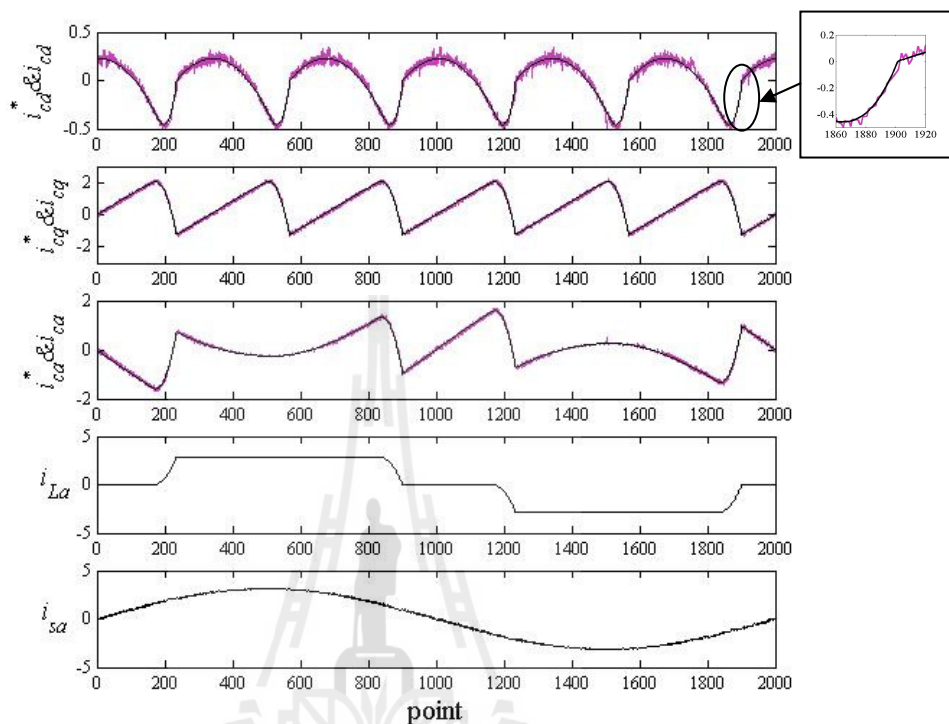
อินพุต error												
very_nec		nec			zero			pos			very_pos	
e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13
-0.2290	-0.1160	-0.1644	-0.0623	-0.0106	-0.0111	-0.0016	0.0320	0.0134	0.0904	0.1593	0.0980	0.1898
อินพุต error rate												
neg_rate				zero_rate					pos_rate			
er1		er2		er3		er4		er5		er6		er7
-0.5359		-0.0600		-0.0952		-0.0083		0.0887		0.0342		0.6100
เอาต์พุต voltage												
very_dec		dec			cons			inc		very_inc		
v1		v2			v3			v4		v5		
-217.11		-114.37			-2.1958e-5(0)			113.91		142.66		
พารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟ												
V _{dc} [*]						L _f						
362.17						0.02049						



รูปที่ 6.17 การลู่เข้าของค่า W กรณีใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่

จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ในข้างต้นเมื่อดำเนินการใช้สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซี่และวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วย ATS ได้ผลการค้นหาค่า W ดังรูปที่ 6.17 จากรูปดังกล่าว แสดงการลู่เข้าของค่า W ที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.0213 ในจำนวนรอบการค้นหา

สูงสุดเท่ากับ 1000 รอบโดยระบบการค้นหาสามารถค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดที่รอบการค้นหาเท่ากับ 111 สำหรับค่าพารามิเตอร์จุดฟังก์ชันสมาชิกและวงจรกรองกำลังแอกทีฟของค่า W ดังกล่าว แสดงไว้ในตารางที่ 6.15 ซึ่งเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองสถานการณ์สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 6.18

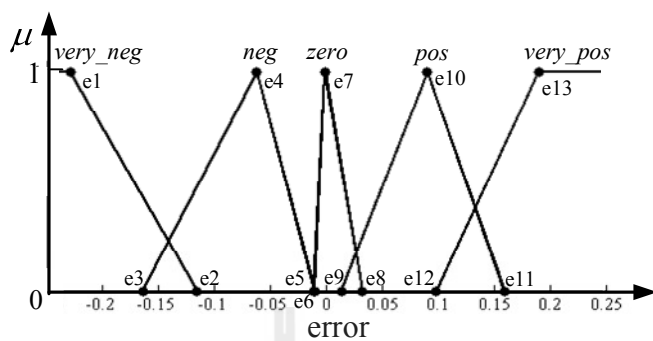


รูปที่ 6.18 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยกรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่

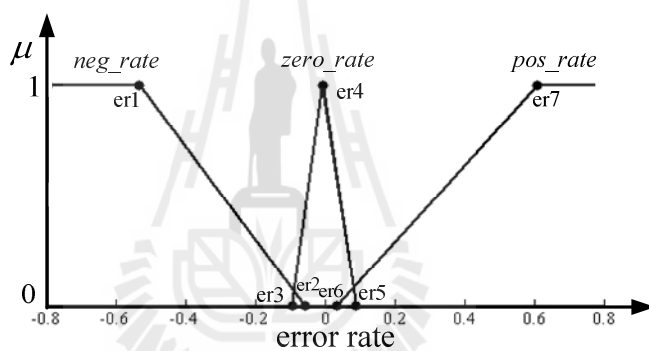
จากรูปที่ 6.18 การใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์พบว่าค่า W ที่ดีที่สุดจากการค้นหาส่งผลให้กระแสชดเชยบนแกนดีสามารถเหยียบทับรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงในช่วงที่มีความชันมากได้ดีกว่ากรณีใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดิม ซึ่งดูได้จากรูปขยายภายในรูปที่ 6.18 จากผลดังกล่าวจึงส่งผลให้ค่า $\%THD$ ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีค่าลดน้อยลงเหลือเท่ากับ 1.17%

ผลจากการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีและวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ส่งผลทำให้ระบบสามารถค้นพบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้นอย่างไรก็ตามผลการจำลองสถานการณ์ในข้างต้นเป็นการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบผลการปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งดำเนินการคำนวณบนโปรแกรม M-file ดังนั้นเพื่อยืนยันผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหามีความเหมาะสมจริงหรือไม่ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการนำค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีตามตารางที่ 6.15 ซึ่งแสดงเป็นรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกได้ดังรูปที่ 6.19 ถึง 6.21 รวมถึงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ค่า V_{dc}^* เท่ากับ 362.17 V และค่า

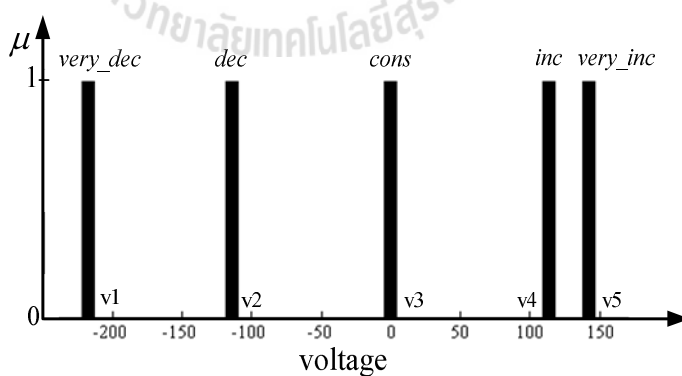
L_f เท่ากับ 0.02049 H ไปดำเนินการจำลองสถานการณ์กับระบบรูปที่ 5.10 ในบทที่ 5 โดยใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังอีกครั้ง ซึ่งได้ผลการจำลองสถานการณ์สามารถแสดงดังรูปที่ 6.22 ถึง 6.26



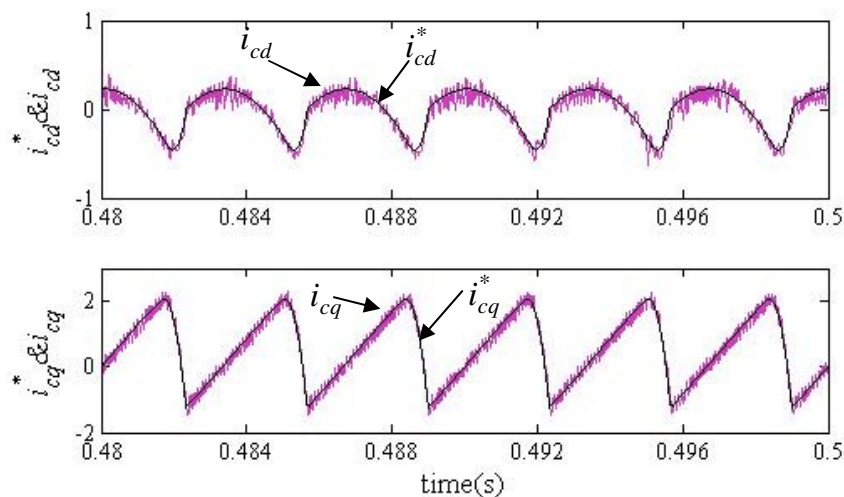
รูปที่ 6.19 ผลการออกแบบฟังก์ชันสมาชิกของค่าอินพุต error ด้วยวิธี ATS



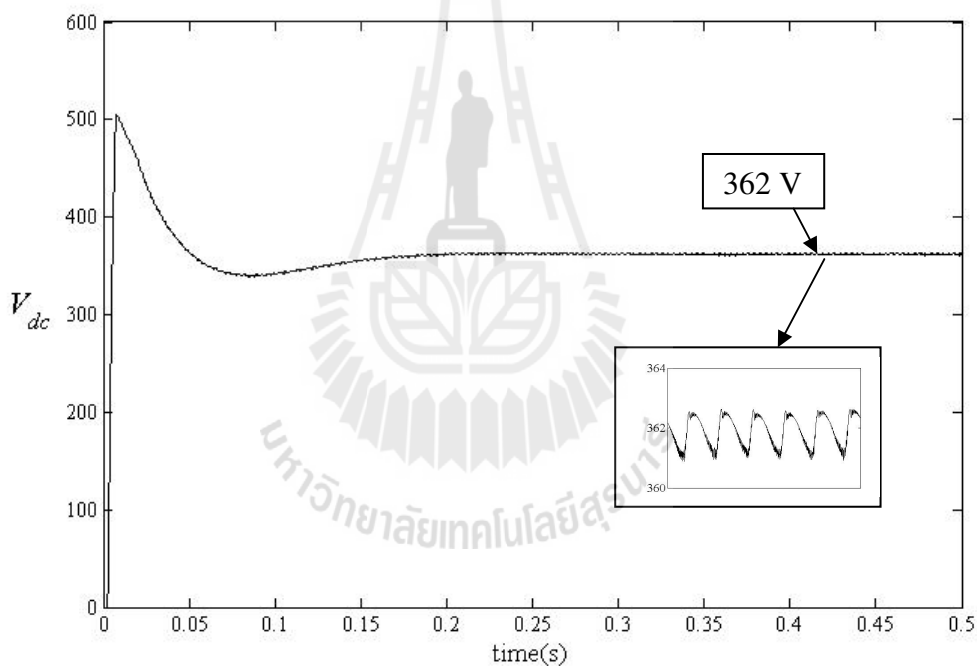
รูปที่ 6.20 ผลการออกแบบฟังก์ชันสมาชิกของค่าอินพุต error rate ด้วยวิธี ATS



รูปที่ 6.21 ผลการออกแบบฟังก์ชันสมาชิกของค่าเอาต์พุต voltage ด้วยวิธี ATS



รูปที่ 6.22 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกระแสชดเชยกับกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิว
กรณีใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบด้วยวิธี ATS



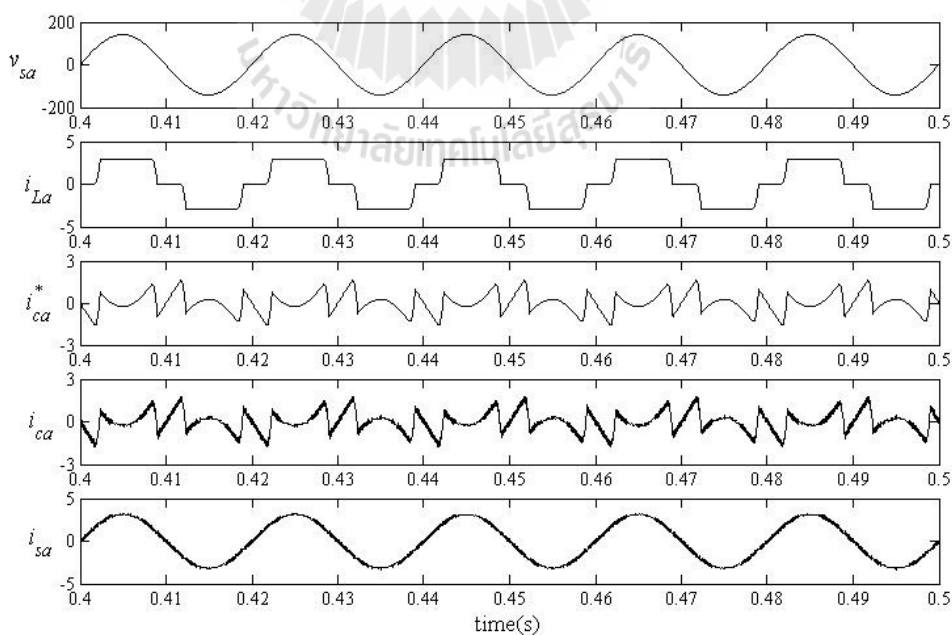
รูปที่ 6.23 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรงกรณีค่า V_{dc}
ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS

จากรูปที่ 6.22 ผลการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกวิธี SDF บนแกนดีคิวในช่วงเวลา 0.48 ถึง 5 วินาที ซึ่งจะสังเกตได้ว่ากระแสชดเชยบนแกนดีและคิว (i_{cd}, i_{cq}) มีลักษณะเหยียบย่ำทับคล้อยตามรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงในแต่ละแกน (i_{cd}^*, i_{cq}^*) ได้ดีจากผล

ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีชชีที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS ให้สมรรถนะการควบคุมที่ดี

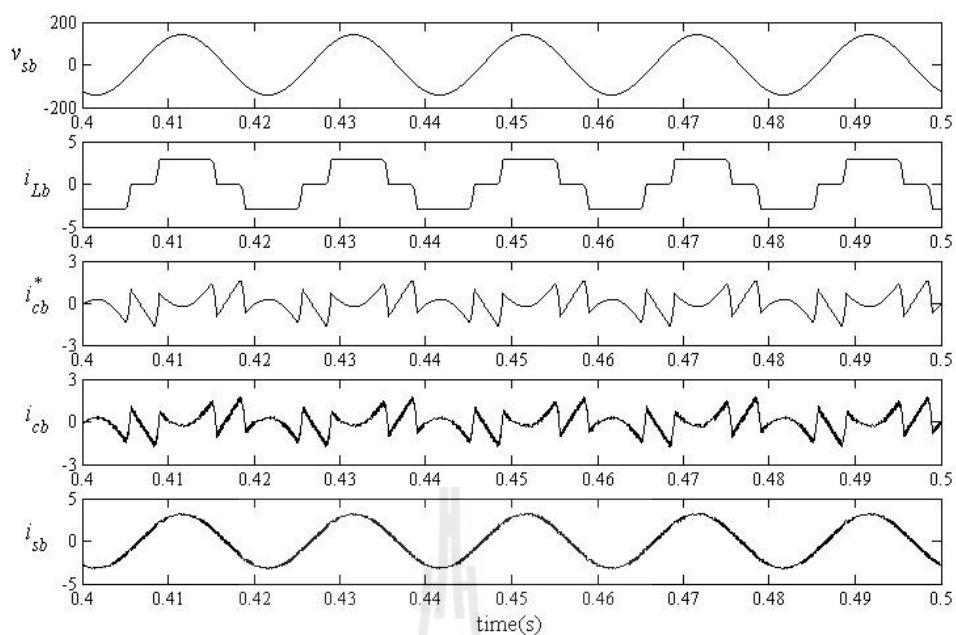
จากรูปที่ 6.23 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ของวงจรกรองกำลัง แอทิฟในช่วงเวลาตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.5 วินาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าแรงดันดังกล่าวมีค่าอยู่ 362 V ตามค่าแรงดันอ้างอิง (V_{dc}^*) ที่ได้ออกแบบไว้ด้วยวิธีการ ATS โดยใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 0.2 วินาที ทั้งนี้เนื่องจากผลการทำงานของตัวควบคุมพีชชีที่ได้ออกแบบไว้แล้วตามที่นำเสนอในบทที่ 5 ที่ผ่าน มา

จากรูปที่ 6.24 ถึง 6.26 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส a b และ c ตามลำดับในช่วงเวลา 0.4 วินาที ถึง 0.5 วินาทีของกรณีการออกแบบตัวควบคุมพีชชีและวงจรกรองกำลังแอทิฟใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (ATS) จากผลดังกล่าว สังเกตได้ว่ากระแสชดเชยทั้งสามเฟส (i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}) ที่ฉีดโดยวงจรกรองกำลังแอทิฟมีลักษณะที่คล้ายคลึงตามลักษณะรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงในแต่ละเฟส ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) ด้วยเหตุนี้ จึงผลให้รูปสัญญาณของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายทั้งสามเฟส (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปสัญญาณของกระแสดังกล่าวก่อนการชดเชยที่มีลักษณะรูปสัญญาณเหมือนกับกระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) ทุกประการ ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูปสัญญาณดังกล่าวมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปไซน์มาก ค่า $\%THD$ ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 1.11% 1.15% และ 1.25% ตามลำดับ ในขณะที่ก่อนการชดเชยค่า $\%THD$ มีค่าเท่ากับ 26.37% 26.40% และ 26.40% ตามลำดับเช่นกัน ดังตารางที่ 6.16

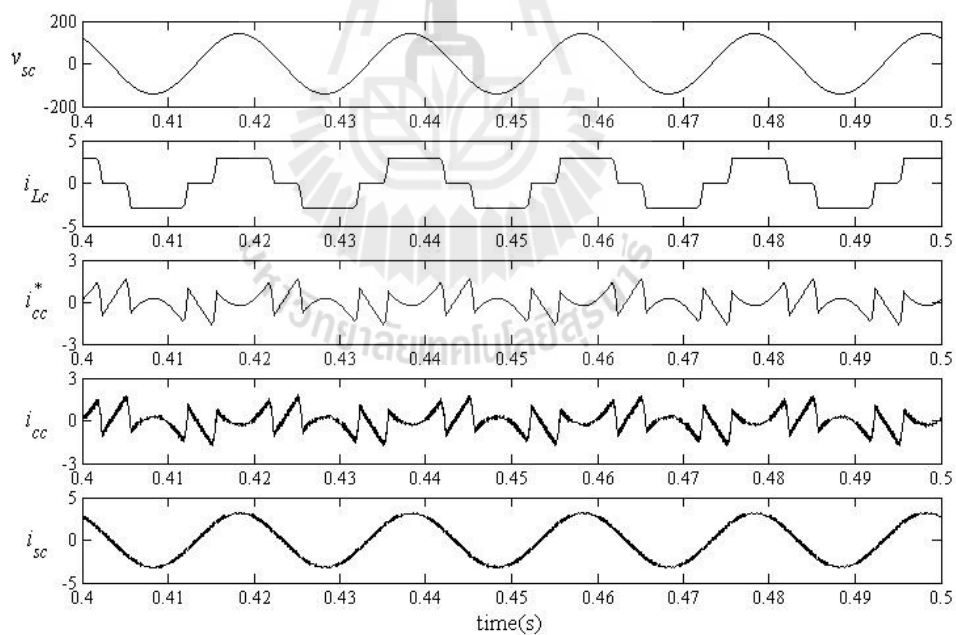


รูปที่ 6.24 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส a

กรณีใช้ตัวควบคุมพีชชีที่ออกแบบด้วยวิธี ATS



รูปที่ 6.25 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส b
กรณีใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบด้วยวิธี ATS



รูปที่ 6.26 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเฟส c
กรณีใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ออกแบบด้วยวิธี ATS

ตารางที่ 6.16 ผลค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกรณีระบบควบคุมกระแสชดเชย
ใช้ตัวควบคุมพีชชีที่ออกแบบด้วยวิธี ATS

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย (i_s)	
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย
<i>a</i>	26.37	1.11
<i>b</i>	26.40	1.15
<i>c</i>	26.40	1.25
เฉลี่ยทั้งสามเฟส	26.39	1.17

6.7 สรุป

การออกแบบจุดฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิว รวมไปถึงได้พิจารณาออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบโดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่าวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมแบบดาวยูเชิงปรับตัวหรือ ATS โดยมีเป้าหมายการค้นค่า คือ ความคลาดเคลื่อนระหว่างกระแสชดเชยกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับสนามอนิกจะต้องมีค่าน้อยที่สุดเพื่อส่งผลให้ค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าน้อยที่สุดเช่นกัน ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของระบบที่พิจารณา พบว่า กรณีที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีที่ออกแบบโดยวิธีการค้นหาแบบดาวยูเชิงปรับตัวให้ผลค่า %THD ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชยลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย และมีค่า %THD น้อยกว่ากรณีที่ตัวควบคุมพีชชีใช้วิธีการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มชุดข้อมูลด้วยเช่นกัน

บทที่ 7

การจำลองสถานการณ์ระบบกำลังฮาร์ดแวร์ในรูป

7.1 กล่าวนำ

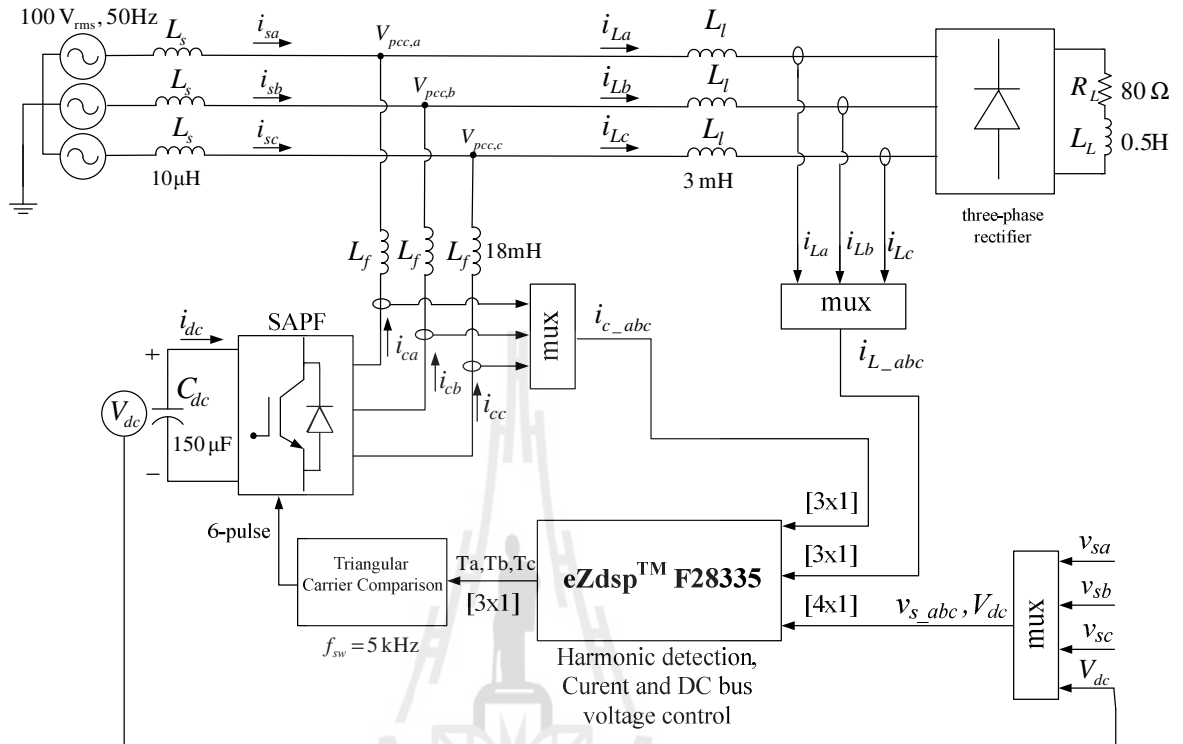
ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำลังฮาร์ดแวร์ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟจำเป็นต้องใช้เครื่องมือหรือโปรแกรมสำหรับช่วยจำลองสถานการณ์ระบบกำลังฮาร์ดแวร์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสของระบบควบคุมหรือตัวควบคุมที่ถูกออกแบบคิดค้นหรือพัฒนาขึ้นมาใหม่ก่อนที่จะดำเนินการสร้างในระบบจริง ซึ่งที่ผ่านมาผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Simulink ในซอฟต์แวร์ MATLAB เป็นเครื่องมือช่วยในการจำลองสถานการณ์ ทั้งนี้เนื่องจากโปรแกรมดังกล่าวได้รับความนิยมถึงความถูกต้องอย่างเป็นวงกว้างและแพร่หลาย อย่างไรก็ตามการโปรแกรมจำลองสถานการณ์ดังกล่าวได้กระทำอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์ทั้งหมดซึ่งแตกต่างจากความเป็นจริงในการสร้างระบบควบคุมที่จะต้องใช้อบอร์ด eZdsp™F28335 เป็นตัวประมวลผล ดังนั้นเพื่อให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบควบคุมที่จะสร้างจริงมากยิ่งขึ้น ในบทนี้จึงได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์ระบบกำลังฮาร์ดแวร์ในรูป (Hardware In the Loop: HIL) ที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด eZdsp™F28335 ดังรูปที่ 7.1 ซึ่งการจำลองสถานการณ์การกำลังฮาร์ดแวร์ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบฮาร์ดแวร์ในรูปจะได้นำเสนอในหัวข้อที่ 7.2 ดังนี้



รูปที่ 7.1 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™F28335

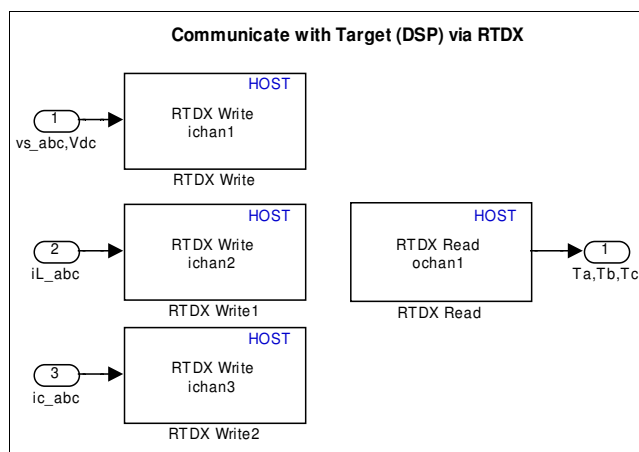
7.2 การจำลองสถานการณ์ระบบการจัดหาร่มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

7.2.1 ระบบการจัดหาร่มอนิกสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป



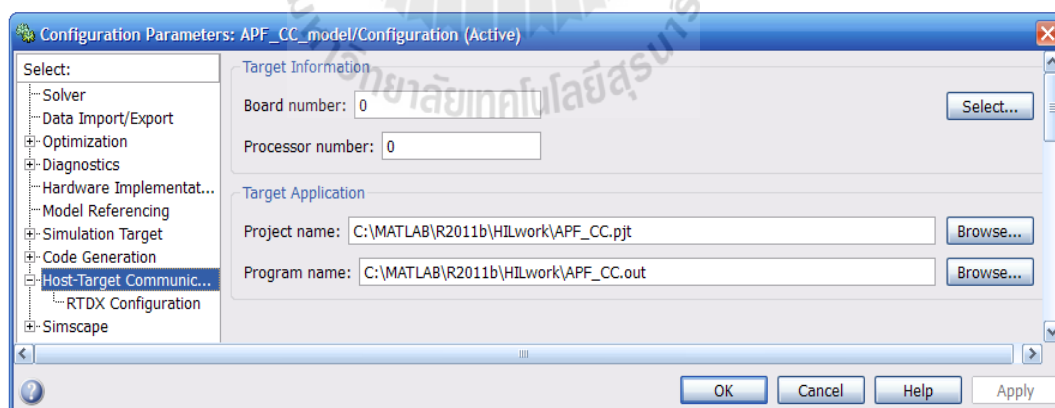
รูปที่ 7.2 ระบบจำลองสถานการณ์การจัดหาร่มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

ระบบการจัดหาร่มอนิกที่พิจารณาทำการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป คือ ไฟฟ้าที่พิจารณาดังรูปที่ 5.10 ในบทที่ 5 ซึ่งการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมพีซีซีที่ได้ ออกแบบด้วยวิธี ATS ดังที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6 อย่างไรก็ตามในบทที่ 6 ได้ทำการจำลอง สถานการณ์การจัดหาร่มอนิกระบบดังกล่าวโดยใช้โปรแกรม Simulink ทั้งหมด แต่สำหรับในบท นี้จะได้ทำการจำลองสถานการณ์ใหม่อีกครั้งแบบมีฮาร์ดแวร์ร่วมด้วย หรือที่เรียกว่า การจำลอง สถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ทั้งนี้เพื่อจุดประสงค์สำหรับสร้างระบบจำลองสถานการณ์ที่มี ความใกล้เคียงกับงานสร้างระบบการจัดหาร่มอนิกขึ้นจริงให้มากที่สุด โดยในส่วนของระบบไฟฟ้าที่ พิจารณาจะยังคงสร้างด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังอยู่บนโปรแกรม Simulink แต่ในส่วนของระบบ ควบคุมกระแสชดเชยรวมไปถึงการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะถูกดำเนินการคำนวณอยู่บนบอร์ด eZdspTM F28335 ทั้งหมดดังระบบที่แสดงในรูปที่ 7.2 ซึ่งอินพุตที่ใช้ในการคำนวณบนบอร์ด eZdspTM F28335 ได้แก่ กลุ่มค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายสามเฟส (v_{s_abc}) และค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ขนาดข้อมูลเท่ากับ [4x1] ค่ากระแสทางด้านโหลดสามเฟส (i_{L_abc}) ขนาดข้อมูลเท่ากับ [3x1] และ

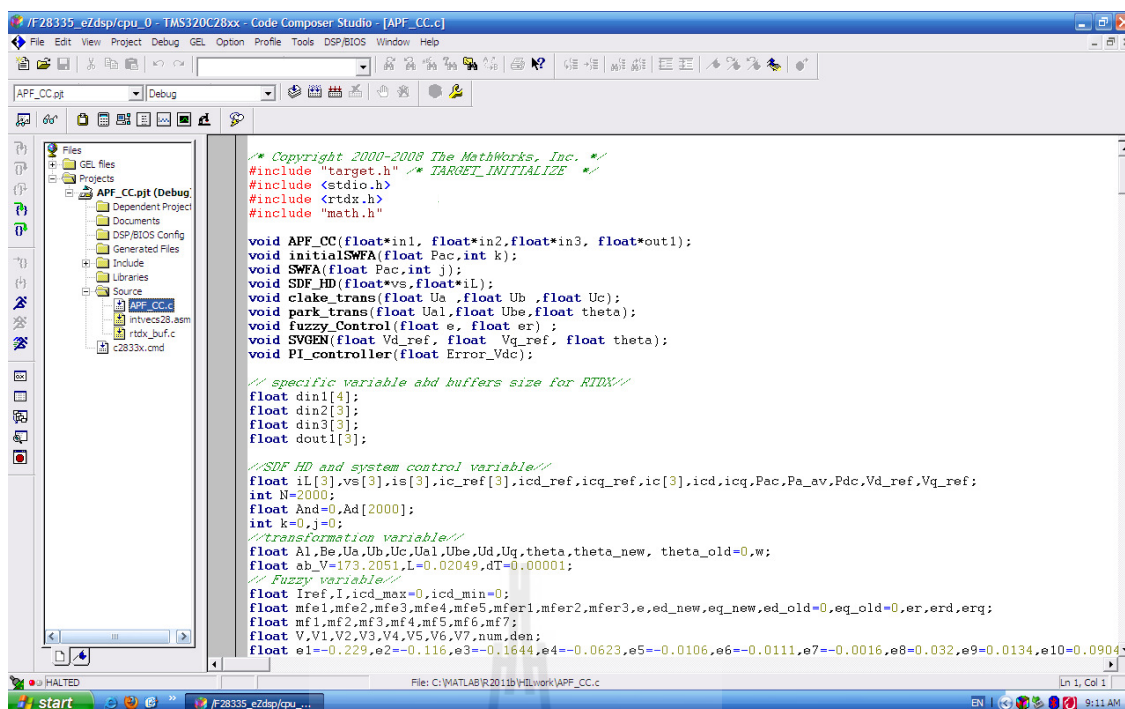


รูปที่ 7.4 ภายในบล็อก Communicate with Target (DSP) via RTDX

จากรูปที่ 7.4 กำหนดใช้บล็อก RTDX Write 3 บล็อกที่มี Channel name: ichan1 ichan2 และ ichan3 ซึ่งจะส่งอินพุตข้อมูลขนาด [4x1] [3x1] และ [3x1] ไปยังบอร์ด eZdsp™ F28335 ที่มีค่า Sample time เท่ากับ 1e-5 วินาที ตามการตั้งค่าที่บล็อก powergui ส่วนบล็อก RTDX Read จะกำหนด Channel name: ochan1 Sample time: 1e-5 Output dimensions: [3 1] (ขนาด [3x1]) และสำหรับการกำหนดไฟล์เพื่อเชื่อมต่อกับบอร์ด eZdsp™ F28335 ในที่นี้คือไฟล์ APF_CC.pjt และไฟล์โปรแกรม APF_CC.out ดังรูปที่ 7.5 โดยไฟล์โปรเจกต์ดังกล่าวที่หน้าต่างโปรแกรม CCSStudio v3.3 สามารถดูได้ดังรูปที่ 7.6 ซึ่งการคำนวณของโปรแกรมหักด้วยค่าดำเนินการคำนวณตามแผนภาพการคำนวณโปรแกรมดังรูปที่ 7.7



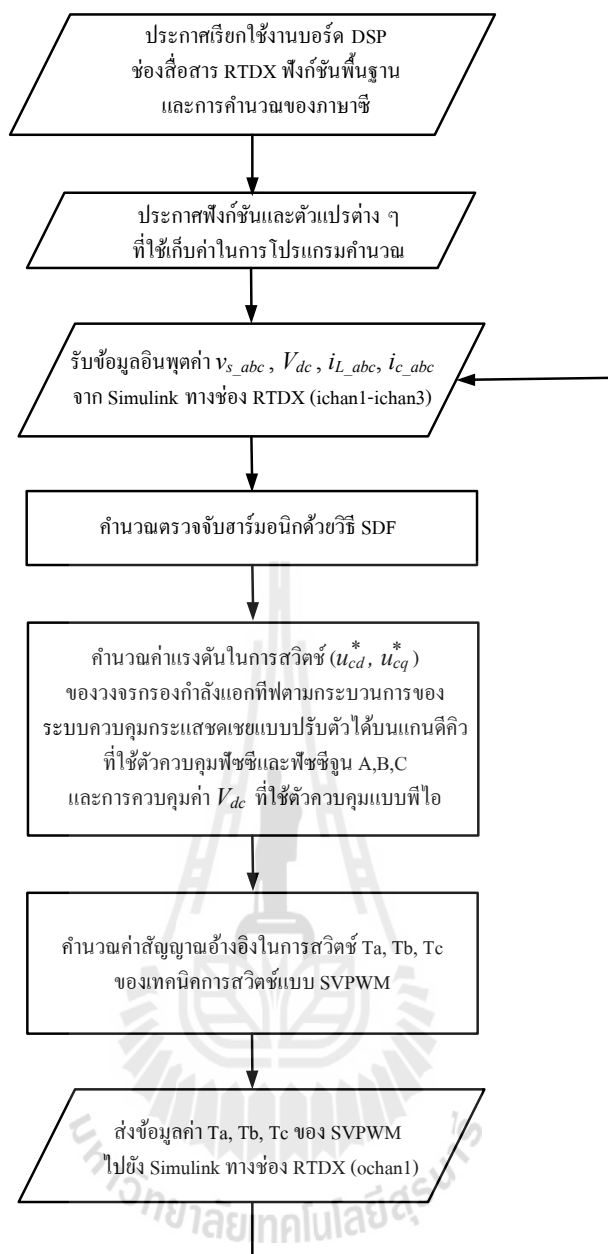
รูปที่ 7.5 การตั้งค่า Host-Target communication ของระบบจำลองสถานการณ์
การกำจัดฮาร์โมนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูป



รูปที่ 7.6 โปรเจก APF_CC ที่สร้างจากโปรแกรม CCStudio v3.3

จากรูปที่ 7.7 การคำนวณโปรแกรมเริ่มต้นจากการรับข้อมูลอินพุตค่า v_{s_abc} V_{dc} i_{L_abc} และ i_{c_abc} จากโปรแกรม Simulink ทางช่องสื่อสาร RTDX ican1 ถึง ican3 ตามลำดับ จากนั้นจึงคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยจากวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกวิธี SDF ตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เมื่อได้ค่ากระแสอ้างอิงแล้ว จะดำเนินการคำนวณตามระบบการควบคุมกระแสที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีบนแกนดีคิว รวมไปถึงการควบคุมค่า V_{dc} ของวงจรกรองกำลัง แอ็กทิฟด้วย (ระบบรูปที่ 5.10 ในบทที่ 5) ซึ่งจะได้ค่าแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์บนแกนดีและคิว (u_{cd}^* , u_{cq}^*) จากนั้นลำดับต่อไปจึงนำค่าแรงดันอ้างอิงไปผ่านเทคนิคการสวิตช์แบบวิธี SVPWM (ใช้ชุดคำสั่งสำเร็จรูปที่มีอยู่ภายในบอร์ด eZdsp™ F28335) และลำดับสุดท้ายทำการส่งข้อมูล T_a , T_b , T_c กลับไปที่โปรแกรม Simulink ทางช่อง RTDX ochan1 จากการอธิบายแผนภาพการโปรแกรมในข้างต้น เป็นการคำนวณเพียงรอบแรกเท่านั้น การคำนวณในรอบต่อไป จะเริ่มต้นทำการโหลดข้อมูลอินพุตค่าใหม่อีกครั้ง และดำเนินการซ้ำเดิมตามลำดับขั้นตอนที่ได้อธิบายไว้ดังกล่าว

จากการอธิบายระบบการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปทั้งหมดในข้างต้น ในลำดับต่อไปจะเป็นการนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ดังหัวข้อที่ 7.2.2



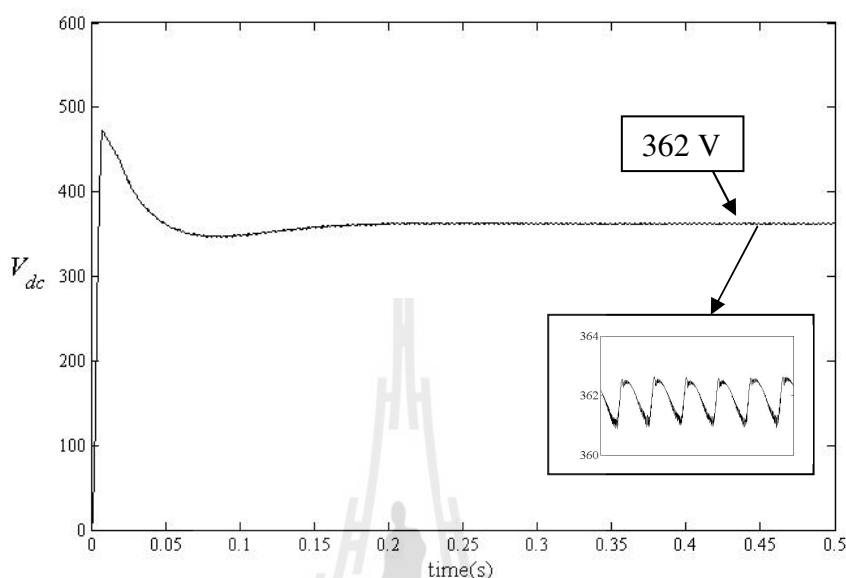
รูปที่ 7.7 แผนภาพการคำนวณของโปรแกรม APF_CC

7.2.2 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

ระบบสำหรับจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่สร้างขึ้นบนโปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด eZdsp™ F28335 ดังรูปที่ 7.3 เมื่อทำการจำลองสถานการณ์ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.5 วินาที สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรงได้ดังรูปที่ 7.8 และผลการกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส a , b และ c ได้ดังรูปที่ 7.9 7.10 และ 7.11 ตามลำดับ

จากรูปที่ 7.8 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ของวงจรกรองกำลังแยกที่ฟในช่วงเวลาดังเวลา 0 ถึง 0.5 วินาที โดยสังเกตได้ว่า ค่าแรงดันมีการลู่เข้าสู่ค่าคงตัวที่ค่าประมาณ 362 V ตามค่าแรงดันอ้างอิง (V_{dc}^*) ที่ได้ออกแบบไว้ โดย

ใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 0.2 วินาที จากผลสมรรถนะการควบคุมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้ออกแบบไว้ตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 สามารถนำไปใช้ในการสร้างตัวควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงจริงได้ภายในบอร์ด eZdsp™ F28335



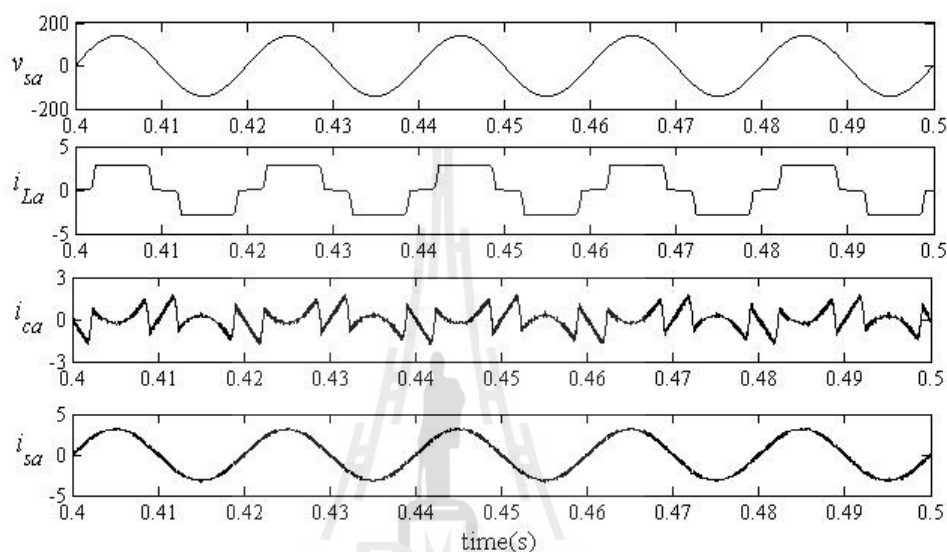
รูปที่ 7.8 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของค่าแรงดันบัสไฟตรง

ตารางที่ 7.1 ผลค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป

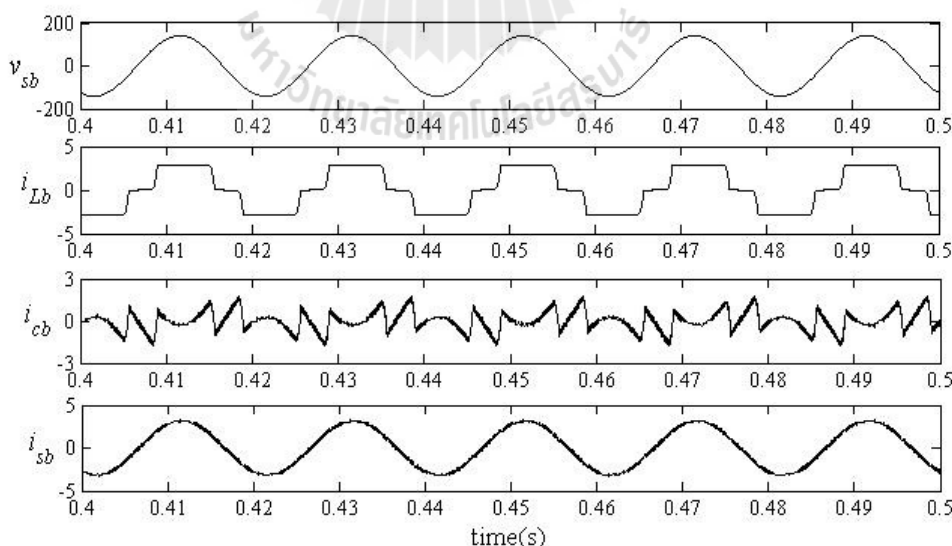
เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย (i_s)		
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย	มาตรฐาน IEEE std. 519-1992
a	26.37	2.02	5
b	26.40	1.70	5
c	26.40	1.75	5
เฉลี่ย	26.39	1.83	5

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปเฟส a b c ในรูปที่ 7.9 ถึง 7.11 พบว่า ระบบควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซีที่สร้างขึ้นบนบอร์ด eZdsp™ F28335 มีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่จำลองอยู่บนโปรแกรม Simulink ให้สามารถฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้ดี โดยจะเห็นได้ว่า กระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชยทั้งสามเฟส (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) มีลักษณะ

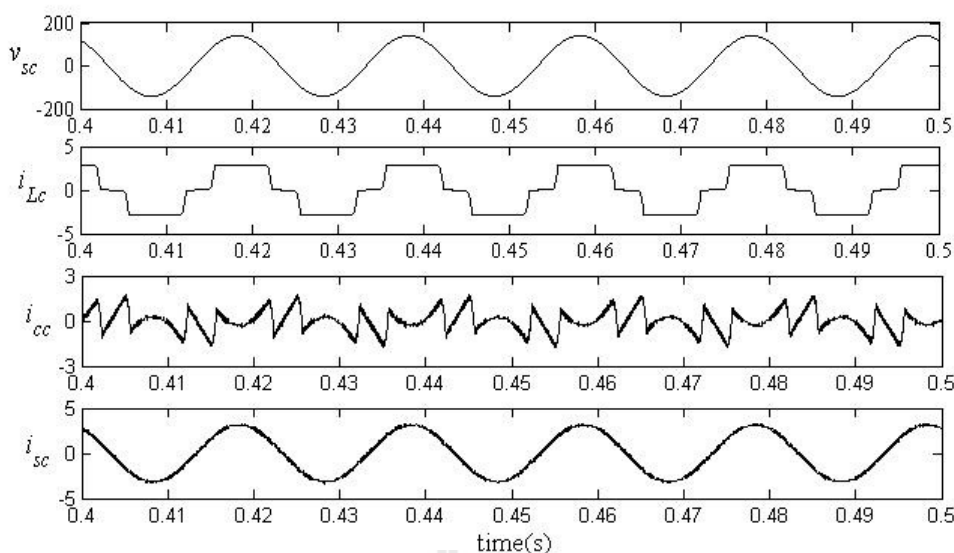
รูปสัญญาณเป็นไซน์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย (กระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายก่อนการชดเชยมีลักษณะรูปสัญญาณเหมือนกับกระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) ทุกประการ) โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชยหลังของเฟส a b และ c มีค่าเท่ากับ 2.02% 1.70% และ 1.75% ในขณะที่ก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 26.37% 26.40% และ 26.40% ตามลำดับเฟส ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 7.1 โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชยดังกล่าวเป็นไปตาม IEEE std. 519-1992 (IEEE std. 519-1992, 1993) ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 7.9 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส a



รูปที่ 7.10 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส b



รูปที่ 7.11 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส c

7.3 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด eZdsp™ F28335 โดยผลการจำลองสถานการณ์ของระบบกำจัดฮาร์มอนิก พบว่า ระบบควบคุมกระแสชดเชยที่สร้างขึ้นบนบอร์ด eZdsp™ F28335 สามารถควบคุมให้วงจรรอกำลังแอกทีฟที่สร้างขึ้นจากชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังอยู่บนโปรแกรม Simulink สามารถฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้ผลค่า %THD ภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย จากผลดังกล่าว ถือได้ว่า ตัวควบคุมพีไอของการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ได้ออกแบบในบทที่ 5 และตัวควบคุมพีซีซีสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS ที่ได้นำเสนอในบทที่ 6 มีสมรรถนะการควบคุมที่ดีเมื่อนำไปทดสอบสร้างจริงด้วยบอร์ด eZdsp™ F28335

บทที่ 8

บทสรุป

8.1 สรุป

รายงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ การควบคุมการบิดกระแสดชของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ โดยการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว การตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ในที่นี้ผู้วิจัยได้นำเสนอ วิธีฟูรีเยร์เอสดีซึ่งวิธีดังกล่าวได้จากการพัฒนาปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส การสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกวิธีฟูรีเยร์เอสดีดำเนินการสร้างโดยใช้บอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 และนอกจากนี้ในรายงานวิจัยยังได้นำเสนอ การจำลองสถานการณ์ระบบกำลังฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในลูป โดยใช้บอร์ด eZdsp™ F28335 ไว้ด้วยเช่นกัน

งานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟในส่วนต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน คือ ผลงานวิจัยวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่และวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยผลงานวิจัยทั้งหมดดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสเป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีสมรรถนะสูงในการตรวจจับฮาร์มอนิกอีกทั้งยังสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบไฟฟ้าได้ภายหลังการชดเชย อัลกอริทึมการคำนวณของวิธีดังกล่าวมีความหลากหลายซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ตามวัตถุประสงค์ของการชดเชย ได้แก่ กรณีแบบกระแสเท่ากัน แบบกำลังไฟฟ้าเท่ากัน และแบบค่าอิมพีแดนซ์เท่ากัน ซึ่งแต่ละอัลกอริทึมได้อาศัยการคำนวณที่ง่ายและเหมาะกับการโปรแกรมทางดิจิทัลเป็นอย่างยิ่ง ในงานวิจัยได้พัฒนาวิธีการตรวจจับซิงโครนัสเพื่อให้มีสมรรถนะการตรวจจับที่ดียิ่งขึ้นกว่าเดิมโดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อนเข้ามาช่วยในส่วนของการแยกปริมาณฮาร์มอนิกแทนการใช้วงจรกรอง และเรียกวิธีดังกล่าวใหม่ว่าวิธีฟูรีเยร์เอสดีหรือวิธี SDF รายละเอียดการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

การสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดีที่ใช้บอร์ด eZdsp™ F28335 ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 โดยผลการทดสอบในทางปฏิบัติแสดงให้เห็นแล้วว่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยที่ได้จากชุดตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดีมีความถูกต้อง

การควบคุมแบบฟัซซีเป็นวิธีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับระบบควบคุมที่มีความซับซ้อน คลุมเครือ มีความไม่เป็นเชิงเส้น และหลายอินพุต ทฤษฎีต่าง ๆ ของฟัซซี ได้แก่ ฟัซซีเซต การดำเนินการทางฟัซซีเซต ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก ตัวแปรภาษา กฎของฟัซซี และการอนุมานฟัซซี ได้นำเสนอในบทที่ 5 นอกจากนี้ในบทดังกล่าวยังได้นำเสนอการนำตัวควบคุมฟัซซีมาประยุกต์ใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟบนแกนดีคิวร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์พีคเบิลยูเอ็ม (SVPWM) โดยได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีในส่วนต่าง ๆ สำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยเช่นกัน

การออกแบบค่าพารามิเตอร์จุดตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ รวมไปถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อให้มีสมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยที่ดี ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบโดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวหรือวิธี ATS ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ระบบกำลังอัดฮาร์มอนิก พบว่า ตัวควบคุมฟัซซีที่ได้จากการออกแบบจากวิธีดังกล่าวให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6

ในบทที่ 7 ได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์ระบบกำลังอัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด eZdspTM F28335 การจำลองสถานการณ์แบบดังกล่าวได้ใช้บอร์ด eZdspTM F28335 สำหรับสร้างอัลกอริทึมการคำนวณการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF และสร้างระบบควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่สร้างขึ้นจากชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม Simulink ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า ระบบควบคุมที่สร้างขึ้นบนบอร์ด eZdspTM F28335 สามารถควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่สร้างบนโปรแกรม Simulink สามารถฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยค่า %THD ภายหลังการชดเชยของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชยและเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE std. 519-1992.

รายการอ้างอิง

- กองพัน อารีรักษ์ และ สราวุฒิ สุจิตจร. (2545). การเปรียบเทียบสมรรถนะของการค้นหาด้วย
จินเนติกอัลกอริทึมกับวิธีตาม. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 9: 61-68.
- ปราชรี ประสมศักดิ์. (2553). การประยุกต์ฟuzzyลอจิกสำหรับการควบคุมวงจรร่งกำลังแอกทีฟ
แบบขนาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชา
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์. (2554). การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรร่งกำลังแอกทีฟแบบขนาน
ด้วยเทคนิคพีดับเบิ้ลยูเอ็มบนแกนดิจิทัล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร ภาควิชา
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.
- 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.
- 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.

- Chang Q.C., Liping W. and Guohui Y., (2009). A three-phase active power filter based on park transformation. **IEEE International Conference on Computer Science & Education, 2009. ICCSE '09. 4th**. :1221 - 1224
- 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.
- 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 ParametersPI 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.
- 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.
- 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.
- Hao R., Cheng Z., and You X. (2004). A Novel Harmonic Currents Detection Method based on Rotating d-q Reference Frame for Active Power Filter. **IEEE conference on Power Electronics Specialists, PESC 04**. 4:3034-3038.
- 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, “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, 1993.
- 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.
- Jou H-L. (1995). Performance Comparison of the Three-phase Active-Power-Filter Algorithms. **IEE Proc -Gener Transnz Destrctb**. 142(6): 646-652.
- 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.
- 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.
- Narongrit, T. , Areerak, K-L. ,Areerak, K-N. (2012). Current control of shunt active power filter using space vector PWM. **IEEE International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) 9th**. :1-4.
- 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.
- 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.
- Saetio S. and Torrey D. A. (1998). Fuzzy Logic Control of a Space-Vector PWM Current Regulator for Three-Phase Power Converters. **IEEE Transaction on Power Electronics**. 13(3):419-426.
- 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.
- 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.

- 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 Xioabo L. (2011). Research of improved Iterative DFT method in harmonic current detection. **IEEE Conference on Asia-Pacific Power and Energy Engineering (APPEEC)**. :1-4.
- Zadeh L.A. (1965). Fuzzy sets. **Information and Control**. 8: 338-353.
- Zadkhast 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.

ประวัติผู้วิจัย

ดร.กองพล อารีรักษ์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี โท และเอก ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2543 2546 และ 2550 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ และหัวหน้าหน่วยวิจัยคุณภาพกำลังไฟฟ้า ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชำนาญทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรกรองกำลังแอคทีฟ การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า คุณภาพกำลังไฟฟ้า ระบบควบคุม และการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์

