

การประยุกต์ฟิสิกส์ลอจิกสำหรับการควบคุมวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน

นางสาวปราจรี ประสมศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2553

**FUZZY LOGIC APPLICATION FOR SHUNT ACTIVE
POWER FILTER CONTROLS**

Prajaree Prasomsak

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2010

การประยุกต์ฟิสิกส์เชิงกลสำหรับการควบคุมวงจรรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานำฉบับนี้ไปใช้ในการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ทองพล อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

(อ. ดร.ทองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ

(อ. ดร.วุฒิ ด่านกิตติกุล)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปราชญ์ ประสมศักดิ์ : การประยุกต์ฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (FUZZY LOGIC APPLICATION FOR SHUNT ACTIVE POWER FILTER CONTROLS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์, 205 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล โดยมีการควบคุมการบิดกระแสดชเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำ การออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ คือ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS) การทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสดชเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกดังกล่าว มีการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบฮิสเตอร์ซิส โดยพึ่งพาการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยผลการจำลองสถานการณ์พบว่า การใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการควบคุมการบิดกระแสดชเชยส่งผลให้ปริมาณกระแสดชเชยฮาร์มอนิกในระบบเหลือน้อยที่สุด อีกทั้งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกเช่นเดียวกัน และการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมนี้ ยังคงใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวเช่นเดียวกันกับการควบคุมการบิดกระแสดชเชย ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ของตัวควบคุมดังกล่าวพบว่า สามารถควบคุมแรงดันบัลไฟตรงได้ตามที่ต้องการ

PRAJAREE PRASOMSAK : FUZZY LOGIC APPLICATION FOR SHUNT
ACTIVE POWER FILTER CONTROLS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
KONGPOL AREERAK, Ph.D., 205 PP.

HARMONIC ELIMINATION/ SHUNT ACTIVE POWER FILTER/ FUZZY
LOGIC CONTROLLER

This thesis presents the harmonic elimination using a shunt active power filter for a balanced three-phase system. The instantaneous power theory is used for harmonic detection method. In this thesis, a fuzzy logic system is selected to control the compensating current. This is because it does not need the mathematical model of the system. In addition, the artificial intelligence technique called adaptive tabu search (ATS) is used to design the membership function of the fuzzy logic controller. Moreover, results using the proposed controller are compared with the hysteresis current control after compensation by the computer simulation. The simulation results show that the fuzzy logic controller provides the minimum harmonic quality of the source currents and this value is under the IEEE Std. 519-1992. Additionally, the fuzzy logic controller with membership functions optimized by ATS method is used for the dc bus voltage control. The simulation results using the fuzzy logic controller show that this controller can control the dc bus voltage to desired value.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ ดร.กองพันธ์ อารีรักษ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ปราจิри ประสมศักดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	3
2 ปรัชณวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรอง กำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรอง กำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก.....	8
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ร่วม กับตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ.....	10
2.5 สรุป.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง	12
3.1	บทนำ.....	12
3.2	นิยามส่วนประกอบต่าง ๆ ของวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง.....	12
3.3	ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง.....	15
3.4	การปรับปรุงสมรรถนะของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง.....	18
3.5	สรุป.....	27
4	การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก	28
4.1	บทนำ.....	28
4.2	การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก	28
4.3	การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธีการของ Ingram และ Round	30
4.4	ระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก	32
4.4.1	ทฤษฎีฟัซซีเซต	32
4.4.2	ตัวแปรแบบฟัซซีและตัวแปรทางภาษา.....	37
4.4.3	โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก	39
4.4.4	กฎของฟัซซี	40
4.4.5	การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ	43
4.4.6	การดีฟัซซีฟิเคชัน.....	46
4.5	การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย.....	51
4.6	ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล.....	55
4.7	สรุป	61
5	การปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	63
5.1	บทนำ.....	63

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2	การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว.....	63
5.3	การออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	66
5.4	การกำหนดขอบเขตการค้นหาของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว.....	73
5.5	การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	77
5.6	ทบทวนการควบคุมการฉีดกระแสน้ำด้วยวิธีฮิสเทอรีซิส	82
5.7	ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล.....	86
5.8	สรุป	90
6	การควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก.....	92
6.1	บทนำ.....	92
6.2	การควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	92
6.2.1	การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุม แรงดันไฟฟ้าตรง.....	95
6.2.2	ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล	100
6.3	การปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุม แบบฟัซซีลอจิกโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	107
6.3.1	การออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบ ฟัซซีลอจิกด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	107
6.3.2	การกำหนดขอบเขตการค้นหาของวิธีการค้นหาแบบตามู เชิงปรับตัว.....	111
6.3.3	การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว.....	114
6.3.4	ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล	118
6.4	สรุป.....	122
7	สรุปและข้อเสนอแนะ	124
7.1	สรุป	124
7.2	ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	125

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง	127
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โปรแกรมควบคุมแบบพีซีลอจิกแบบ 2 อินพุต.....	132
ภาคผนวก ข. โปรแกรมการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชย ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว.....	162
ภาคผนวก ค. โปรแกรมการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว.....	180
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	196
ประวัติผู้เขียน	205

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟ แบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก	6
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลัง แอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก.....	8
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ร่วมกับ ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ	10
3.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรอกำลังสูงและวงจรรอกำลังต่ำชนิดบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่ 1 ถึง 3.....	19
3.2 ค่า %THD _{av} จากการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิก ของกำลังแอกทีฟโดยใช้วงจรรอกำลังสูง	21
3.3 ค่า %THD _{av} จากการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิก ของกำลังแอกทีฟโดยใช้วงจรรอกำลังต่ำ.....	22
3.4 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก.....	26
4.1 ตัวแปรทางภาษา และค่าทางภาษา.....	38
4.2 ข้อมูลของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ	50
4.3 การตรวจสอบระดับความเป็นสมาชิกภาพ	50
4.4 ข้อมูลของระดับฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่มากที่สุด.....	51
4.5 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ	53
4.6 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาด	54
4.7 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด	55
4.8 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของเอาต์พุต	55
4.9 ผลการทดสอบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ	56
5.1 ผลการทดสอบค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก.....	71
5.2 ผลการเปรียบเทียบระบบบน m - file กับ simulink	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.3 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case I และcase II	73
5.4 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case III และcase IV	74
5.5 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น	77
5.6 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง	77
5.7 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น	78
5.8 ผลการทดสอบค่าปรับลดรัศมี	79
5.9 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกรณีการออกแบบวงจรรอง กำลังแอกทีฟแบบขนานโดยใช้วิธีการของ Ingram และ Round และ วิธี ATS.....	85
5.10 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม	86
5.11 การเปรียบเทียบค่า %THD เฉลี่ย กับวิธีการดีฟัซซี่ฟิเคชันแบบต่าง ๆ	90
6.1 ตัวแปรทางภาษา และค่าทางภาษา.....	96
6.2 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ	98
6.3 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาด	100
6.4 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของเอาต์พุต	100
6.5 ผลการทดสอบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ	104
6.6 ผลการทดสอบค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก.....	111
6.7 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case I และcase II	111
6.8 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case III และcase IV	112
6.9 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น	115
6.10 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง	115
6.11 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น	116
6.12 ผลการทดสอบค่าปรับลดรัศมี	117
6.13 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง	119

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ส่วนประกอบของกำลังไฟฟ้าบนแกน abc	12
3.2 แผนภาพการแปลงแกนของ Clarke.....	15
3.3 บล็อกไดอะแกรมการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง.....	16
3.4 ระบบสำหรับการตรวจสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก	18
3.5 การแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่ใช้งานกรรกรองผ่านสูง	20
3.6 การแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่ใช้งานกรรกรองผ่านต่ำ.....	20
3.7 ผลการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่ใช้งานกรรกรองผ่านสูง.....	23
3.8 ผลการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่ใช้งานกรรกรองผ่านต่ำ	24
3.9 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส a กรณีใช้งานกรรกรองผ่านสูงแยกปริมาณ ฮาร์มอนิก ($f_c = 10$ Hz)	25
3.10 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส a กรณีใช้งานกรรกรองผ่านต่ำแยกปริมาณ ฮาร์มอนิก ($f_c = 72$ Hz).....	25
4.1 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	29
4.2 สเปกตรัมฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า.....	31
4.3 ฟังก์ชันแสดงความสัมพันธ์ของฟัซซีเซต A	32
4.4 ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของเซตปกติธรรมดา	33
4.5 การยูเนียนของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B	34
4.6 การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B	35
4.7 ส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A	36
4.8 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ร่วมกับพีดีบีลยูเอ็ม	37
4.9 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก	39
4.10 สัญญาณของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก.....	42
4.11 กฎเมตริกซ์ (FAM)	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 การอนุมานแบบเบย์แมคานีที่ใช้ค่าสูงสุด - ค่าสุด	44
4.13 การอนุมานแบบเบย์แมคานีที่ใช้ค่าสูงสุด - ผลคูณ	46
4.14 วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด.....	48
4.15 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ.....	49
4.16 รูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ	52
4.17 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุต	53
4.18 สเปกตรัมของกระแสฮาร์โมนิกลำดับต่าง ๆ ก่อนมีการบิดกระแสชดเชย.....	57
4.19 สเปกตรัมของกระแสฮาร์โมนิกลำดับต่าง ๆ หลังมีการบิดกระแสชดเชย	57
4.20 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการทดสอบข้อมูลชุดที่ 3.....	58
4.21 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส a	60
4.22 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส b	60
4.23 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส c	61
5.1 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา.....	64
5.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0	64
5.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่.....	65
5.4 กำหนดค่า S_0 ใหม่.....	65
5.5 กลไกการเดินย้อนรอย.....	66
5.6 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธี ATS.....	67
5.7 โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม แบบฟัซซี่ลอจิก	68
5.8 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาด	70
5.9 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด	70
5.10 การเปรียบเทียบค่ากระแสชดเชยจริงบน m - file เทียบกับ simulink.....	72
5.11 การหาคำตอบ w ในกรณีต่าง ๆ.....	76
5.12 การหาคำตอบ w	80
5.13 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการค้นหาด้วย ATS.....	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	83
5.15 ลักษณะการควบคุมรูปคลื่นสัญญาณด้วยวิธีฮิสเตอร์ซิสต	83
5.16 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยใช้วิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์.....	84
5.17 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ก่อนมีการฉีดกระแสชดเชย.....	87
5.18 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ หลังมีการฉีดกระแสชดเชย	88
5.19 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส a	88
5.20 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส b	89
5.21 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส c	89
6.1 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเมื่อมีการควบคุม แรงดันบัลไฟตรง	93
6.2 แผนภาพการคำนวณการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่มีการควบคุมแรงดัน บัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	94
6.3 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก.....	95
6.4 รูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ	98
6.5 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุต	99
6.6 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน กรณีไม่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง.....	101
6.7 ค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน กรณีไม่มีการควบคุม	102
6.8 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส a กรณีไม่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง	102
6.9 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการทดสอบข้อมูลชุดที่ 3	104
6.10 ค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีมีการควบคุม	105
6.11 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส a กรณีมีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง.....	106
6.12 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธี ATS.....	107
6.13 โครงสร้างการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก	109

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.14	ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาด 110
6.15	การหาค่าคำตอบ w ในกรณีต่าง ๆ 114
6.16	การหาค่าคำตอบ w 118
6.17	ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการค้นหาด้วย ATS 120
6.18	ค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานที่ปรับปรุง สมรรถนะด้วยวิธี ATS 121
6.19	ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส a เมื่อได้รับการปรับปรุงสมรรถนะ การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยวิธี ATS 122

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากตามโรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้งานอุปกรณ์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นกันอย่างกว้างขวาง อาทิเช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ หลอดฟลูออเรสเซนต์ หม้อแปลงไฟฟ้า ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ เครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น (IEEE Std. 519-1992, 1993) ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์เหล่านี้ยังก่อให้เกิดผลเสียหลายประการ ดังเช่น ทำให้มิเตอร์วัดค่าไฟฟ้าวัดค่าผิดพลาด (Elham, 1992) เกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด เกิดกำลังงานสูญเสีย (Rice, 1986) และความร้อนต่ออุปกรณ์ขณะใช้งาน (Wagner, 1993) จากสาเหตุเหล่านี้จึงทำให้มีการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ทางการกำจัดฮาร์มอนิกขึ้นเพื่อทำให้ปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกลดน้อยลงและส่งผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุด ซึ่งในอดีตได้มีการแก้ไขปัญหาด้านฮาร์มอนิกด้วยการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Peng, Akagi, and Nabae, 1988) แต่เนื่องจากวงจรดังกล่าวก่อให้เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบ และยังมีน้ำหนักมาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการคิดค้นวงจรกรองกำลังแอคทีฟ (Chen and Xie, 2004) ขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกสูง ซึ่งการใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟที่อาศัยอุปกรณ์สวิตชิง ในการฉีดกระแสชดเชยเพื่อหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนั้น การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยให้เป็นไปตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก ถือว่าเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าและจากการศึกษาค้นคว้าพบว่า วิธีการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี อาทิเช่น ตัวควบคุมพีไอ (Zhang, Dai, Yu, and Kang, 2010) ซีเอสเคอีซีเอส (Chaoui, Gaubert, Krim, and Rambault, 2007) โครงข่ายประสาทเทียม (Elmitwally, Abdelkader, and El-Kateb, 2000) ฟัซซีลอจิก (Ross, 1995) การควบคุมแบบโหมดเลื่อน (Cardenas, Vazquez, and Herndndez, 1998) และพีดีบีเลเยูเอ็ม (Hong, Yin, Liu, and Shan, 2009) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการควบคุมการฉีดกระแสชดเชย เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำของระบบ อีกทั้งยังเหมาะสำหรับระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อทำการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟ ขณะหนึ่งให้มีประสิทธิภาพการตรวจจับที่ดีขึ้น

1.2.2 เพื่อดำเนินการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานให้มีสมรรถนะการทำงานที่ดีขึ้น โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์

1.2.3 เพื่อศึกษาและดำเนินการออกแบบตัวควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น

1.3.1 ระบบที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์เป็นระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล

1.3.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่พิจารณาเป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.3.3 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ simulink ของโปรแกรม MATLAB

1.3.4 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

1.3.5 โหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

1.3.6 การวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกมุ่งเน้นที่การปรับแก้กระแสฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียว

1.3.7 ดัชนีชี้วัดประสิทธิผลการกำจัดฮาร์มอนิก ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 เป็นเกณฑ์กำหนด

1.3.8 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ด้วยวิธีการค้นหาแบบแบบตาบู่เชิงปรับตัว

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุลเท่านั้น

1.4.2 ผลการจำลองสถานการณ์ต้องอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.5.2 ได้โปรแกรมในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.5.3 ได้วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งที่มีสมรรถนะดีขึ้น

1.5.4 ได้องค์ความรู้ด้านการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

1.5.5 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกโดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

1.5.6 ได้องค์ความรู้ในการออกแบบตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

1.5.7 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ หรือ นานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

บทที่ 3 อธิบายการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง นิยามส่วนประกอบต่าง ๆ ของวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง นอกจากนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง

บทที่ 4 นำเสนอการควบคุมการบิดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้วิธีการของ Ingram และ Round ระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย โดยมีการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งหมด 21 พารามิเตอร์ของทั้ง 3 ชุดข้อมูล รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชยของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งหมด 21 พารามิเตอร์ของข้อมูลชุดที่ 3

บทที่ 5 นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมการฉีดกระแสน้ำของวงจรกรองกำลังแอกทิฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว การออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งหมด 14 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ขอบเขตการค้นหา และการทดสอบพารามิเตอร์ นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลการกำจัดฮาร์โมนิกของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกกับวิธีฮิสเทอรีซิส และการเปรียบเทียบวิธีการดีฟัซซิฟิเคชันและการอนุมานแบบฟัซซี

บทที่ 6 นำเสนอการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทิฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกกรณีมีการควบคุมและไม่มีการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง นอกจากนี้มีการนำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 4 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดโปรแกรมตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกแบบ 2 อินพุต ภาคผนวก ข. แสดงรายละเอียดโปรแกรมการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมกระแสน้ำด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ภาคผนวก ค. แสดงรายละเอียดโปรแกรมการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ภาคผนวก ง. แสดงรายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการทำวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุล ซึ่งในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยดังกล่าวได้มีผู้ทำการวิจัยค้นคว้า และพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนมาถึงปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก และการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ร่วมกับตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ ซึ่งในแต่ละหัวข้อผู้วิจัยจะนำเสนอเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นที่การปรับแก้กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุลที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) ที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) สำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยเลือกใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก โดยปรัทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ตามที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแยกทีฟ
แบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2000	Dell Aquila, A., Delvino, G., Liserre, M., and Zancbetta, P.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม พร้อมทั้งมีการหาค่าความถี่สวิตช์ และค่ามุมจุดชนวนเกทที่เหมาะสม
2002	Jain, S. K., Agrawal, P., and Gupta, H. O.	นำเสนอตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับวิธีฮิสเทอรีซิสในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยมีการเปรียบเทียบสมรรถนะของการฉีดกระแสชดเชยของตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่มีการอนุมานแบบแมมดานิที่ใช้ค่าสูงสุด-ต่ำสุด
2003	Dell Aquila, A., and Lecci, A.	นำเสนอตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อชดเชยกระแสฮาร์โมนิกในสายนิวทรัลและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย โดยส่วนสำคัญ คือ การกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณจุดชนวนเกทเพื่อแก้ปัญหาโหลดที่มีความเพี้ยนสูง
2004	Hamadi, A., Al-Haddad, K., Lagace, P. J., and Chandra, A.	เปรียบเทียบตัวควบคุมแบบพีไอกับตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่ใช้การอนุมานด้วยวิธี sugeno โดยหาค่าเหมาะสมที่สุดของจำนวนกฎ และฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
2005	Palandoken, M., Aksoy, M., and Tumay, M.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น และมีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ
2006	Singh, G. K., Singh, A. K., and Mitra, R.	นำเสนอตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับควบคุมวงจรกรองกำลังแยกทีฟเพื่อกำจัดฮาร์โมนิกให้ลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
แบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	Benalla, H., and Djeghloud, H.	นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้า และค่าตัวประกอบกำลัง โดยควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับเทคนิคพีดีบีเบิลยูเอ็ม
2006	Bhende, C. N., Mishra, S., and Jain, S. K.	นำเสนอตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่ใช้การอนุมานด้วยวิธี sugeno เพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า โดยกล่าวถึงการอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิมีลักษณะการใช้งานที่ง่ายแต่จำกัดจำนวนฟัซซีเซตและจำนวนกฎ แต่ถ้าต้องการเพิ่มความซับซ้อนในการควบคุมการอนุมานด้วยวิธี sugeno จะเหมาะสมกว่า นอกจากนี้มีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมและมีการเปรียบเทียบตัวควบคุมดังกล่าวกับตัวควบคุมพีไอ
2008	Muhaidheen, M., and Meenakshi Sundaram, B.	นำเสนอตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับการควบคุมแบบโหมดเลื่อนสำหรับควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน
2009	Kumar and Mahajan	นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก โครงข่ายประสาทเทียม (neural network) และจินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm) สำหรับควบคุมการสวิตช์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยกล่าวว่า ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกมีความสำคัญต่อการควบคุม
2009	Narasa Reddy T., and Subramanyam, M. V.	นำเสนอการควบคุมระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับเทคนิคพีดีบีเบิลยูเอ็ม และมีการเปรียบเทียบรูปร่างของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลัง

แอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

เนื่องจากในสภาวะการทำงานปกติของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรดังกล่าวจะไม่ตรงตามค่าแรงดันที่ได้ทำการออกแบบไว้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการนำกระแสของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานโดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมค่าแรงดันให้มีค่าคงที่ตลอดการทำงาน ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยเลือกใช้การควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1999	Dixon, J. W., Contardo, J. M., and Moran, L. A.	นำเสนอการควบคุมกระแสขดเคียวและแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกเทียบกับตัวควบคุมพีไอและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง
2004	Palandoken, M., Aksoy, M., and Tumay, M.	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไม่เป็นเชิงเส้น
2004	Farrokhi, M., Jamali, S., and Mousavi, S. A.	นำเสนอการควบคุมกระแสของวงจรรอกำลังแอกทีฟโดยตรงและควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ซึ่งมีจุดประสงค์หลักเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกกับตัวควบคุมแบบพีไอ
2007	Sharmeela, C., Mohan, M. R., Uma, G., and Baskaran, J.	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับตัวควบคุมพีไอ

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟ
แบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	Singh, G. K., Singh, A. K., and Mitra, R.	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ซึ่งกล่าวถึงรายละเอียดโครงสร้างการควบคุม การออกแบบพารามิเตอร์วงจรรอกำลังแอกทีฟ และทดสอบกรณีมีการเพิ่มขึ้นของโหลด 7 ระดับ กับกรณีกระแสที่โหลดไม่สมดุล
2008	Abdelkhalek, O., Benachaiba, C., Haidas, M., and Benslimane, T.	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก เพื่อช่วยให้การตอบสนองในช่วงเวลาขึ้น (rise time) ของแรงดันบัลไฟตรงเร็วขึ้นและปรับปรุง %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า
2008	Hamzah, M. K., Abdul Ghafar, A. F., and Mohd Hussian, M. N.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีเฟสเดียว และจากผลที่ได้พบว่า เมื่อลดจำนวนการสวิตช์ของอุปกรณ์ สมรรถนะการควบคุมก็ยังส่งผลดีอยู่ เมื่อใช้เทคนิคทางดิจิทัลเปรียบเทียบกับทางอนาล็อก โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกในการควบคุมแรงดัน ซึ่งให้สมรรถนะและช่วงเวลากการตอบสนองดีกว่าตัวควบคุมพีไอ
2010	Karuppanan, P., and Kamalakanta, M.	นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ซึ่งตัวควบคุมแบบฟัซซี่มีสมรรถนะดีที่สุด
2010	Colak, Bayindir, Kaplan, and Tas	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกเพื่อชดเชยกำลังสูญเสียของวงจรรอกำลังแอกทีฟ และปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ร่วมกับตัว

ควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

การปรับปรุงสมรรถนะการวิเคราะห์และควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก จะปรับปรุงที่ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก โดยในอดีตที่ผ่านมาการนำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกด้วยวิธีทางปัญญาประติษฐ์มีน้อยมาก และมีการนำไปใช้กับระบบที่แตกต่างกันออกไป โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ร่วมกับตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ร่วมกับ

ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2002	Aytekin Bagis	นำเสนอวิธีใหม่ในการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่ (tabu search) สำหรับระบบเปิด-ปิด ประตูเขื่อน
2004	Teng, M., Xiong, F., Wang, R., and Wu, Z.	นำเสนอการจูนกฎและฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ โดยใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึมสำหรับระบบเขื่อน
2006	Bayindir, K. C., Cuma, M. U., and Tumay, M.	นำเสนอการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference system: ANFIS) สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน
2009	Herman, N. S., Yusuf, I., and Shamsuddin	ศึกษาการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในระบบควบคุมแบบวงปิด

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ร่วมกับ
ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Wen Jie Tian, Yue Tian, Lan Ai, and Cheng Liu	นำเสนอการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก โดยใช้ Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA)
2010	Garus, J., and Zak, B.	นำเสนอการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก โดยใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึม สำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ในการทำงานได้ท้อ่งทะเล

จากตารางที่ 2.3 พบว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานไม่เป็นที่ปรากฏอย่างแพร่หลาย และยังไม่มีการนำเสนอการปรับปรุงฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมดังกล่าวด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว และวิธีการค้นหาด้วยอัลกอริทึมอื่น ๆ นอกจากวิธีโครงข่าย ประสาทเทียม ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงนำเสนอการปรับปรุงฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

2.5 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 นี้ เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้น ถือเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัย สำหรับการทําวิจัยวิทยานิพนธ์ และการพัฒนาประสิทธิภาพของการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานให้เพิ่มมากขึ้น

บทที่ 3

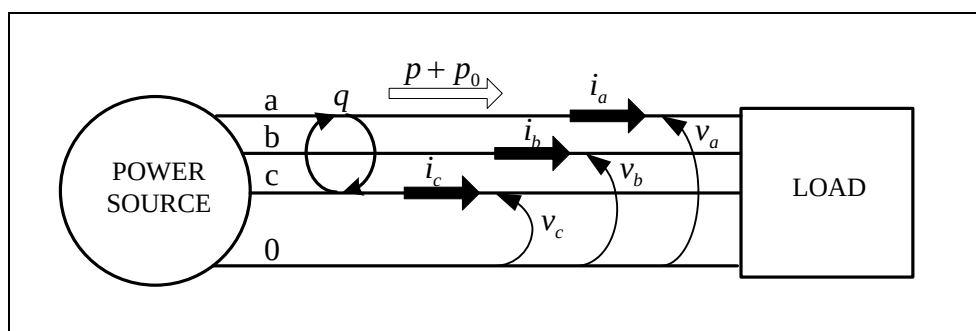
การตรวจจับสารมอนิกันด้วยวิธีทฤษฎีกาลังรีแอกทีฟเฉพาะหนึ่ง

3.1 บทนำ

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power theory) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วิธี PQ (Akagi, Kanazawa, and Nabae, 1983) การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ใช้หลักการแปลงปริมาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ โดยใช้การแปลงของ Clarke ที่ไม่จำกัดลักษณะรูปสัญญาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้า อีกทั้งสามารถใช้ได้กับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุลและไม่สมดุล เนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอ นิยามส่วนประกอบต่าง ๆ ของวิธี PQ ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ

3.2 นิยามส่วนประกอบต่าง ๆ ของวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ เพื่อชดเชยแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามีความจำเป็นอย่าง
ยิ่งที่ต้องทำความเข้าใจนิยามส่วนประกอบต่าง ๆ ของวิธีดังกล่าว ที่เกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ
ขณะหนึ่ง (p) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่ง (q) โดยกำลังไฟฟ้างกล่าวจะแสดงอยู่บน
แกน abc ซึ่งพิจารณาได้ตามรูปที่ 3.1 ดังนี้

รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของกำลังไฟฟ้าบนแกน abc

จากรูปที่ 3.1 สังเกตได้ว่ากำลังไฟฟ้าสามเฟส ($p_{3\phi}$) จะเท่ากับผลรวมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่งกับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟลำดับเฟสศูนย์ ($p_{3\phi} = p + p_0$) ในขณะที่กำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งจะแสดงปริมาณของพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างเฟสของระบบ ซึ่งนิยามของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่งสามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ (3.1) ดังนี้

$$p = \mathbf{v} \cdot \mathbf{i} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) สามารถพิจารณากำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่งบนแกน $\alpha\beta 0$ ได้ดังสมการที่ (3.2) และกำลังไฟฟ้าสามเฟสได้ตามสมการที่ (3.3)

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (3.2)$$

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (3.3)$$

นิยามของเวกเตอร์กำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ($\mathbf{q}$) แสดงได้ดังสมการที่ (3.4) และสามารถพิจารณาค่าเวกเตอร์กำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งของ q_α , q_β และ q_0 ได้จากสมการที่ (3.5)

$$\mathbf{q} = \mathbf{v} \times \mathbf{i} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0} \times \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{vmatrix} v_\beta & v_0 \\ i_\beta & i_0 \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} v_0 & v_\alpha \\ i_0 & i_\alpha \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ i_\alpha & i_\beta \end{vmatrix} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

จากสมการที่ (3.5) ขนาดของเวกเตอร์กำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งสามารถคำนวณหาได้ตามสมการที่ (3.6) ดังนี้

$$q = |\mathbf{q}| = \sqrt{q_\alpha^2 + q_\beta^2 + q_0^2} \quad (3.6)$$

การแปลงปริมาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ โดยใช้การแปลงของ Clarke และอินเวอร์สการแปลงของ Clarke พิจารณาได้ดังสมการที่ (3.7) และสมการที่ (3.8) ตามลำดับ โดยสมการดังกล่าวจะถูกปรับคูณด้วยสัมประสิทธิ์ $\sqrt{\frac{2}{3}}$ เพื่อให้การคำนวณกำลังไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ เท่ากับการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบสามเฟส (abc)

$$\mathbf{v}_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

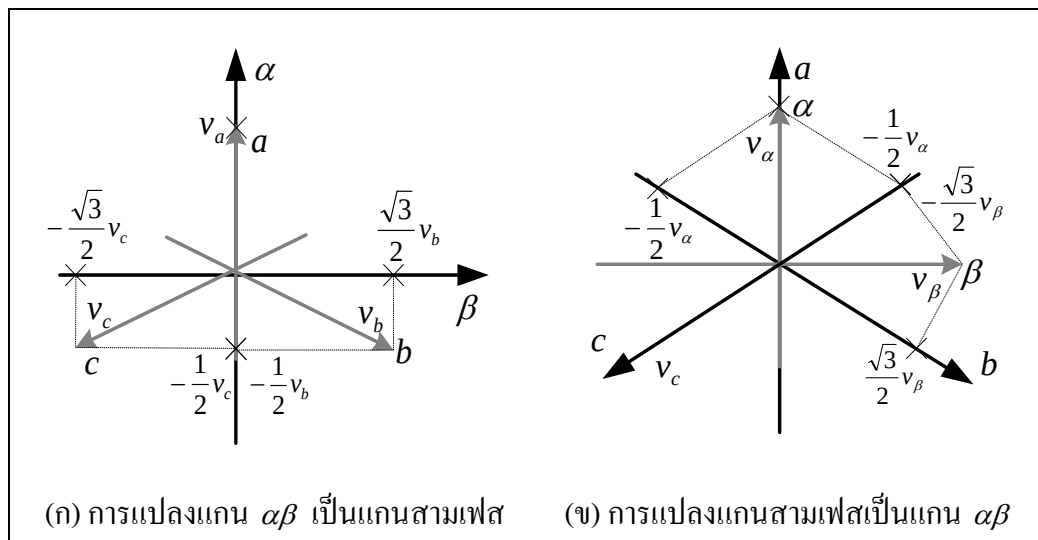
$$\mathbf{v}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

ในทำนองเดียวกัน การแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ โดยใช้การแปลงของ Clarke และอินเวอร์สการแปลงของ Clarke พิจารณาได้ดังสมการที่ (3.9) และสมการที่ (3.10) ดังนี้

$$\mathbf{i}_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.7) และสมการที่ (3.8) เมื่อไม่พิจารณาปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน 0 จะสามารถพิจารณาการแปลงแกนของ Clarke ได้ตามรูปที่ 3.2 ดังนี้



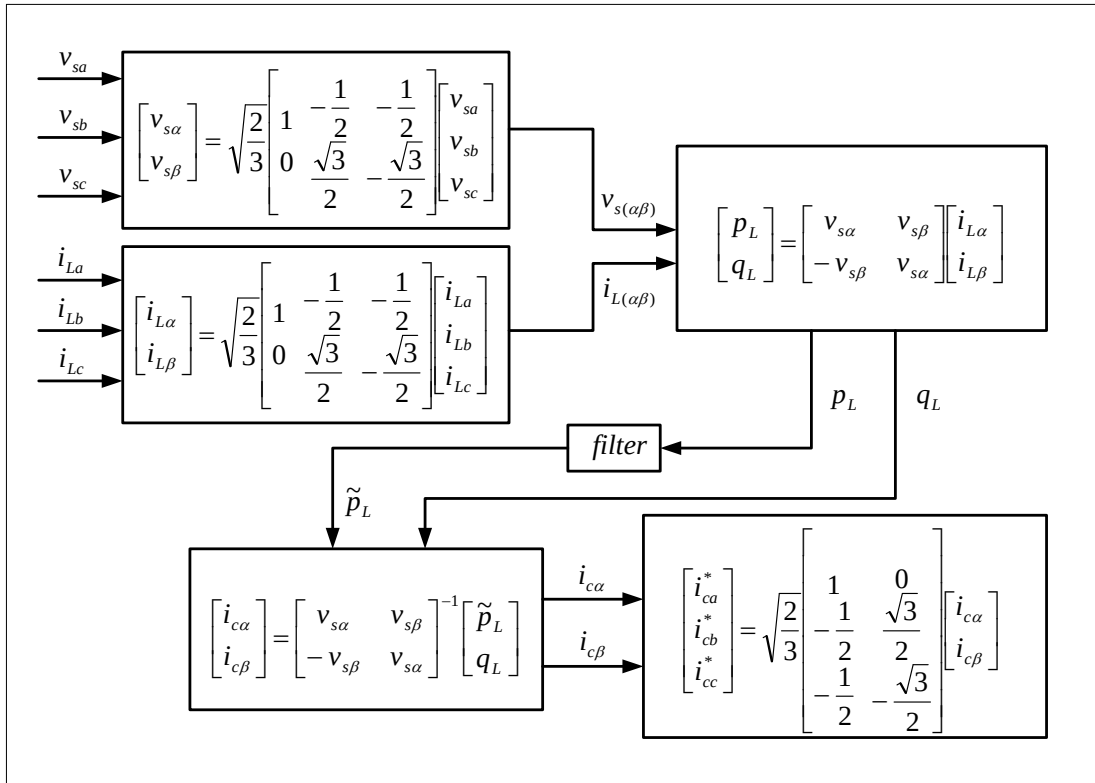
รูปที่ 3.2 แผนภาพการแปลงแกนของ Clarke

จากรูปที่ 3.2 แกนสามเฟส a b และ c จะมีเฟสผลต่าง $2\pi/3$ เรเดียน ในแต่ละแนวแกน ขณะที่แกน α และแกน β จะตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยแกน α จะขนานกับแกน a ส่วนทิศทางของแกน β จะขึ้นอยู่กับขนาดเวกเตอร์ของแรงดันและกระแสตามทิศทางหมุนของแกน abc ในแต่ละลำดับ

3.3 ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกาลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล จึงไม่พิจารณาปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน 0 ดังนั้นจึงใช้หลักการแปลงปริมาณกระแสและ

แรงดันไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ โดยใช้สมการการแปลงของ Clarke ซึ่งพิจารณาได้ตามรูปที่ 3.3 ดังนี้



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟ
ขณะหนึ่ง (Akagi, H., Watanabe, E. H., and Aredes, M., 2007)

จากรูปที่ 3.3 สูตรการคำนวณ p_L และ q_L อ้างอิงทฤษฎีจากวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟ ขณะหนึ่งที่มีการปรับปรุง (Modified p-q theory) ซึ่งกระบวนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีดังกล่าวสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนเพื่อช่วยต่อการทำความเข้าใจได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 แปลงแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย (v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}) และกระแสไฟฟ้าทางด้านโหลด (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) ไปเป็นค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ($v_{s(\alpha\beta)}, i_{L(\alpha\beta)}$) ตามสมการที่ (3.11) และ (3.12) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง (p_L) และค่ากำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (q_L) ของโหลด ตามสมการที่ (3.13)

$$\begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

โดยที่ ค่า p_L และ q_L ประกอบด้วยองค์ประกอบของปริมาณมูลฐาน ($\bar{p}_L$ และ $\bar{q}_L$) และปริมาณฮาร์มอนิก ($\tilde{p}_L$ และ $\tilde{q}_L$) ตามสมการที่ (3.14) และสมการที่ (3.15) ตามลำดับ

$$p_L = \bar{p}_L + \tilde{p}_L \quad (3.14)$$

$$q_L = \bar{q}_L + \tilde{q}_L \quad (3.15)$$

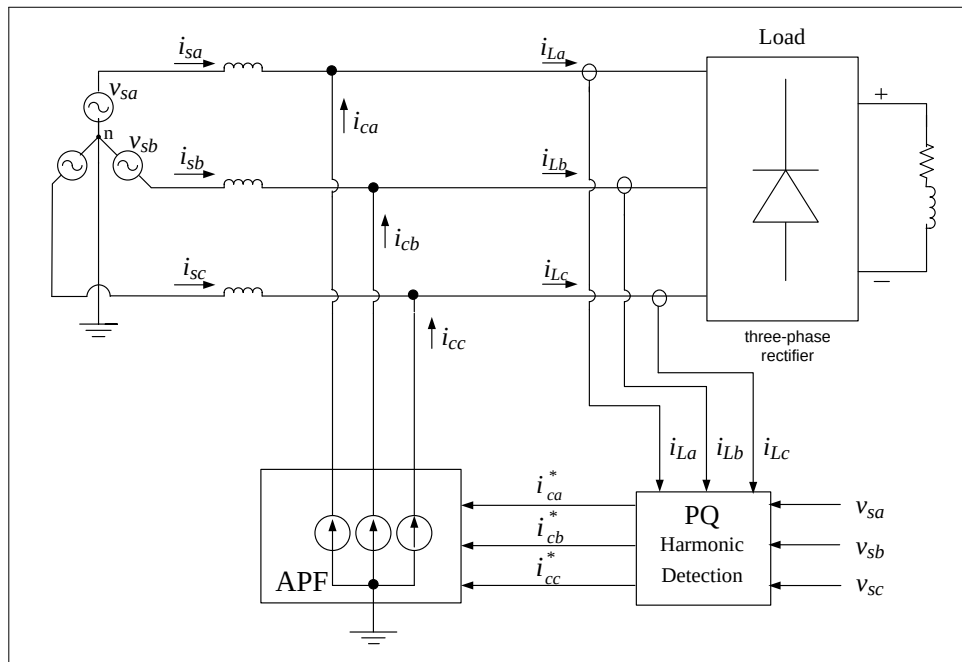
ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่ากระแสชดเชยอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ ตามสมการที่ (3.16) โดยที่ $\tilde{p}_L$ คือ ปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟขณะหนึ่งที่ได้จากการแยกออกจากกำลังแอกทีฟมูลฐาน ($\bar{p}_L$) ตามสมการที่ (3.14) เพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิก โดยการแยกปริมาณ $\tilde{p}_L$ ใช้วงจรกรอง (filter) ขณะที่ q_L จะไม่มีการแยกปริมาณใด ๆ เนื่องจากต้องการกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้แก่วงจรไปพร้อมกัน

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p}_L \\ q_L \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

ขั้นตอนที่ 4 แปลงค่ากระแสอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{c\alpha}, i_{c\beta}$) เป็นกระแสอ้างอิงสามเฟส ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) ตามสมการที่ (3.17) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

3.4 การปรับปรุงสมรรถนะของการตรวจจับฮาร์มอนิก ด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง



รูปที่ 3.4 ระบบสำหรับการตรวจสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก

การปรับปรุงสมรรถนะของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (วิธี PQ) มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับฮาร์มอนิกให้ดีขึ้น โดยที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟต้องสามารถวิเคราะห์และชดเชยได้ตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก ดังนั้นการปรับปรุงสมรรถนะของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ จึงไม่พิจารณาในส่วนของการควบคุมการวิเคราะห์และชดเชย แต่ในส่วนของการกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันจะใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติเนื่องจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติสามารถทำหน้าที่วิเคราะห์และชดเชยได้ตามกระแสอ้างอิงจากการตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งระบบสำหรับจำลองสถานการณ์ดังกล่าว พิจารณาได้ตามรูปที่ 3.4 จากรูปดังกล่าวเป็นระบบสำหรับตรวจสอบผลการตรวจจับฮาร์มอนิก ของการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟออกจากกำลังแอกทีฟมูลฐานของวิธี PQ โดยจากรูปดังกล่าวแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสต่อเข้ากับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน (R) เท่ากับ 130 Ω อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ (L) เท่ากับ 4 H โหลดไม่เป็นเชิงเส้นนี้ก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีบล็อกตรวจจับฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี PQ เพื่อตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบและคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จากนั้นบล็อกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติจะทำหน้าที่วิเคราะห์และชดเชยให้แก่ระบบซึ่งเป็นไปตามค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากบล็อกการตรวจจับ ฮาร์มอนิก โดยการปรับปรุงสมรรถนะของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ จะพิจารณาในส่วนของการกรองที่ปรากฏด้วยบล็อก filter ในรูปที่ 3.3 โดยในเบื้องต้นจะพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองได้ตามตารางที่ 3.1 ดังนี้

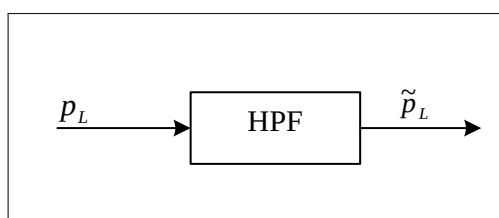
ตารางที่ 3.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองผ่านสูงและวงจรกรองผ่านต่ำชนิดบัตเตอร์เวิร์ท

อันดับที่ 1 ถึง 3

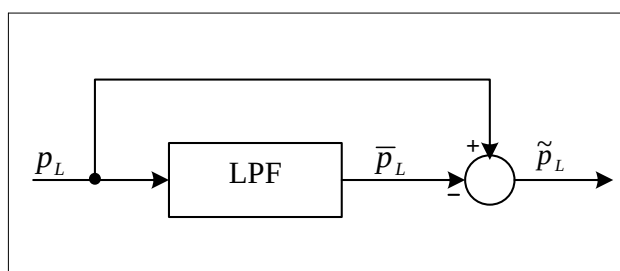
อันดับวงจรกรอง	รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอน	
	วงจรกรองผ่านสูง	วงจรกรองผ่านต่ำ
1	$\frac{s}{s + \omega_c}$	$\frac{\omega_c}{s + \omega_c}$
2	$\frac{s^2}{s^2 + \sqrt{2}\omega_c s + \omega_c^2}$	$\frac{\omega_c^2}{s^2 + \sqrt{2}\omega_c s + \omega_c^2}$
3	$\frac{s^3}{(s + \omega_c)(s^2 + \omega_c s + \omega_c^2)}$	$\frac{\omega_c^3}{(s + \omega_c)(s^2 + \omega_c s + \omega_c^2)}$

หมายเหตุ ω_c คือ ค่าความถี่ตัดเชิงมุม (rad/s) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2\pi f_c$ โดยที่ f_c คือ ค่าความถี่ตัด (Hz)

การทดสอบวงจรกรองที่ใช้สำหรับแยกปริมาณ $\tilde{p}_L$ ดังรูปที่ 3.3 มี 2 ชนิด ด้วยกัน คือ วงจรกรองผ่านสูง (High Pass Filter: HPF) และวงจรกรองผ่านต่ำ (Low Pass Filter: LPF) การทดสอบจะทดสอบที่อันดับวงจรกรองที่ 1 ถึง 3 โดยการปรับที่ค่าความถี่ต่าง ๆ ซึ่งวงจรกรองจะพิจารณาเป็นชนิดบัตเตอร์เวิร์ท โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 การแยกปริมาณฮาร์มอนิกในส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่ใช้วงจรกรองผ่านสูงและวงจรกรองผ่านต่ำจะมีรูปแบบการใช้งานดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 การแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่ใช้วงจรกรองผ่านสูง



รูปที่ 3.6 การแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่ใช้วงจรกรองผ่านต่ำ

จากรูปที่ 3.5 เป็นการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ ($\tilde{p}_L$) ออกจากกำลังแอกทีฟมูลฐาน ($\bar{p}_L$) โดยผ่านวงจรกรองผ่านสูง ซึ่งพิจารณาได้ตามสมการที่ (3.14) และจากรูปที่ 3.6 เป็นการแยกกำลังแอกทีฟมูลฐานออกจากปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟโดยผ่านวงจรกรองผ่านต่ำ โดยนำปริมาณของกำลังแอกทีฟมูลฐานมาหักลบกับกำลังแอกทีฟทั้งหมดจะได้ปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ ซึ่งพิจารณาได้จากสมการที่ (3.14) เช่นเดียวกัน ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากตารางที่ 3.1 จะนำไปทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ตั้งแต่ 2 Hz ถึง 150 Hz บนบล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ซึ่งจะจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blockset) ร่วมกับ simulink บนโปรแกรม MATLAB โดยตัวชี้วัดผลการทดสอบสมรรถนะ

การแยกปริมาณฮาร์โมนิกจะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมเฉลี่ยทั้งสามเฟส (%THD_{av}) ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชย ซึ่งมีสูตรคำนวณตามสมการที่ (3.18) และผลการทดสอบค่าความถี่ตัดต่าง ๆ ของวงจรกรองผ่านสูงและวงจรกรองผ่านต่ำ พิจารณาได้ตามตาราง ที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ

$$\%THD_{av} = \sqrt{\frac{\sum_{k=a,b,c} \%THD_k^2}{3}} \quad (3.18)$$

ตารางที่ 3.2 ค่า %THD_{av} จากการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์โมนิกของกำลังแอกทีฟ โดยใช้วงจรกรองผ่านสูง

ค่าความถี่ตัด (Hz)	อันดับของวงจรกรองผ่านสูง		
	1	2	3
2	4.1140	3.8790	3.0200
4	2.5790	1.1870	0.6040
6	1.7320	0.3719	1.7030
8	1.2800	0.5071	0.5320
10	1.0380	0.3362	0.9407
12	0.9061	0.4336	1.0530
14	0.8323	0.5447	0.8511
16	0.7915	0.6088	0.7918
18	0.7709	0.6587	0.8492
20	0.7633	0.7080	0.9323
30	0.8245	0.9661	1.3060
40	0.9588	1.2390	1.7050
50	1.1210	1.5240	2.1150
60	1.2960	1.8180	2.5310
70	1.4760	2.1170	2.9510
80	1.6570	2.4220	3.3720
90	1.8370	2.7300	3.7960
100	2.0150	3.0400	4.2200

ตารางที่ 3.2 ค่า %THD_{av} จากการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ
โดยใช้วงจรกรองผ่านสูง (ต่อ)

ค่าความถี่ตัด (Hz)	อันดับของวงจรกรองผ่านสูง		
	1	2	3
110	2.1880	3.3530	4.6460
120	2.3580	3.6670	5.0710
130	2.5220	3.9800	5.4960
140	2.6820	4.2920	5.9200
150	2.8360	4.6010	6.3420

หมายเหตุ ตัวเลขที่เป็นตัวเข้มในตารางที่ 3.2 และ 3.3 หมายถึงค่า %THD_{av} ที่น้อยที่สุดที่ได้
จากการทดสอบ

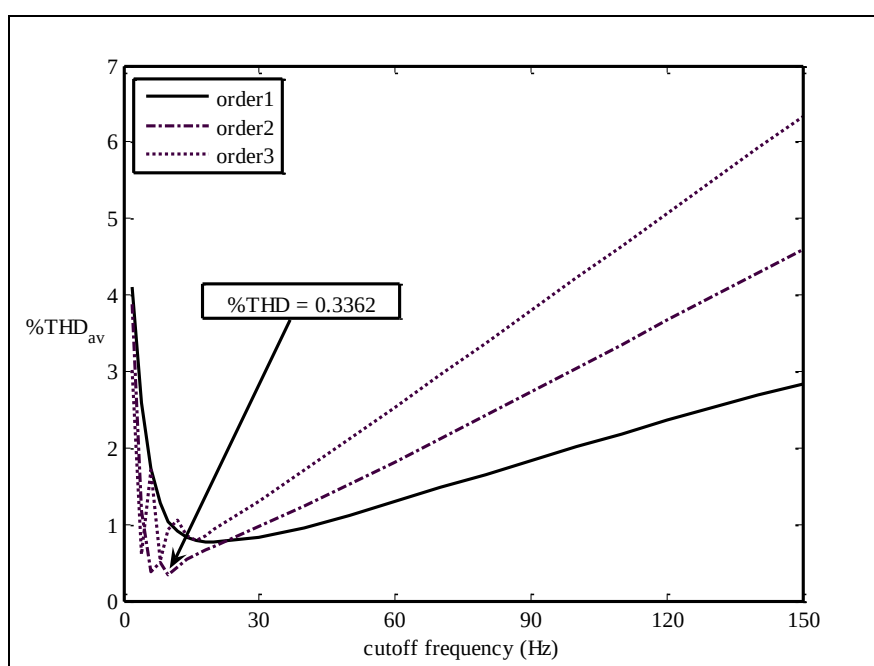
ตารางที่ 3.3 ค่า %THD_{av} จากผลการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ
โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำ

ค่าความถี่ตัด (Hz)	อันดับของวงจรกรองผ่านต่ำ		
	1	2	3
2	4.1140	9.0440	14.2100
4	2.5790	5.7510	10.1000
6	1.7320	3.1540	6.0890
8	1.2800	1.6150	2.9090
10	1.0380	0.9831	1.2090
12	0.9061	0.8246	0.8196
14	0.8323	0.8044	0.9470
16	0.7915	0.7915	1.0210
18	0.7709	0.7675	0.9614
20	0.7633	0.7415	0.8742
30	0.8245	0.6663	0.7311
40	0.9588	0.6386	0.6738
50	1.1210	0.6340	0.6443
60	1.2960	0.6480	0.6287
72	1.5130	0.6893	0.6224

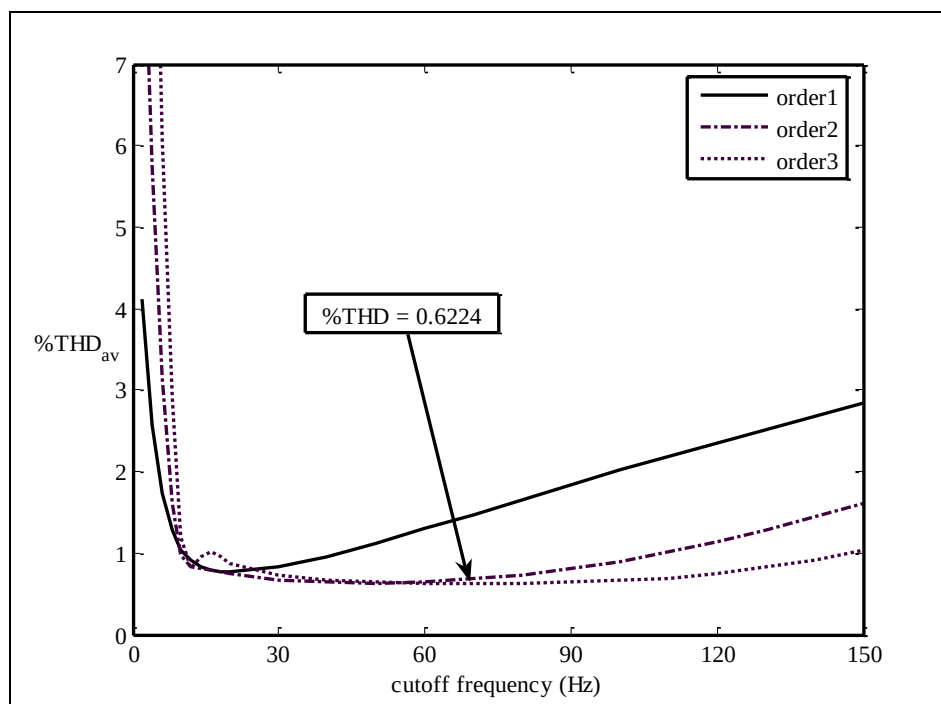
ตารางที่ 3.3 ค่า %THD_{av} จากผลการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์โมนิกของกำลังแอกทีฟ
โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำ (ต่อ)

ค่าความถี่ตัด (Hz)	อันดับของวงจรกรองผ่านต่ำ		
	1	2	3
80	1.6570	0.7325	0.6252
90	1.8370	0.8045	0.6370
100	2.0150	0.8963	0.6601
110	2.1880	1.0070	0.6968
120	2.3580	1.1350	0.7498
130	2.5220	1.2790	0.8214
140	2.6820	1.4370	0.9136
150	2.8360	1.6070	1.0280

จากตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์โมนิกของ
กำลังแอกทีฟโดยใช้วงจรกรองผ่านสูงและวงจรกรองผ่านต่ำ สามารถนำมาพิจารณาได้ตามรูปที่ 3.7
และรูปที่ 3.8 ดังนี้

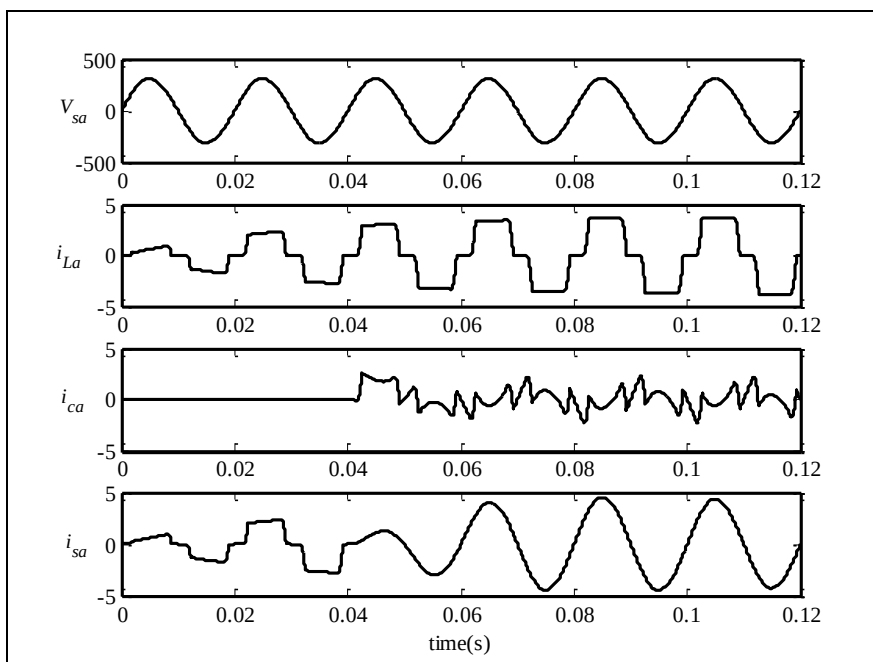


รูปที่ 3.7 ผลการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์โมนิกที่ใช้วงจรกรองผ่านสูง

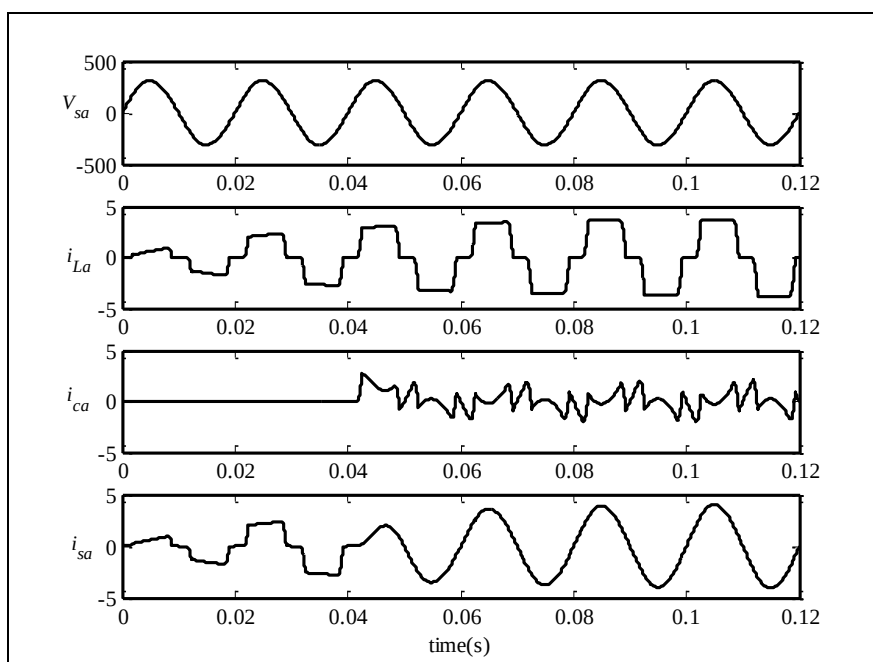


รูปที่ 3.8 ผลการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่ใช้วงจรกรองผ่านต่ำ

จากรูปที่ 3.7 ค่า $\%THD_{av}$ หลังการชดเชยที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยใช้วงจรกรองผ่านสูงอันดับที่ 2 ที่ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 10 Hz ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่า $\%THD_{av}$ น้อยที่สุดเท่ากับ 0.3362% และการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่ใช้วงจรกรองผ่านต่ำดังรูปที่ 3.8 ค่า $\%THD_{av}$ หลังการชดเชยที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยใช้วงจรกรองผ่านสูงอันดับที่ 3 ที่ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 72 Hz ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่า $\%THD_{av}$ น้อยที่สุดเท่ากับ 0.6224% ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์กรณีใช้วงจรกรองผ่านสูงและวงจรกรองผ่านต่ำในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของเฟส a ดูได้จากรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส a กรณีใช้วงจรกรองผ่านสูง
แยกปริมาณฮาร์มอนิก ($f_c = 10$ Hz)



รูปที่ 3.10 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส a กรณีใช้วงจรกรองผ่านต่ำ
แยกปริมาณฮาร์มอนิก ($f_c = 72$ Hz)

จากรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 สังเกตได้ว่า จะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ตั้งแต่เวลา 0 - 0.12 วินาที เนื่องจากที่เวลาดังกล่าวระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยที่ช่วงเวลา 0 - 0.04 วินาที ยังไม่มีการฉีดกระแสชดเชยให้แก่ระบบ ทำให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายจะเหมือนกับรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่โหลด ต่อมาที่ช่วงเวลา 0.04 - 0.12 วินาที มีการฉีดกระแสชดเชยให้แก่ระบบ ทำให้รูปสัญญาณกระแสชดเชยจริงจะเป็นไปตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก ดังนั้นรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักจึงมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น โดยจากรูปที่ 3.9 จะสังเกตได้ว่า รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_{sa}) หลังการชดเชยจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.07 วินาที เนื่องจากวงจรกรองผ่านสูงทำให้สัญญาณกระแสดังกล่าวเกิดการประวิงเวลาขึ้นในตอนแรก แต่หลังจากเวลา 0.07 วินาที รูปสัญญาณกระแส i_{sa} จะเริ่มคงที่ที่ค่ากระแสสูงสุดประมาณ 4.359 A และจากรูปที่ 3.10 รูปสัญญาณกระแส i_{sa} จะเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.1 วินาที ซึ่งหลังจากเวลา 0.1 วินาที รูปสัญญาณกระแส i_{sa} จะเริ่มคงที่ที่ค่ากระแสสูงสุดประมาณ 4.359 A เช่นกัน สำหรับค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทั้งสามเฟสของทั้งสองกรณี แสดงไว้ตามตารางที่ 3.4 ซึ่งสังเกตได้ว่าค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายเฉลี่ยทั้ง สามเฟส กรณีใช้วงจรกรองผ่านสูงในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกมีค่าน้อยกว่ากรณีใช้วงจรกรองผ่านต่ำและมีค่าเท่ากับ 0.3362% ที่ค่า $f_c = 10$ Hz จากค่าดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบกับค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายก่อนการชดเชยพบว่า ค่า %THD หลังการชดเชยมีค่าน้อย กว่ามาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการรีแอกทีฟขณะหนึ่งที่ใช้วงจรกรองผ่านสูงอันดับที่ 2 ที่ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 10 Hz ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกให้สมรรถนะดีที่สุดสำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิก

ตารางที่ 3.4 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย		
	ค่า %THD ก่อนการชดเชย	ค่า %THD หลังการชดเชย	
		กรณีใช้วงจรกรองผ่านสูงในการแยกปริมาณฮาร์มอนิก $f_c = 10$ Hz	กรณีใช้วงจรกรองผ่านต่ำในการแยกปริมาณฮาร์มอนิก $f_c = 72$ Hz
<i>a</i>	25.9803	0.3317	0.5565
<i>b</i>	26.4196	0.3380	0.6810
<i>c</i>	25.6890	0.3389	0.6235
เฉลี่ยทั้งสามเฟส	26.0296	0.3362	0.6224

3.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้ แสดงการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง หรือ วิธี PQ ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าทั้งชนิดสมดุลและไม่สมดุล หัวข้อ 3.2 จึงได้อธิบายเกี่ยวกับนิยามส่วนประกอบต่าง ๆ ของวิธี PQ เกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่ง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่ง จากนั้นในหัวข้อที่ 3.3 ได้อธิบายขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ไว้อย่างละเอียดเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ อีกทั้งมีการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ให้มีประสิทธิภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกให้ดีขึ้น โดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติในการจำลองสถานการณ์ วงจรกรองที่นำมาทดสอบในส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิกมี 2 ประเภท ด้วยกัน คือ วงจรกรองผ่านสูงและวงจรกรองผ่านต่ำชนิดบัตเตอร์เวิร์ท จากการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกพบว่า วงจรกรองผ่านสูงอันดับที่ 2 ที่ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 10 Hz ส่งผลให้ค่า %THD เหลือทั้งสามเฟสเท่ากับ 0.3362% ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้สมรรถนะในการตรวจจับฮาร์มอนิกดีที่สุด และถ้าระบบที่พิจารณาในการกำจัดฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลง เช่น โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนไป จะต้องดำเนินการทดสอบวงจรกรองในส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิกตามวิธีที่นำเสนอในบทนี้ใหม่ทั้งหมด

บทที่ 4

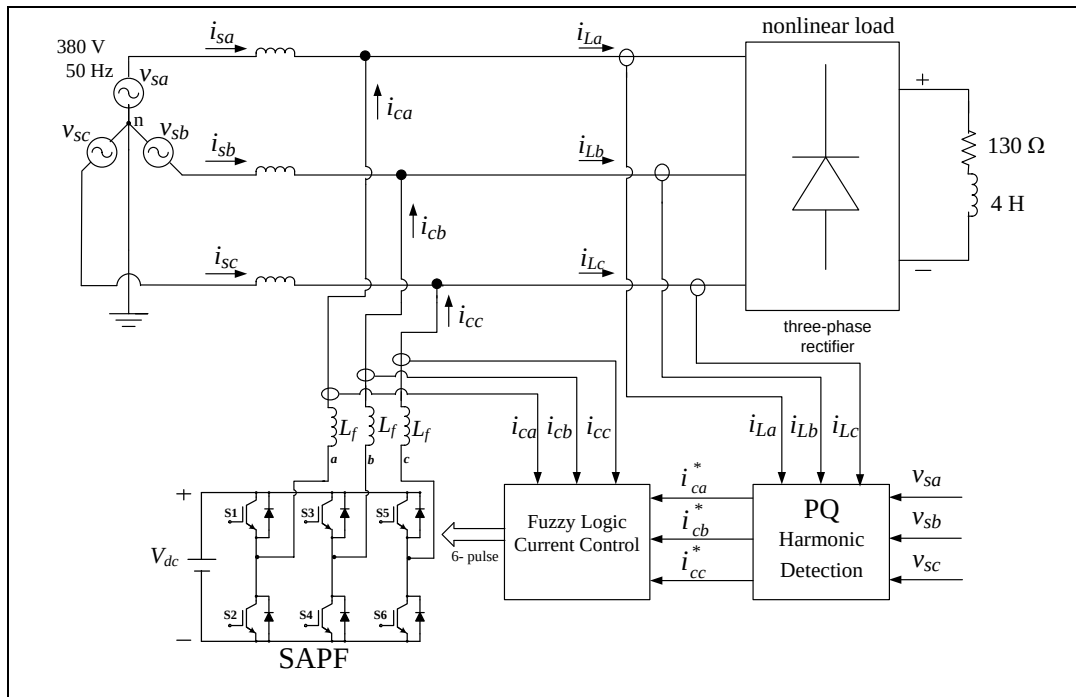
การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

4.1 บทนำ

การควบคุมการบิดกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกให้สามารถบิดกระแสชดเชยเป็นไปตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนานชนิดอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน และการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ รวมถึงใช้การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด และดีฟัซซีฟิเคชันด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเป็นสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากฟังก์ชันดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอ การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอททีฟที่ควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำของระบบ นอกจากนี้จะนำเสนอการออกแบบวงจรรอกกำลังแอททีฟที่ใช้วิธีการของ Ingram และ Round ระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย รวมทั้งผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

4.2 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอททีฟที่ควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอททีฟที่ควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจะใช้วงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนาน (SAPF) ที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ประกอบด้วยสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) จำนวน 6 ตัว เพื่อทำหน้าที่บิดกระแสชดเชยให้กับระบบ ซึ่งพิจารณาได้ตามรูปที่ 4.1 ดังนี้



รูปที่ 4.1 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

จากรูปที่ 4.1 การตรวจจับฮาร์มอนิกจะใช้วิธี PQ ที่มีการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ได้จากบทที่ 3 ซึ่งพิจารณาได้จากบล็อก PQ Harmonic Detection ส่วนบล็อก Fuzzy Logic Current Control เป็นบล็อกสำหรับใช้ควบคุมการทำงานของไอจีบีทีที่นำมาสร้างเป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้ฉีดกระแสชดเชยได้ตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ไอจีบีทีจะทำงานเป็นกึ่งและในแต่ละกึ่งจะทำงานอิสระต่อกันซึ่งพบว่า ถ้าไอจีบีทีตัวบนนำกระแส ไอจีบีทีตัวล่างจะหยุดนำกระแส จึงส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้นตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ในทำนองเดียวกันเมื่อไอจีบีทีตัวบนหยุดนำกระแส ไอจีบีทีตัวล่างจะนำกระแสแทน ส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าลดลง โดยจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ตลอดการทำงาน ซึ่งสามารถพิจารณาการฉีดกระแสชดเชยได้ตามสมการที่ (4.1) ดังนี้

$$i_{sa} = i_{La} - i_{ca} \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) พิจารณาการทำงานในกรณีเฟส a เมื่อพิจารณากรณีที่ไม่มีกรีดกระแสชดเชย (i_{ca}) ค่ากระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (i_{sa}) จะเท่ากับ ค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_{La}) ซึ่งจะมีการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ ขณะที่เมื่อทำการกรีดกระแสชดเชยดังสมการที่ (4.1) ค่ากระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักจะเท่ากับ ค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดหักลบกับค่ากระแสชดเชย จึงทำให้ค่ากระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีลักษณะรูปสัญญาณเป็นไซน์มากขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานประกอบด้วย ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) และ ค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ซึ่งการออกแบบค่าดังกล่าวจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3

4.3 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธีการของ Ingram และ Round

การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการของ Ingram และ Round ได้นำเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1997 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การออกแบบค่า L_f จะทำการเลือกค่าที่มีขนาดไม่เกินขนาดของค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f(max)}$) ซึ่งค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุดสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (4.2) ดังนี้

$$L_{f(max)} = \frac{V_{dc} - V_m}{\max(\frac{di_c^*}{dt})} \quad (4.2)$$

โดยที่ V_m คือ ค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V) ซึ่งค่า V_{dc} ควรออกแบบให้มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมอ ($V_m \approx 311 \text{ V}$) (Benchaita, Saadate, and Nia, 1999)

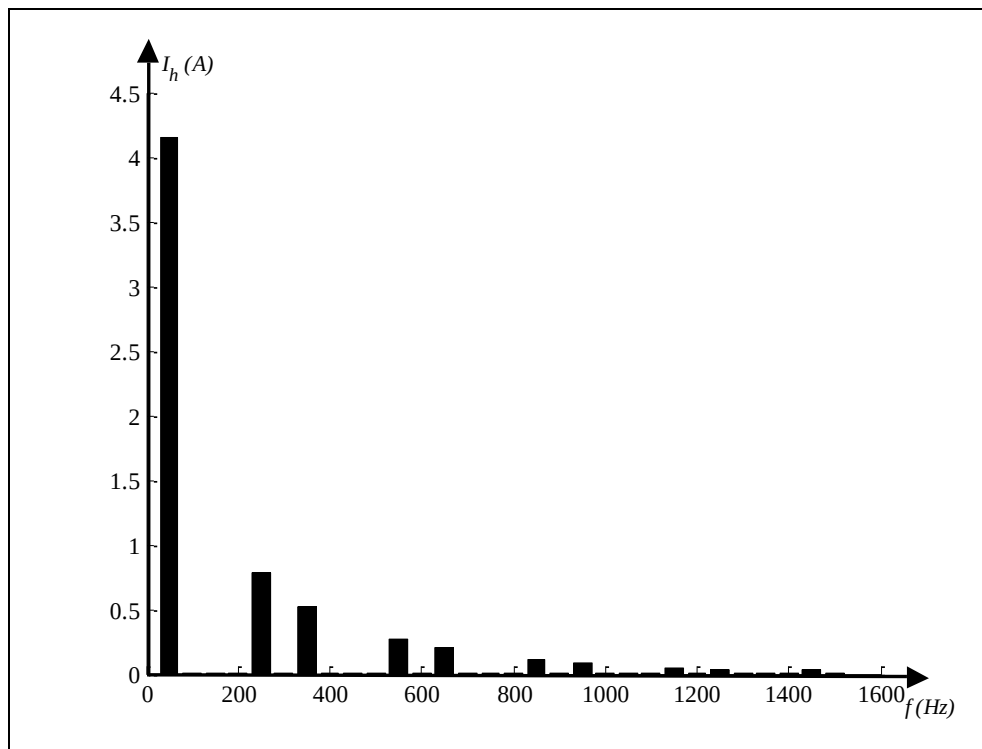
ดังนั้นจากสมการที่ (4.2) กำหนดให้ค่า V_{dc} เท่ากับ 750 V หรือประมาณ 2.4 เท่าของ V_m

จากนั้นคำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงสูงสุดเทียบกับเวลา ($\max(\frac{di_c^*}{dt})$) โดยอาศัยองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่มีขนาดกระแสมากที่สุด ($i_{h(max)}(t)$) ตามสมการที่ (4.3) และสมการที่ (4.4) ดังนี้

$$i_{h(max)}(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (4.3)$$

$$\max(\frac{di_c^*}{dt}) = A 2\pi f \quad (4.4)$$

โดยที่ A คือ แอมพลิจูดของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่มีขนาดของกระแสสูงสุด (A)
 f คือ ความถี่ของลำดับฮาร์โมนิกที่มีขนาดกระแสสูงสุด (Hz)



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมฮาร์โมนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.2 สังเกตได้ว่า กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 ($f = 250$ Hz) มีขนาดสูงสุด และค่าแอมพลิจูดของกระแสลำดับที่ 5 เท่ากับ 0.77924 A เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (4.4) จะได้ว่า

$$\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right) = 0.77924 \times 2\pi \times 250 = 122403 \text{ A/s} \quad (4.5)$$

จากนั้นทำการออกแบบค่า L_f โดยเลือกค่าที่มีขนาดไม่เกินขนาดของค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f(\max)}$) จากสมการที่ (4.2) จะได้

$$L_{f(\max)} = \frac{750 - 311}{122403} = 0.3587 \text{ H} \quad (\text{ผู้วิจัยเลือกใช้ค่า } L_f = 0.039 \text{ H}) \quad (4.6)$$

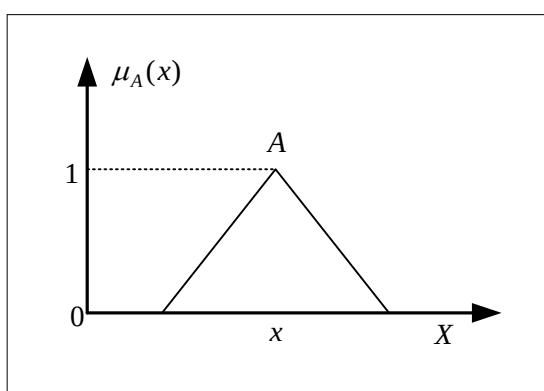
จากการคำนวณข้างต้นค่า V_{dc} ของวงจรกรองต้องมากกว่า 1.5 เท่าของค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และค่า L_f มีค่าสูงสุดได้ไม่เกิน 0.3587 H ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้อ้างถึงงานวิจัยวิทยานิพนธ์ของ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ (2553) ที่ออกแบบค่าดังกล่าว ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว โดยมีการยืนยันผลการออกแบบว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว จะส่งผลให้สมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองดีที่สุด ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้ค่า V_{dc} เท่ากับ 750 V และ L_f เท่ากับ 0.039 H ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับที่งานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวได้ออกแบบไว้

4.4 ระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

การควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (fuzzy logic controller) เกิดขึ้นจากแนวความคิดของ Lotfi A. Zadeh เมื่อปี ค.ศ. 1965 เป็นวิธีการควบคุมแบบชาญฉลาดที่อาศัยข้อมูลความรู้และประสบการณ์การทำงานของมนุษย์เป็นพื้นฐานในการควบคุม โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำของระบบ เหมาะสำหรับระบบที่มีความซับซ้อน หรือ คลุมเครือ มีความไม่เป็นเชิงเส้น และหลายอินพุตได้เป็นอย่างดี ซึ่งในหัวข้อนี้ได้นำเสนอทฤษฎีฟัซซีเซต ตัวแปรแบบฟัซซีและตัวแปรทางภาษา โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก กฎของฟัซซี การอนุมานแบบฟัซซีลอจิก และการดีฟัซซีฟิเคชัน

4.4.1 ทฤษฎีฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต คือ กลุ่มของสิ่งของหรือวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงของสมาชิกในเซตอย่างค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ μ แทนค่าความเป็นสมาชิกภาพของเซตใด ๆ ที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ ในช่วง 0 ถึง 1 ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ฟังก์ชันแสดงความความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A

จากรูปที่ 4.3 สังเกตได้ว่า ค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพ x จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากค่า 0 จนกระทั่งระดับความเป็นสมาชิกภาพ x เท่ากับ 1 จากนั้นค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพจะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าเท่ากับ 0 โดยฟังก์ชันเซต A อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ X ซึ่งค่าความเป็นสมาชิกภาพของสมาชิก x ในเอกภพสัมพัทธ์ สามารถแทนได้ด้วย $\mu_A(x)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของเซต A ตามสมการที่ (4.7) ดังนี้

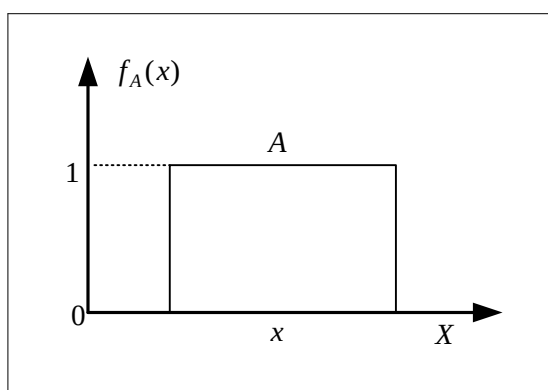
$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (4.7)$$

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

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

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

จากทฤษฎีฟังก์ชันเซตสังเกตได้ว่า ระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟังก์ชันจะมีลักษณะค่อยเป็นค่อยไปซึ่งมีความแตกต่างไปจากเซตปกติธรรมดาที่ให้ค่าความเป็นสมาชิกภาพมีเพียงค่า 0 กับ 1 เท่านั้น ซึ่งค่า 0 หมายถึง การไม่เป็นสมาชิกในเซต A และ 1 หมายถึง การเป็นสมาชิกในเซต A โดยสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.4 ดังนี้



รูปที่ 4.4 ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของเซตปกติธรรมดา

จากรูปที่ 4.4 เซตปกติธรรมดา A มีสมาชิกเป็น x ซึ่งอยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ X สามารถแทนได้ด้วย $f_A(x)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของ x ในเซต A ตามสมการที่ (4.8) ดังนี้

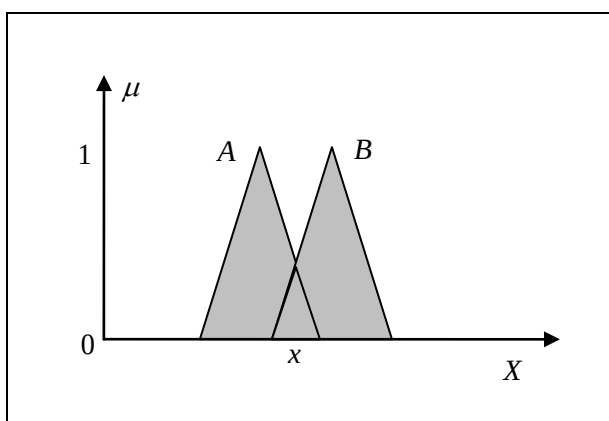
$$f_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (4.8)$$

โดยที่ $f_A(x)=1$ เมื่อ x เป็นสมาชิกของ A อย่างสมบูรณ์

$f_A(x)=0$ เมื่อ x ไม่เป็นสมาชิกของ A

ตัวดำเนินการ (operator) ในทฤษฎีเซตของเซตแบบปกติธรรมดาและฟัซซีเซตมีความหมายเหมือนกัน แต่ให้ค่าเชิงตัวเลขที่แตกต่างกัน สำหรับเซตแบบปกติธรรมดาตัวดำเนินการจะให้ผลว่าตัวแปรอยู่หรือไม่อยู่ในเซตอย่างไร แต่สำหรับฟัซซีเซตตัวดำเนินการจะให้ผลว่าตัวแปรอยู่ในเซตนั้น ๆ ด้วยระดับความเป็นสมาชิกเท่าไร โดยตัวดำเนินการในทฤษฎีเซตคือ ยูเนียน (union) อินเตอร์เซกชัน (intersection) และส่วนเติมเต็ม (complement) ซึ่งจะกำหนดให้ฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B อยู่บนเอกภพสัมพัทธ์ X และมีคุณสมบัติดังนี้

- ยูเนียน ของฟัซซีเซตดังรูปที่ 4.5 จะสังเกตได้ว่าฟัซซีเซต A ยูเนียนกับฟัซซีเซต B จะได้เซตซึ่งประกอบไปด้วยสมาชิกที่เป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B ซึ่งสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (4.9)



รูปที่ 4.5 การยูเนียนของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B

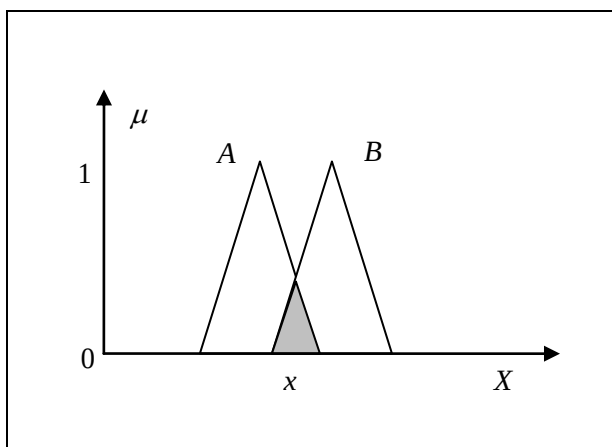
$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.9)$$

โดยที่ $\vee$ หมายถึง การหาค่า maximum

จากสมการที่ (4.9) แสดงว่า ค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพที่ได้จากระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A ยูเนียนกับฟัซซีเซต B ผลลัพธ์ที่ได้จะพิจารณาจากค่ามากที่สุดของค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A เทียบกับฟัซซีเซต B เช่น ถ้า a และ b เป็นจำนวนจริง จะเป็นไปตามสมการที่ (4.10) ดังนี้

$$a \vee b = \max(a, b) = \begin{cases} a ; & a \geq b \\ b ; & a < b \end{cases} \quad (4.10)$$

- อินเตอร์เซกชัน ของฟัซซีเซตตามรูปที่ 4.6 สังเกตได้ว่าฟัซซีเซต A อินเตอร์เซกชันกับฟัซซีเซต B จะได้เซตซึ่งประกอบไปด้วยสมาชิกที่เหมือนกันของทั้งฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B ซึ่งสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (4.11)



รูปที่ 4.6 การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.11)$$

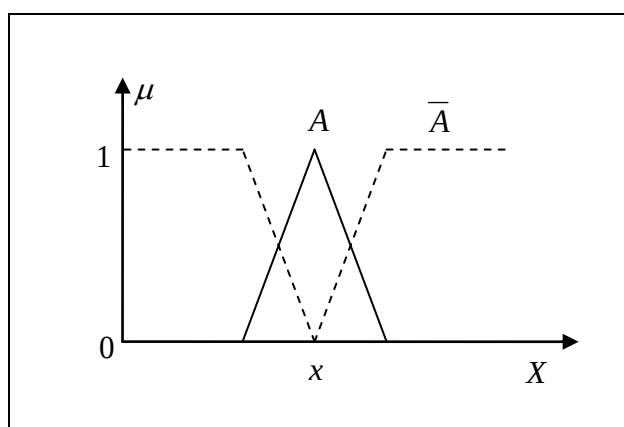
โดยที่ $\wedge$ หมายถึง การหาค่า minimum

จากสมการที่ (4.11) แสดงว่า ค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพที่ได้จากระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A อินเตอร์เซกชันกับฟัซซีเซต B ผลลัพธ์ที่ได้จะพิจารณาจากค่า

น้อยสุดของค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A เทียบกับฟัซซีเซต B เช่น ถ้า a และ b เป็นจำนวนจริงจะเป็นไปตามสมการที่ (4.12) ดังนี้

$$a \wedge b = \min(a, b) = \begin{cases} a ; & a \leq b \\ b ; & b < a \end{cases} \quad (4.12)$$

- ส่วนเติมเต็ม ของฟัซซีเซตดังรูปที่ 4.7 สังเกตได้ว่าฟัซซีเซต A ใดๆ จะอยู่ใน เอกภพสัมพัทธ์ X ซึ่งส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A คือ เซตที่ประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นสมาชิกของ X แต่ไม่เป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A ซึ่งสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (4.13)



รูปที่ 4.7 ส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A

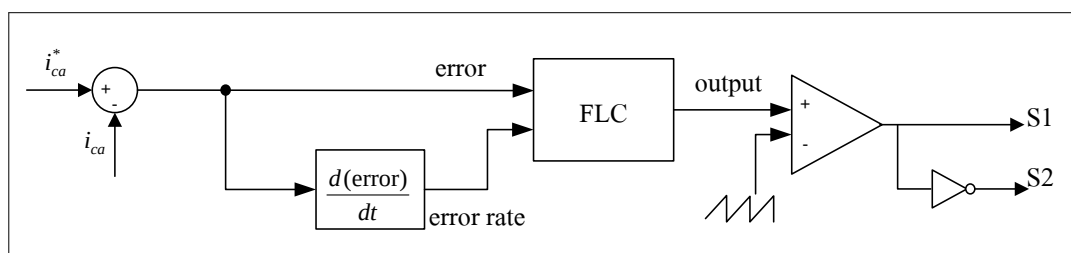
$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.13)$$

จากสมการที่ (4.13) จะพบว่าค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพที่ได้จากส่วนเติมเต็มของระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A จะเท่ากับผลต่างของค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพเท่ากับ 1 กับค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A

4.4.2 ตัวแปรแบบฟัซซีและตัวแปรทางภาษา

ฟัซซีเซตมีรากฐานการกำเนิดมาจากความเชื่อที่ว่า ความคิดอ่านของมนุษย์มิได้ มีตรรกพื้นฐานเป็นแบบ “0” หรือ “1” หรือมิได้เป็นกลไกการคิดแบบตัวเลข แต่ความคิดอ่านของมนุษย์เป็นความสามารถพิเศษในการรวมประเด็นข่าวสารจากกลุ่มข้อมูลขนาดเล็กไปจนขนาดใหญ่ ขึ้นกับความสามารถเฉพาะตนของมนุษย์ ดังนั้นความสามารถของมนุษย์ในการสรุปประเด็นที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนจะแสดงออกมาได้อย่างเด่นชัดด้วยการอธิบายด้วยภาษาของมนุษย์ ตามธรรมชาติและในหลาย ๆ กรณีการอธิบายความหมายด้วยภาษาพูดหรือเขียนจะเป็นที่เข้าใจได้ ดีกว่าการแสดงด้วยตัวเลข

ตัวแปรทางภาษา (linguistic variables) หมายถึงตัวแปรที่มีการให้ค่าเป็นคำหรือประโยค เช่น “อายุ” ถือว่าเป็นตัวแปรทางภาษา การให้ค่าแก่อายุอาจเป็น “เด็ก” “หนุ่มสาว” “แก่” เป็นต้น และเมื่อพิจารณาคำว่า “สี” ของวัตถุเป็นตัวแปร สีอาจได้รับการให้ค่าเป็น “แดง” “เหลือง” “เขียว” เป็นต้น คำว่า แดง เหลือง เหล่านี้เรียกว่า ค่าให้ค่าของฟัซซีสับเซตของเอกภพสัมพัทธ์ของสิ่งของที่เราสงใจ โดยที่ฟัซซีสับเซตของคำว่า สี หมายถึงคำว่า แดง เหลือง เขียว ทุกคำต้องเป็นสมาชิกของคำว่า “สี” ขณะที่คำว่า สี เป็นคำบ่งบอกลักษณะของสิ่งของนั้น ถือว่าเป็นตัวแปรแบบฟัซซี (fuzzy variables) ซึ่งมีค่าตามค่าให้ค่าของฟัซซีสับเซต และอาจเรียกค่าเช่น สี นี้ว่าเป็นตัวแปรทางภาษา ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ตัวแปรทางภาษา และตัวแปรแบบฟัซซีหมายถึงสิ่งเดียวกัน ซึ่งในระบบทางภาษา นอกจากตัวแปรทางภาษาและค่าให้ค่าแล้วยังมีค่าขยายเสริมความ เช่น มาก ก่อนข้าง เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้น ขอยกตัวอย่างการกำหนดตัวแปรทางภาษาของระบบดังรูปที่ 4.1 ในส่วนของการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 4.8 ดังนี้



รูปที่ 4.8 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก
ร่วมกับพีดีบีลยูเอ็ม

จากรูปที่ 4.8 แสดงการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิกกรณีเฟส a โดยจะรับค่ากระแสอ้างอิง (i_{ca}^*) และค่ากระแสชดเชยจริง (i_{ca}) ซึ่งผลต่างระหว่างค่ากระแสอ้างอิงกับค่ากระแสชดเชยจริง คือ ค่าความผิดพลาด (error) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด (error rate) ซึ่งเป็นสัญญาณทางด้านอินพุตของตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิกสามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ (4.14) และสมการที่ (4.15) จากนั้นนำอินพุตดังกล่าวผ่านบล็อกควบคุมแบบพีชชีลอจิก และเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิกจะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ (carrier signal) ด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อให้ได้สัญญาณ S1 และ S2 ไปควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่อไป

$$\text{error} = i_c^* - i_c \quad (4.14)$$

$$\text{error rate} = \frac{d(\text{error})}{dt} \quad (4.15)$$

ค่าความผิดพลาด อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด และเอาต์พุตจะถูกกำหนดด้วยตัวแปรทางภาษา และค่าทางภาษา ตามตารางที่ 4.1 ได้ดังนี้

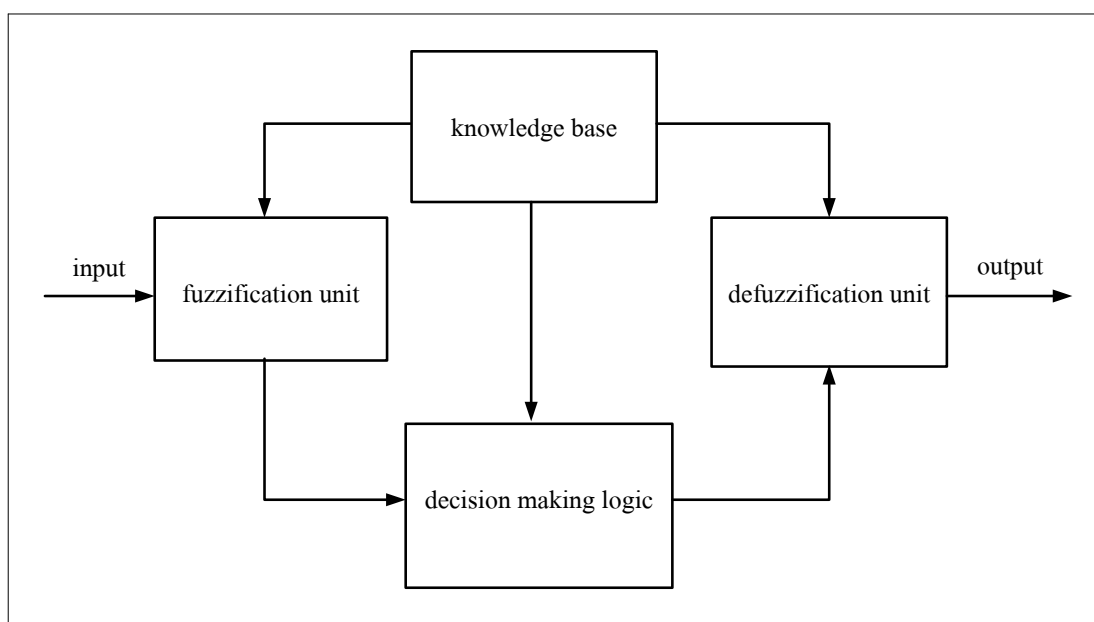
ตารางที่ 4.1 ตัวแปรทางภาษา และค่าทางภาษา

ระบบ	ชื่อตัวแปร	ความหมาย	ค่าตัวแปร	ความหมาย
อินพุต	error	ค่าความผิดพลาด	<i>neg</i> (negative) <i>zero</i> <i>pos</i> (positive)	ลบ ($i_c^* < i_c$) ศูนย์ ($i_c^* = i_c$) บวก ($i_c^* > i_c$)
	error rate	อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด	<i>neg_rate</i> <i>zero_rate</i> <i>pos_rate</i>	ลดลง ไม่เปลี่ยนแปลง เพิ่มขึ้น
เอาต์พุต	output	ระดับแรงดันไฟฟ้า	<i>dec</i> <i>cons</i> <i>inc</i>	ลดลง คงที่ เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาอินพุตค่าความผิดพลาดเป็นตัวแปรทางภาษาจะให้ค่าความผิดพลาดเป็น “ลบ” “ศูนย์” “บวก” เช่น ค่าความผิดพลาดเป็นลบ หมายถึงค่ากระแสอ้างอิงน้อยกว่าค่ากระแสเซตจริง และเมื่อพิจารณาอินพุตเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด จะให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดเป็น “ลดลง” “ไม่เปลี่ยนแปลง” “เพิ่มขึ้น” และเอาต์พุตเป็นระดับแรงดันไฟฟ้า จะให้ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเป็น “ลดลง” “คงที่” “เพิ่มขึ้น”

4.4.3 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

โครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน คือ ชุดปฏิบัติการฟัซซีฟิเคชัน (fuzzification unit) ฐานความรู้ (knowledge base) ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ (decision making logic) และชุดปฏิบัติการดีฟัซซีฟิเคชัน (defuzzification unit) ซึ่งพิจารณาได้ตามรูปที่ 4.9 ดังนี้



รูปที่ 4.9 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

- ชุดปฏิบัติการฟัซซีฟิเคชัน จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลอินพุตแบบธรรมดา คือ ค่ากระแสเซตที่มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A) ให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรทางภาษาหรือตัวแปรแบบฟัซซีคือ ค่าความผิดพลาดของกระแสเซตอ้างอิงกับกระแสเซตจริง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด

- **ฐานความรู้** เป็นส่วนที่จัดเก็บรวบรวมข้อมูลในการควบคุมของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ฐานกฎ (rule base) และฐานข้อมูล (data base) ในส่วนของฐานกฎนั้นจะกำหนดวิธีการควบคุมโดยผู้เข้าใจระบบในรูปแบบของตัวแปรทางภาษา ส่วนฐานข้อมูลนั้นจะเป็นการจัดเตรียมส่วนที่จำเป็นเพื่อใช้ในการกำหนดกฎการควบคุม

- **ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ** หรือ เครื่องอนุมาน (inference engine) เป็นส่วนที่ใช้การเลียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์ทำหน้าที่ตรวจสอบกฎเพื่อตีความหาเหตุผล โดยอาศัยแนวทฤษฎีคณิตศาสตร์ และการอนุมานแบบฟัซซี

- **ชุดปฏิบัติการตีฟัซซีฟิเคชัน** มีหน้าที่แปลงข้อมูลแบบฟัซซีคือ ระดับแรงดันไฟฟ้าไปเป็นข้อมูลแบบธรรมดา คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V) เพื่อให้ระบบที่ควบคุมเข้าใจสัญญาณดังกล่าว

4.4.4 กฎของฟัซซี

กฎของฟัซซีเป็นวิธีการนำเอาความรู้ของมนุษย์มาใส่ในระบบฟัซซีลอจิกที่มีลักษณะเป็นประโยคเงื่อนไข ถ้า... แล้ว... (IF... THEN...) ซึ่งประกอบด้วยส่วนของตัวแปรเงื่อนไข และส่วนของตัวแปรผลลัพธ์ โดยในแต่ละส่วนอาจมีหลายตัวแปรด้วยกัน ดังนั้นจึงเชื่อมประโยคด้วยปฏิบัติการทางเซต AND หรือ OR เพื่อแก้ปัญหาสำหรับระบบควบคุมหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (Multiple – Input and Multiple – Output: MIMO) โดยการกำหนดกฎของฟัซซีจะต้องอาศัยความรู้ความชำนาญ และประสบการณ์ของมนุษย์เพื่อควบคุมระบบ ตัวอย่างจากระบบการควบคุมการฉีดกระแสน้ำดังรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณาระบบควบคุมดังกล่าวเพียงอินพุตเดียว ค่าของตัวแปรความผิดพลาดที่เป็นไปได้ คือ {‘ลบ’ ‘ศูนย์’ ‘บวก’} ดังนั้นส่วนเงื่อนไขในกฎของฟัซซีจะพิจารณาได้ดังนี้

Rule 1: IF error is *neg* THEN output is *dec*

Rule 2: IF error is *zero* THEN output is *cons*

Rule 3: IF error is *pos* THEN output is *inc*

หรือ

กฎ 1: ถ้า ค่าความผิดพลาด เท่ากับ ลบ แล้ว เอาต์พุต เป็น ระดับแรงดันไฟฟ้าลดลง

กฎ 2: ถ้า ค่าความผิดพลาด เท่ากับ ศูนย์ แล้ว เอาต์พุต เป็น ระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่

กฎ 3: ถ้า ค่าความผิดพลาด เท่ากับ บวก แล้ว เอาต์พุต

เป็น ระดับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

กฎของฟัซซีประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วน IF และส่วน THEN ตามทฤษฎีแบบดั้งเดิม เมื่อค่าเงื่อนไขใน IF เป็นจริง ส่วน THEN จะถูกประเมิน แต่ในทางทฤษฎีของฟัซซี ค่า

เงื่อนไขใน IF จะมีความเป็นฟัซซีในระดับหนึ่ง ส่วน THEN จะถูกประเมินค่าด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพ ซึ่งจะให้ค่าที่สัมพันธ์ในระดับนั้น ๆ ด้วยค่าเงื่อนไขในส่วนของ IF ซึ่งสามารถมีได้หลายค่าเช่นเดียวกับส่วนของ THEN ดังรูปแบบต่อไปนี้

IF x is A AND y is B OR z is C
 THEN p is D
 q is E

จากรูปแบบเงื่อนไขข้างต้น จะพบว่าทุกเงื่อนไขในส่วนของ IF จะถูกประเมินไปพร้อม ๆ กัน และรวมกันด้วยปฏิบัติการทางเซต เช่น AND หรือ OR โดยปกติแล้วจะจำกัดจำนวนค่าเงื่อนไขในระบบไม่ให้มีมากเกินไป โดยการเลือกใช้กฎที่จำเป็นเท่านั้นเพราะจะทำให้เพิ่มความยุ่งยากในการออกแบบกฎของฟัซซีในภายหลัง ซึ่งจำนวนเงื่อนไขดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรทางภาษาภายในระบบ จากระบบในรูปแบบที่ 4.8 ค่าของความผิดพลาดเป็นไปได้ 3 แบบ คือ {"ลบ" "ศูนย์" "บวก"} สามารถมีเงื่อนไขต่าง ๆ ได้ทั้งหมด 9 แบบ โดยจะพิจารณาระบบควบคุมการฉีดกระแสดะชยที่มี 2 อินพุต ได้แก่ error และ error rate และ 1 เอาต์พุต คือ output ซึ่งการออกแบบกฎของฟัซซีของตัวแปรทั้งสามพิจารณาได้ดังนี้

กฎข้อที่ 1	IF	error = neg	AND	error rate = neg_rate	THEN	output = dec
กฎข้อที่ 2	IF	error = neg	AND	error rate = zero_rate	THEN	output = dec
กฎข้อที่ 3	IF	error = neg	AND	error rate = pos_rate	THEN	output = dec
กฎข้อที่ 4	IF	error = zero	AND	error rate = neg_rate	THEN	output = dec
กฎข้อที่ 5	IF	error = zero	AND	error rate = zero_rate	THEN	output = cons
กฎข้อที่ 6	IF	error = zero	AND	error rate = pos_rate	THEN	output = inc
กฎข้อที่ 7	IF	error = pos	AND	error rate = neg_rate	THEN	output = inc
กฎข้อที่ 8	IF	error = pos	AND	error rate = zero_rate	THEN	output = inc
กฎข้อที่ 9	IF	error = pos	AND	error rate = pos_rate	THEN	output = inc

จากกฎการควบคุมดังกล่าว จะนำเสนอกฎข้อที่ 1 กฎข้อที่ 5 และกฎข้อที่ 7 ในการอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

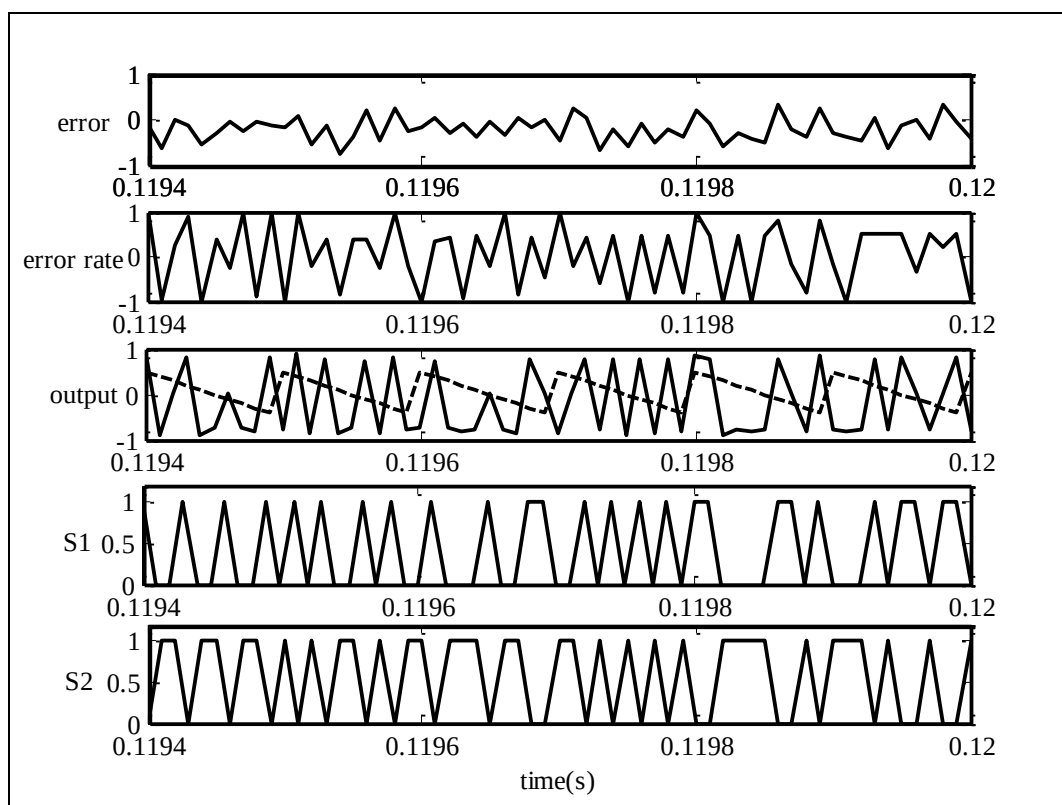
จากกฎข้อที่ 1 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ neg ค่า error rate อยู่ในเซตของ neg_rate และค่า output จะอยู่ในเซตของ dec หมายความว่าค่ากระแสอ้างอิง (i_c^*) น้อยกว่าค่ากระแสชยจริง (i_c) ดังนั้นเอาต์พุตจึงต้องลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงจึงส่งผลให้สัญญาณความกว้างพัลส์ลดลง

จากกฎข้อที่ 5 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ zero ค่า error rate อยู่ในเซตของ zero_rate และค่า output จะอยู่ในเซตของ cons หมายความว่าค่ากระแสอ้างอิง (i_c^*) เท่ากับ

ค่ากระแสชดเชยจริง (i_c) ดังนั้นเอาต์พุตจึงต้องมีระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ และส่งผลให้สัญญาณความกว้างพัลส์คงที่ด้วยเช่นกัน

จากกฎข้อที่ 9 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ pos ค่า error rate อยู่ในเซตของ pos_rate และค่า output จะอยู่ในเซตของ inc หมายความว่าค่ากระแสอ้างอิง (i_c^*) มากกว่าค่ากระแสชดเชยจริง (i_c) ดังนั้นเอาต์พุตจึงต้องเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า และส่งผลให้สัญญาณความกว้างพัลส์เพิ่มขึ้นด้วย

จากการออกแบบกฎดังกล่าวทั้ง 9 ข้อ สามารถพิจารณาลักษณะสัญญาณการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกได้ดังรูปที่ 4.10 ดังนี้



รูปที่ 4.10 ลักษณะสัญญาณของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

จากรูปที่ 4.10 จะนำเสนอการอธิบายกรณีที่รูปสัญญาณของค่า error มีค่าเป็นลบ และค่า error rate มีค่าลดลง จะส่งผลให้ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตลดลงซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 1 จากนั้นนำสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ ถ้าระดับแรงดันไฟฟ้ามากกว่าระดับสัญญาณพาหะสวิทช์ S1 จะทำงาน ในขณะที่สวิทช์ S2 จะไม่ทำงาน ในทำนองเดียวกัน

ถ้าระดับแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าระดับสัญญาณพาหะสวิตช์ S1 จะไม่ทำงาน ในขณะที่สวิตช์ S2 จะทำงาน

จากกฎดังกล่าวทั้ง 9 ข้อ สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางภาษา และค่าทางภาษาในรูปแบบเมตริกซ์ได้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจากกรุปดังกล่าว ระบบควบคุมการฉีดกระแส ชดเชยที่มี 2 อินพุต และ 1 เอาต์พุต สามารถใช้เมตริกซ์ 3×3 แทนกฎทั้ง 9 ข้อ ซึ่งรูปแบบการแสดงผล กฎของฟัซซีด้วยเมตริกซ์ดังกล่าว เรียกว่า หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ (Fuzzy associative memory: FAM) โดยระบบที่มี 3 อินพุต ตัวแปรอินพุตแต่ละตัวมีค่าเชิงภาษา M N และ K ดังนั้น FAM ของระบบจะอยู่ในรูปของเมตริกซ์ $M \times N \times K$ เช่น ถ้าแต่ละตัวแปรมีค่าเชิงภาษา 3 ค่า ขนาดของ เมตริกซ์จะเท่ากับ $3 \times 3 \times 3$ จำนวน กฎของฟัซซีจะสามารถแสดงได้เท่ากับ 27 กฎ

		error		
		neg	zero	pos
error rate	neg_rate	dec	dec	inc
	zero_rate	dec	cons	inc
	pos_rate	dec	inc	inc

รูปที่ 4.11 กฎเมตริกซ์ (FAM)

4.4.5 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ

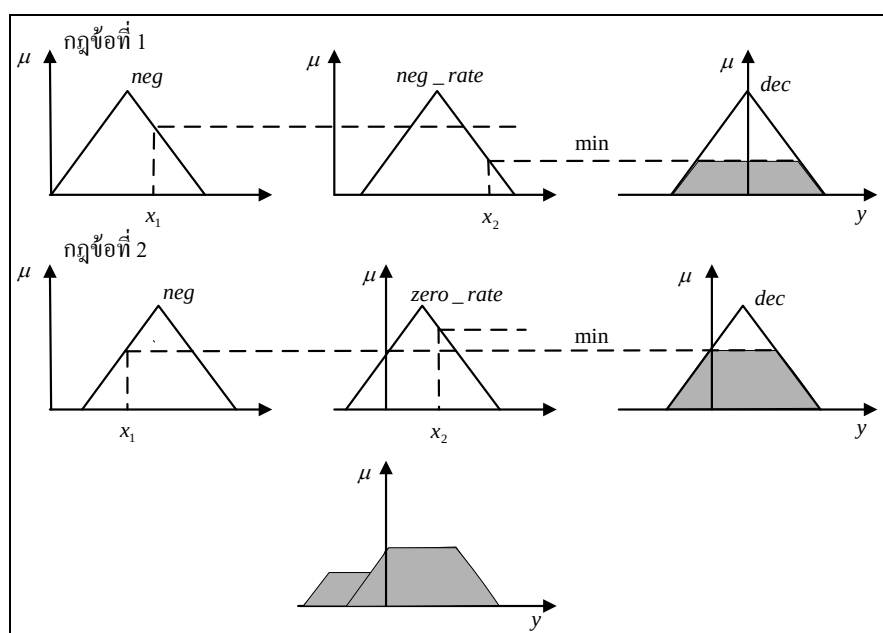
การอนุมาน คือ การกำหนดส่วนผลลัพธ์ในกฎของฟัซซี โดยใช้หลักการของ ทฤษฎีเซต การอนุมานฟัซซีมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี คือ แบบแมมดานิ (Mamdani) แบบ TSK (Takagi - Sugeno - Kang) และแบบ Tsukamoto (Ross, 1995) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การอนุมาน ฟัซซีแบบแมมดานิ (Mamdani) เนื่องจากระบบสำหรับการควบคุมไม่มีความซับซ้อนทางด้าน อินพุตและเอาต์พุต อีกทั้งยังง่ายต่อการนำไปใช้งานซึ่งรายละเอียดของการอนุมานฟัซซีแบบ แมมดานินี้ดังนี้

การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ (Mamdani - style inference) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมนมากที่สุด ซึ่งวิธีการอนุมานนี้ได้ถูกนำเสนอในปี 1975 โดยศาสตราจารย์ Ebrahim Mamdani ซึ่งใช้ตัวแปรทางภาษาทั้งส่วนเงื่อนไข และส่วนผลลัพธ์ โดยการอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ มี 2 อินพุต คือ x_1 และ x_2 และมีเอาต์พุตค่าเดียว คือ y ซึ่งจะมีรูปแบบตามสมการที่ (4.16) ดังนี้

$$\text{IF } x_1 \text{ is } A_{k1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{k2} \text{ THEN } y \text{ is } B_k \quad \text{เมื่อ } k=1, 2, \dots, r \quad (4.16)$$

โดยที่ A_{k1} และ A_{k2} คือ จำนวน k ฟัซซีเซตในส่วนเงื่อนไข และ B_k คือ จำนวน k ฟัซซีเซตในส่วนผลลัพธ์ ซึ่งการอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีการอนุมานแบบค่าสูงสุด - ต่ำสุด (Max - Min Inference) และวิธีการอนุมานแบบค่าสูงสุด - ผลคูณ (Max - Product Inference) ซึ่งในการวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด เนื่องจากเป็นวิธีที่เร็วและง่ายสำหรับการคำนวณ ตัวอย่างเช่น ระบบดังรูปที่ 4.8 ที่มี 2 อินพุต และ 1 เอาต์พุต โดยสมมติว่ากฎข้อที่ 1 และกฎข้อที่ 2 ถูกนำไปประเมินผลจะสามารถอธิบายวิธีการอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิได้ดังต่อไปนี้

- วิธีการอนุมานแบบค่าสูงสุด - ต่ำสุด (Max - Min Inference: MMI)



รูปที่ 4.12 การอนุมานแบบแมมดานิที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด

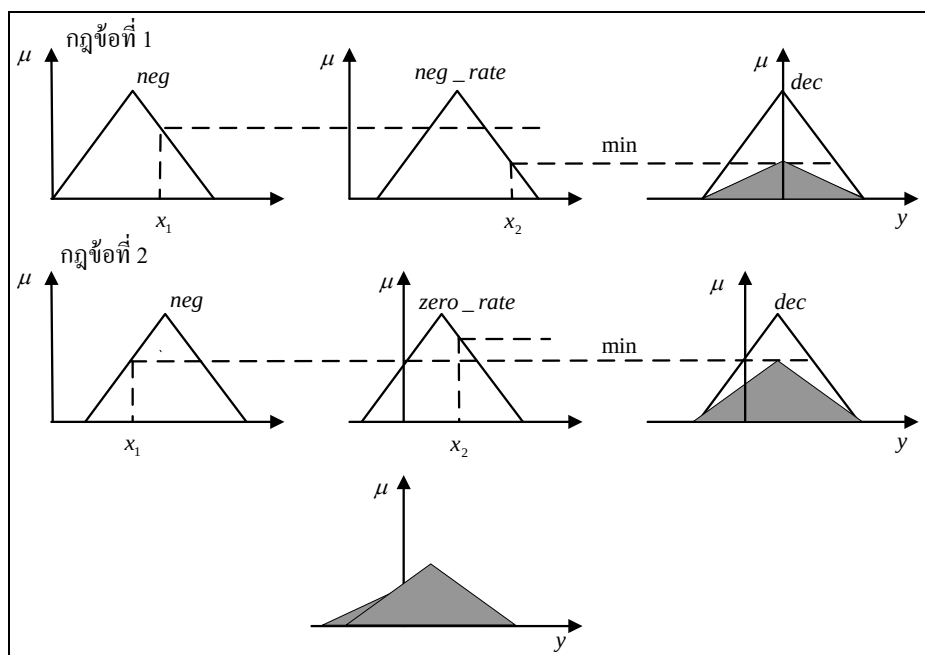
วิธีการอนุมานแบบแมมดานิที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด สำหรับการประเมินผลกฎข้อที่ 1 และกฎข้อที่ 2 สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 4.12 จากรูปดังกล่าว เมื่อพิจารณาที่กฎข้อที่ 1 อินพุต x_1 อยู่ในพีชชีเซตของ neg และ x_2 อยู่ในพีชชีเซตของ neg_rate ทำการเปรียบเทียบค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของ x_1 และ x_2 โดยเลือกค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพที่น้อยที่สุดซึ่งแทนด้วยฟังก์ชัน $\min$ คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของ x_2 จากนั้นเอาต์พุตของกฎข้อที่ 1 จะถูกตัดยอดตามค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของ x_2 ส่วนกฎข้อที่ 2 ก็ใช้การพิจารณาเช่นเดียวกับกฎข้อที่ 1 โดยอินพุต x_1 อยู่ในพีชชีเซตของ neg และ x_2 อยู่ในพีชชีเซตของ $zero_rate$ ทำการเปรียบเทียบค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของ x_1 และ x_2 โดยเลือกค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพที่น้อยที่สุดคือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของ x_1 จากนั้นเอาต์พุตของกฎข้อที่ 2 จะถูกตัดยอดตามค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพ x_1 ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการรวมฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของเอาต์พุตของทั้ง 2 กฎเข้าด้วยกัน โดยเลือกค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพสูงสุดในการรวมกฎซึ่งแทนด้วยฟังก์ชัน $\max$ และสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (4.17) ดังนี้

$$\mu_{Bk}(y) = \max[\min[\mu(x_1), \mu(x_2)]] \quad k = 1, 2, \dots, r \quad (4.17)$$

จากสมการที่ (4.17) แสดงค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของเอาต์พุตสำหรับ r กฎ โดยพิจารณาแต่ละกฎด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของอินพุต x_1 เทียบกับค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของอินพุต x_2 ด้วยฟังก์ชัน $\min$ และรวมกฎด้วยด้วยฟังก์ชัน $\max$

- วิธีการอนุมานแบบค่าสูงสุด - ผลคูณ (Max - Product Inference: MPI)

วิธีการอนุมานแบบแมมดานิที่ใช้ค่าสูงสุด - ผลคูณ สำหรับการประเมินผลกฎข้อที่ 1 และกฎข้อที่ 2 สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งกระบวนการอนุมานจะเหมือนกับวิธีการอนุมานแบบแมมดานิที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด แต่จะมีความแตกต่างที่ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของเอาต์พุตดังรูปที่ 4.13 ดังนี้



รูปที่ 4.13 การอนุมานแบบแมกดันนิตที่ใช้ค่าสูงสุด - ผลคูณ

จากรูปที่ 4.13 การพิจารณากฎข้อที่ 1 และกฎข้อที่ 2 จะเหมือนกับวิธีการอนุมานแบบแมกดันนิตที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด โดยจะแตกต่างที่ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของเอาต์พุตของกฎข้อที่ 1 จะถูกปรับลดระดับลงตามค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของอินพุต x_2 และเอาต์พุตของกฎข้อที่ 2 จะถูกปรับลดค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของอินพุต x_1 ส่วนขั้นตอนสุดท้ายจะทำการรวมฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของเอาต์พุตของทั้ง 2 กฎเข้าด้วยกัน โดยเลือกค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพสูงสุดในการรวมกฎซึ่งแทนด้วยฟังก์ชัน max เช่นเดียวกัน

4.4.6 การดีฟัซซิฟิเคชัน

กระบวนการดีฟัซซิฟิเคชันเป็นกระบวนการแปลงเอาต์พุตแบบฟัซซีคือ ระดับแรงดันไฟฟ้าตามตารางที่ 4.1 เป็นเอาต์พุตปกติธรรมดา คือ แรงดันไฟฟ้าหน่วยเป็นโวลต์ (V) ซึ่งวิธีการดีฟัซซิฟิเคชันมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเปรียบเทียบ 4 วิธี ได้แก่ วิธีไบเซกเตอร์ (Bisector of Area: BOA) วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (Mean of Maximum: MOM) วิธีหาค่าน้อยสุดของค่าสูงสุด (Smallest of Maximum: SOM) วิธีหาค่ามากที่สุดของค่าสูงสุด (Largest of Maximum: LOM) โดยในแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

-วิธีไบเซกเตอร์ (BOA)

วิธีไบเซกเตอร์เป็นการหาค่าของเอาต์พุตโดยใช้การกำหนดเงื่อนไขของคำตอบไว้ตามสมการที่ (4.18) ดังนี้

$$\mu(z)^* \geq \frac{\sum \mu(z_k)}{2} \quad (4.18)$$

โดยที่ z_k คือ ค่าแต่ละตำแหน่งบนแกน y ของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการรวมกฎ
 $\mu(z)^*$ คือ ค่าเงื่อนไขที่ต้องการ

จากสมการที่ (4.18) ผลรวมของค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของแต่ละ z_k จะถูกนำมาหารด้วยค่า 2 จะได้ค่า $\mu(z)^*$ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการตรวจสอบคำตอบที่ต้องการ ซึ่งกระบวนการทำงานด้วยวิธีนี้สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (4.19)

$$\mu(z_k) = \mu(z_k)^n + \mu(z_k)^{n+1} \quad (4.19)$$

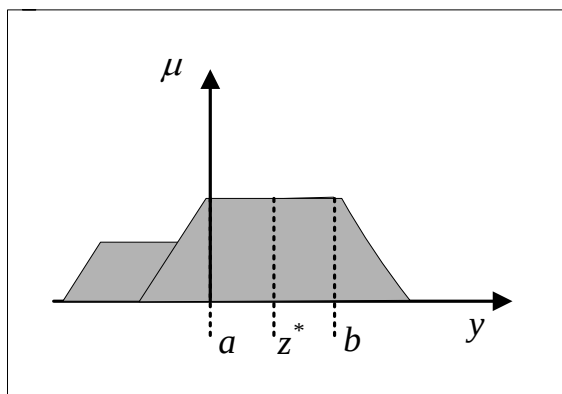
โดยที่ n คือ จำนวนรอบในการตรวจสอบ

จากสมการที่ (4.19) กำหนดให้ $\mu(z_k)^0$ เท่ากับ 0 เมื่อพิจารณาการทำงานที่ $n = 0$ จะทำการตรวจสอบระดับความเป็นสมาชิกภาพที่ตำแหน่ง z_k ค่าแรก ถ้าค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพไม่เท่ากับค่าเงื่อนไขที่ต้องการตามสมการที่ (4.18) จะทำการเพิ่มจำนวนรอบเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่า $\mu(z_k)$ ตรงตามเงื่อนไข จากนั้นค่าที่ตำแหน่ง z_k ดังกล่าว จะเป็นเอาต์พุต z^* ในการดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธี BOA ตามสมการที่ (4.20)

$$z^* = z_k \quad (4.20)$$

-วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (MOM)

วิธีนี้เป็นการหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดของความเป็นสมาชิกภาพ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.14 ดังนี้



รูปที่ 4.14 วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด

จากรูปที่ 4.14 ค่า a คือค่าตามแนวแกน y ที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพสูงสุดค่าแรก และ b คือค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพสูงสุดค่าสุดท้าย และเอาต์พุต คือ z^* ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.21) ดังนี้

$$z^* = \frac{a+b}{2} \quad (4.21)$$

จากสมการที่ (4.21) เอาต์พุต z^* ของวิธี MOM จะคำนวณได้จากผลรวมของค่า a กับค่า b หารด้วย 2

-วิธีหาค่าน้อยสุดของค่าสูงสุด (SOM)

วิธีนี้เป็นการหาค่าน้อยสุดของค่ารากที่ตำแหน่ง z_k ต่าง ๆ ที่มีค่าความเป็นสมาชิกภาพสูงสุด ซึ่งเอาต์พุต z^* พิจารณาได้จากสมการที่ (4.22) ดังนี้

$$z^* = \inf \{ |z_k| \mid \mu(z_k) = hgt(c_k) \} \quad (4.22)$$

โดยที่ c_k คือ ฟัซซีเซตที่พิจารณาที่ตำแหน่ง k ต่าง ๆ
 $hgt(c_k) = \sup \mu_c(z)$ คือ ค่ามากที่สุดในการยูเนียนของฟัซซีเซต c

จากสมการที่ (4.22) เอาต์พุต z^* จะพิจารณาได้จากค่าสัมบูรณ์ของ z_k ที่น้อยที่สุดของระดับความเป็นสมาชิกภาพที่มีค่ามากที่สุดในการยูเนียนของฟัซซีเซต c โดยค่า z ณ ตำแหน่งที่ค่าสัมบูรณ์ของ z_k มีค่าน้อยที่สุดจะเป็นคำตอบของวิธี SOM

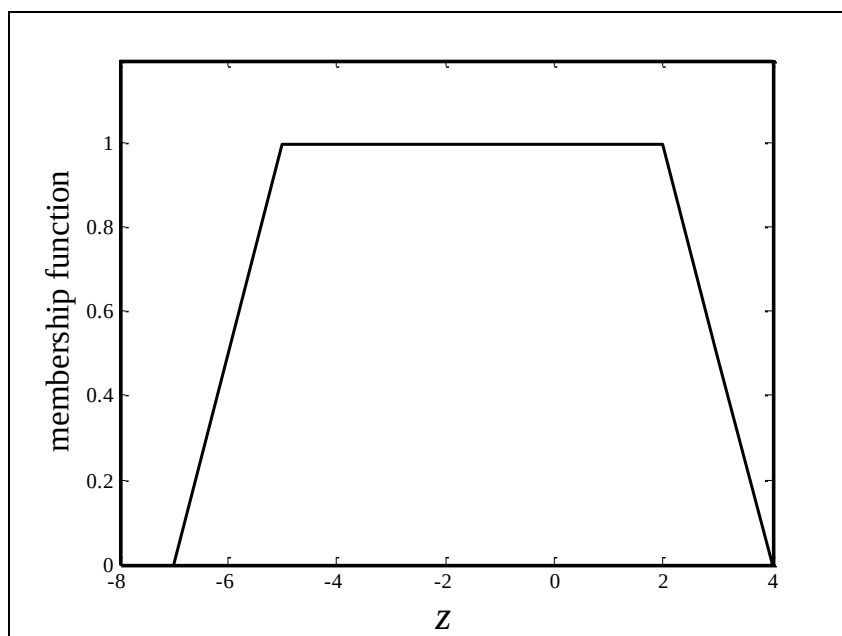
-วิธีหาค่ามากที่สุดของค่าสูงสุด (LOM)

วิธีนี้เป็นการหาค่ามากที่สุดของค่ารากที่ตำแหน่ง z_k ต่าง ๆ ที่มีค่าความเป็นสมาชิกภาพสูงสุด ซึ่งเอาต์พุต z^* พิจารณาได้จากสมการที่ (4.23) ดังนี้

$$z^* = \sup \{ |z_k| \mid \mu(z_k) = \text{hgt}(c_k) \} \quad (4.23)$$

จากสมการที่ (4.23) เอาต์พุต z^* จะพิจารณาได้จากค่าสัมบูรณ์ของ z_k ที่มากที่สุดของระดับความเป็นสมาชิกภาพที่มีค่ามากที่สุดในการยูเนียนของฟัซซีเซต c โดยค่า z ณ ตำแหน่งที่ค่าสัมบูรณ์ของ z_k มีค่ามากที่สุดจะเป็นคำตอบของวิธี LOM

จากการอธิบายวิธีการดีฟัซซิฟิเคชันทั้ง 4 วิธีข้างต้น เพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจ จะมีการยกตัวอย่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพสำหรับพิจารณาการคำนวณทั้ง 4 วิธี ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

จากรูปที่ 4.15 แสดงฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพสำหรับการคำนวณด้วยวิธีการดีฟัซซิฟิเคชันที่ได้จากการรวมกฎเรียบร้อยแล้ว ซึ่งสามารถพิจารณาเป็นข้อมูลได้ตามตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

z	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
mf	0	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0

หมายเหตุ mf คือ ระดับความเป็นสมาชิกภาพ

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าของระดับฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ตำแหน่ง z ต่าง ๆ และจากข้อมูลดังกล่าวสามารถแสดงการคำนวณของวิธีการดีฟัซซิฟิเคชันทั้ง 4 วิธี ได้ดังนี้

- วิธี *BOA* สามารถกำหนดเงื่อนไขของคำตอบได้จากสมการที่ (4.18) โดยที่ผลรวมของค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพ ($\sum \mu(z_k)$) ที่ตำแหน่ง z ต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 9 จะได้

$$\mu(z)^* \geq \frac{9}{2} \approx 4.5 \quad (4.24)$$

ตารางที่ 4.3 การตรวจสอบระดับความเป็นสมาชิกภาพ

n	$\mu(z_k)$
0	0
1	0.5
2	1.5
3	2.5
4	3.5
5	4.5

จากนั้นพิจารณาสมการที่ (4.19) โดยกำหนดให้ $\mu(z_k)^0$ เท่ากับ 0 และทำการตรวจสอบระดับความเป็นสมาชิกภาพของ z ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งพิจารณาได้ตามตารางที่ 4.3 และจากตารางดังกล่าวจะหยุดการตรวจสอบที่ $n=5$ เนื่องจากค่า $\mu(z_k)$ ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดคือ 4.5 ดังนั้นค่า z ในรอบที่ $n=5$ จะเป็นค่าเอาต์พุต z^* ซึ่งเท่ากับ -2

- วิธี *MOM* สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.21) โดยเมื่อพิจารณาดารงที่ 4.2 ที่ค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพมากที่สุด ค่า a มีค่าเท่ากับ -5 และ b มีค่าเท่ากับ 2 จะได้ค่าเอาต์พุต z เท่ากับ -1.5

$$z^* = \frac{-5+2}{2} = -1.5 \quad (4.25)$$

- วิธี *SOM* และ วิธี *LOM* จะพิจารณาเอาต์พุต z^* ได้จากค่าสัมบูรณ์ของ z_k ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งพิจารณาได้ตามตารางที่ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลของระดับฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่มากที่สุด

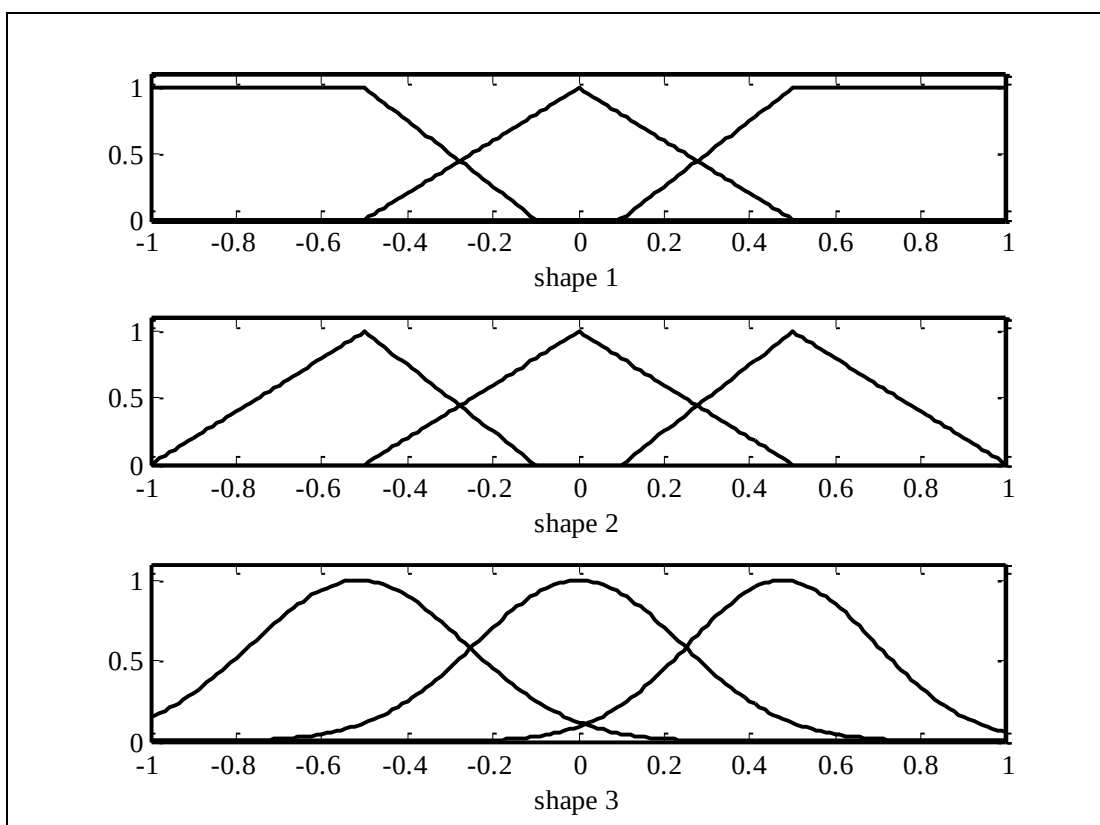
z	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2
mf	1	1	1	1	1	1	1	1
$ z $	5	4	3	2	1	0	1	2

จากตารางที่ 4.4 เอาต์พุต z^* ของวิธี *SOM* จะเท่ากับค่า z ในตำแหน่งที่ค่าสัมบูรณ์ของ z มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเท่ากับ 0 และเอาต์พุต z^* ของวิธี *LOM* จะเท่ากับค่า z ในตำแหน่งที่ค่าสัมบูรณ์ของ z มีค่ามากที่สุด ซึ่งเท่ากับ -5

จากตัวอย่างการดีฟัซซิฟิเคชันทั้ง 4 วิธีข้างต้น พบว่าการประเมินผลในแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันตามรูปแบบการดีฟัซซิฟิเคชัน และขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแต่ละงาน

4.5 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ในเบื้องต้นได้เลือกใช้การอนุมานแบบแมกดันที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด และการดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธีค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (MEAN OF MAXIMUM: MOM) เนื่องจากยังไม่ทราบว่าวิธีใดให้ผลในการควบคุมระบบดีที่สุด และในขั้นสุดท้ายจะทำการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ใช้การอนุมานและการดีฟัซซิฟิเคชันที่ต่างกัน โดยในขั้นแรกจะทำการทดสอบรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่นำมาเปรียบเทียบมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ตามรูปที่ 4.16 ดังนี้



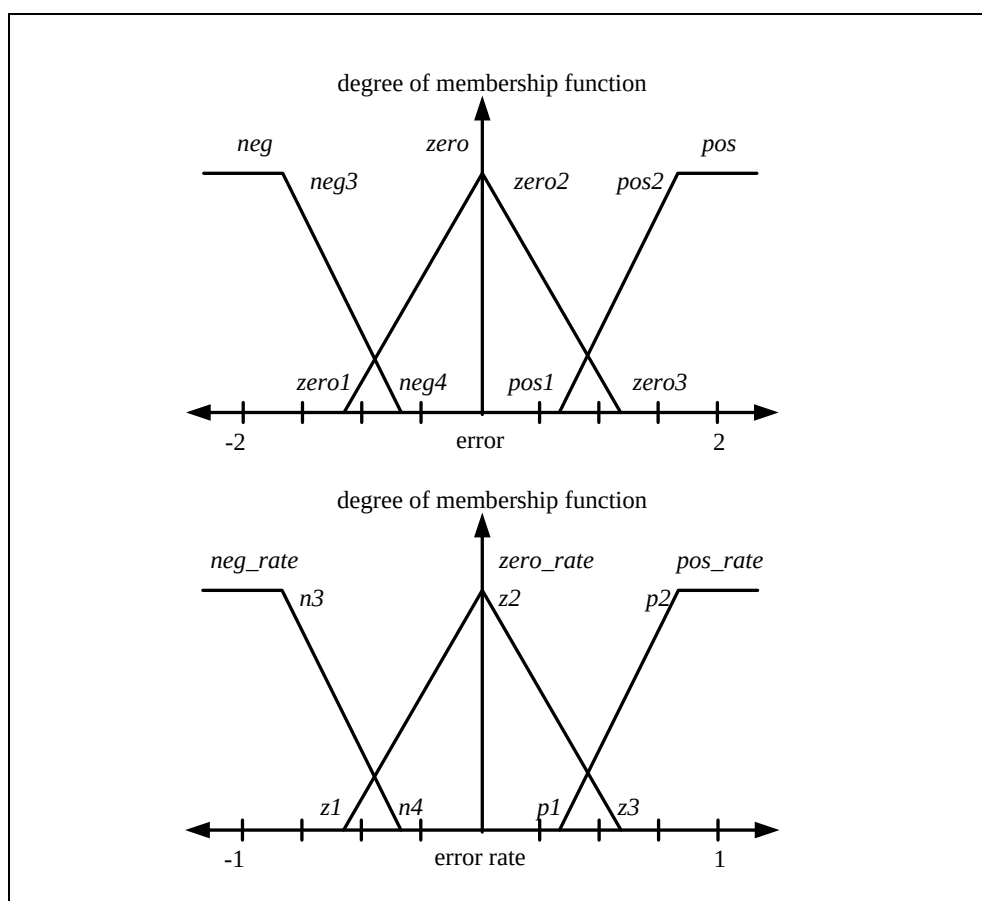
รูปที่ 4.16 รูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

จากรูปที่ 4.16 รูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของ shape 1 ประกอบด้วย triangular membership function (trimf) ผสมกับ trapezoidal membership function (trapmf) shape 2 ประกอบด้วย triangular membership function (trimf) และ shape 3 ประกอบด้วย gaussian curve membership function (gaussmf) ซึ่งการเปรียบเทียบผลการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยที่ใช้รูปร่างของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้ง 3 แบบ ดูได้จากตารางที่ 4.5 โดยพิจารณาค่า $\%THD_{av}$ ได้จากสูตรการคำนวณตามสมการที่ (3.18) ซึ่งจากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่า รูปร่างทั้ง 3 แบบ ให้ค่า $\%THD_{av}$ ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้รูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ shape 1 เนื่องจากรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพดังกล่าวง่ายต่อการนำไปสร้างจริง

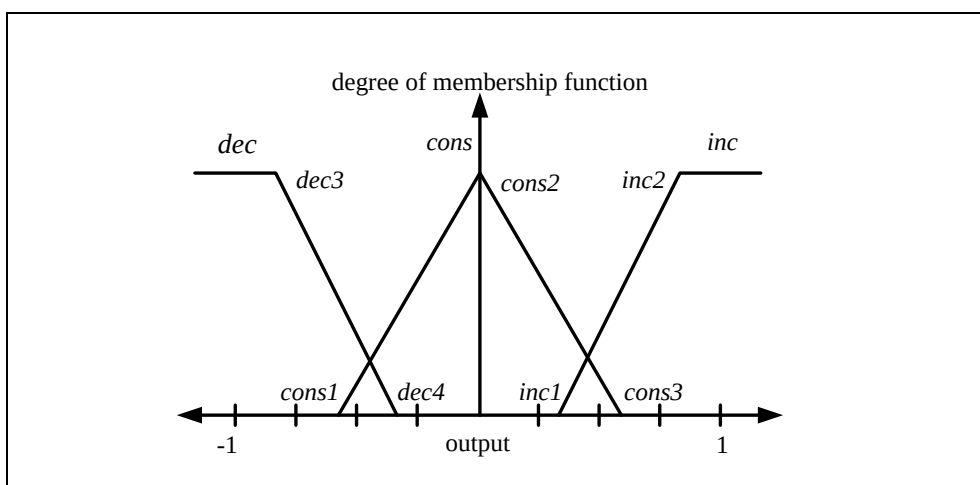
ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

รูปร่าง	เฟส			%THD _{av}
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
shape 1	1.2187	1.2224	1.2592	1.2334
shape 2	1.2562	1.2350	1.2464	1.2459
shape 3	1.2165	1.2380	1.2594	1.2380

จากการเปรียบเทียบดังกล่าวข้างต้น เมื่อพิจารณาลักษณะของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ สำหรับการควบคุมการบิดกระแสดรเซชของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับงานวิจัย วิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ทั้งหมดจำนวน 21 พารามิเตอร์ ได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุต



รูปที่ 4.17 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุต (ต่อ)

จากรูปที่ 4.17 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุต จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ต้องทำการออกแบบอยู่จำนวนทั้งหมด 21 พารามิเตอร์ ได้แก่ *neg3* *neg4* *zero1* *zero2* *zero3* *pos1* *pos2* *n3* *n4* *z1* *z2* *z3* *p1* *p2* *dec3* *dec4* *cons1* *cons2* *cons3* *inc1* และ *inc2* โดยในเบื้องต้นจะทำการสุ่มค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวในกรณีต่าง ๆ ด้วยวิธีการลองผิดลองถูกจำนวนหลายชุดข้อมูลจนกระทั่งได้ชุดข้อมูลที่ดีที่สุด เพื่อนำมาทดสอบด้วยการจำลองสถานการณ์ ซึ่งการทดสอบประกอบด้วยฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาด อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดและเอาต์พุต โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวได้แสดงไว้ตามตารางที่ 4.6 ถึง ตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.6 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาด

ชุดข้อมูล	error						
	<i>neg</i>		<i>zero</i>			<i>pos</i>	
	<i>neg3</i>	<i>neg4</i>	<i>zero1</i>	<i>zero2</i>	<i>zero3</i>	<i>pos1</i>	<i>pos2</i>
1	-1.9210	-1.5300	-1.6100	-0.0370	1.8470	1.7620	1.9500
2	-1.5000	-1.0000	-1.1600	0.3228	1.7000	1.4870	1.9300
3	-0.6000	-0.1000	-0.3610	0.1000	0.5000	0.3500	0.8000

ตารางที่ 4.7 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด

ชุดข้อมูล	error rate						
	<i>neg_rate</i>		<i>zero_rate</i>			<i>pos_rate</i>	
	<i>n3</i>	<i>n4</i>	<i>z1</i>	<i>z2</i>	<i>z3</i>	<i>p1</i>	<i>p2</i>
1	-0.9497	-0.7170	-0.8280	0.0132	0.8545	0.8016	0.9390
2	-0.8540	-0.4524	-0.6530	-0.2040	0.7381	0.5212	0.9070
3	-0.9000	-0.4500	-0.6000	-0.1000	0.4000	0.2500	0.8000

ตารางที่ 4.8 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของเอาต์พุต

ชุดข้อมูล	output						
	<i>dec</i>		<i>cons</i>			<i>inc</i>	
	<i>dec3</i>	<i>dec4</i>	<i>cons1</i>	<i>cons2</i>	<i>cons3</i>	<i>inc1</i>	<i>inc2</i>
1	-0.9500	-0.7850	-0.8390	-0.0661	0.4788	0.4206	0.7430
2	-0.9230	-0.6323	-0.7540	-0.1720	0.7963	0.7222	0.9440
3	-0.8000	-0.3000	-0.5000	0	0.6000	0.4000	0.8000

จากชุดข้อมูลทั้ง 3 ชุด จากตารางที่ 4.6 ถึง ตารางที่ 4.8 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพดังกล่าวจะถูกนำมาใช้วัดประสิทธิภาพผลด้วยค่า %THD ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 กำหนดให้ค่า %THD ต้องน้อยกว่า 5 % และในหัวข้อถัดไปจะเป็นการนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยตัวควบคุมแบบฟuzzyลอจิกที่ใช้พารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.6 ถึง ตารางที่ 4.8 ดังที่เสนอข้างต้น

4.6 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

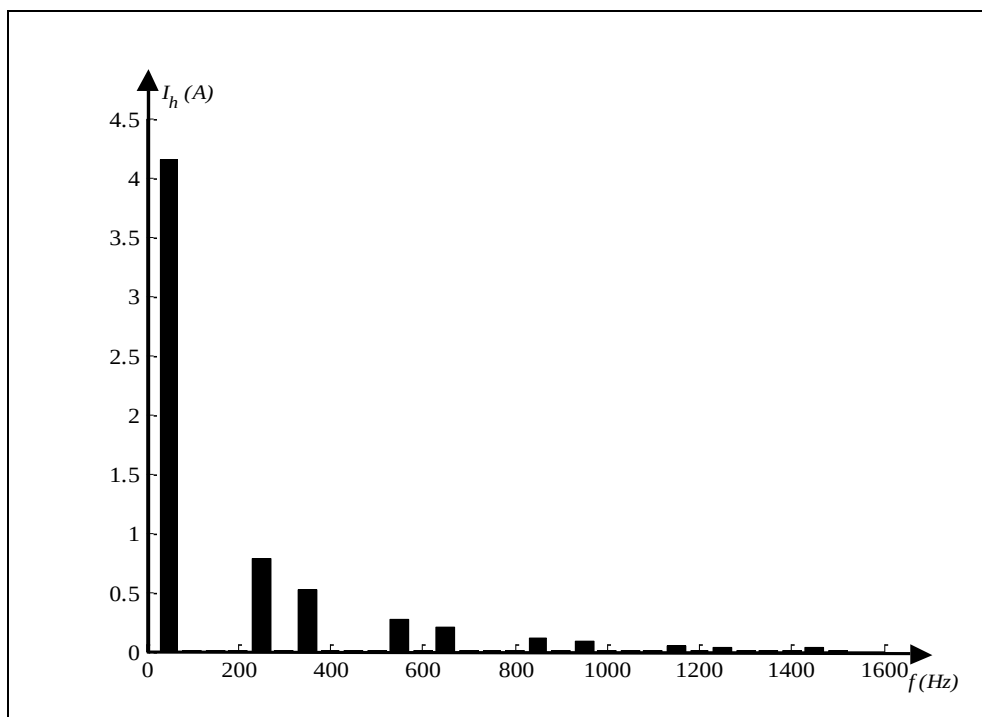
การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟuzzyลอจิกควบคุมการบิดกระแสดชเชยของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานของระบบดังรูปที่ 4.1 จะใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่มีการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ได้จากบทที่ 3 รวมถึงใช้การอนุมานฟuzzyแบบแมมดานิที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด และดีฟuzzyฟิเคชันด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด ซึ่งการจำลองสถานการณ์จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งหมด 21

พารามิเตอร์ของทั้ง 3 ชุดข้อมูล จากตารางที่ 4.6 ถึง ตารางที่ 4.8 โดยชี้วัดประสิทธิภาพด้วยค่า %THD ตามสมการที่ (3.18) และสามารถพิจารณาผลการทดสอบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของทั้ง 3 ชุดข้อมูลได้ดังตารางที่ 4.9

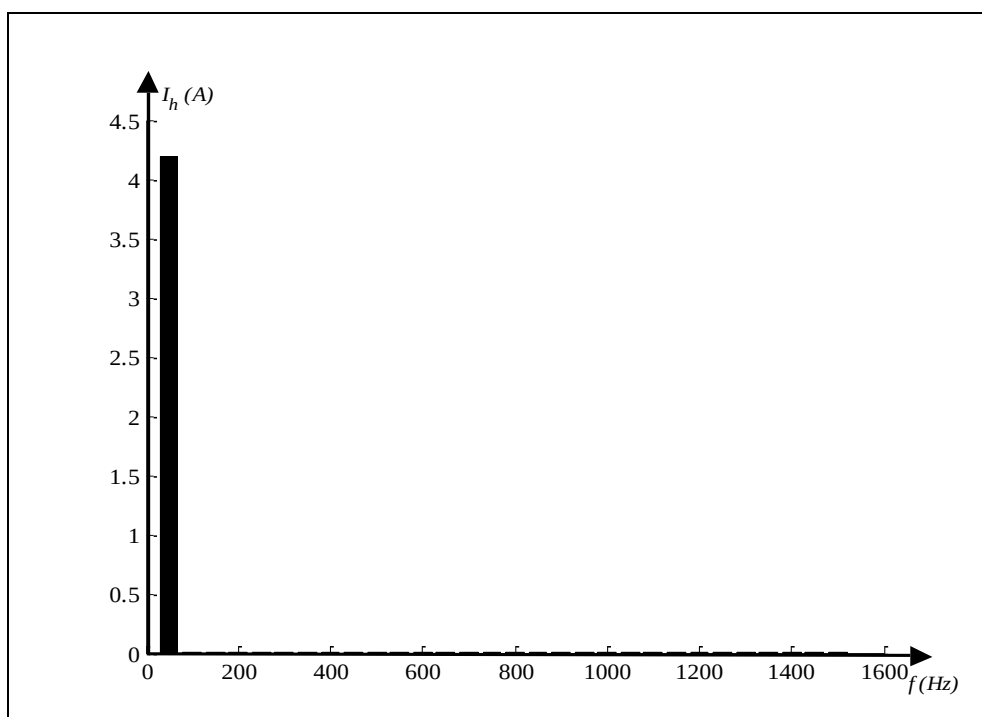
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

ชุดข้อมูล	เฟส			%THD _{หลังการชดเชย}	%THD _{ก่อนการชดเชย}
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		
1	3.0208	2.9906	2.9852	2.9989	24.3973
2	1.9525	1.9020	1.9659	1.9401	
3	1.1022	1.1462	1.1245	1.1243	

จากตารางที่ 4.9 สังเกตได้ว่าค่า %THD หลังการชดเชยของข้อมูลชุดที่ 3 มีค่า %THD น้อยที่สุด เท่ากับ 1.1243% เมื่อเทียบกับข้อมูลชุดอื่น ๆ และน้อยกว่าค่า %THD ก่อนการชดเชย ดังนั้นจึงเลือกใช้ข้อมูลฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของข้อมูลชุดที่ 3 สำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก และนอกจากนี้การพิจารณาปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากค่า %THD ดังกล่าวแล้วยังสามารถพิจารณาได้จากสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ก่อนและหลังการฉีดกระแสชดเชยได้ดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ซึ่งจากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่าขณะที่ยังไม่มีการฉีดกระแสชดเชยให้กับระบบจะพบปริมาณฮาร์มอนิกที่ลำดับต่าง ๆ อาทิเช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ลำดับที่ 7 ลำดับที่ 11 ลำดับที่ 13 ลำดับที่ 17 และลำดับที่ 19 โดยปริมาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีปริมาณมากที่สุด จากนั้นเมื่อทำการฉีดกระแสชดเชยโดยมีตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกควบคุมการฉีดกระแสชดเชย จะสังเกตได้ว่าลักษณะสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกดังรูปที่ 4.20 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับจะมีปริมาณลดน้อยลงมาก

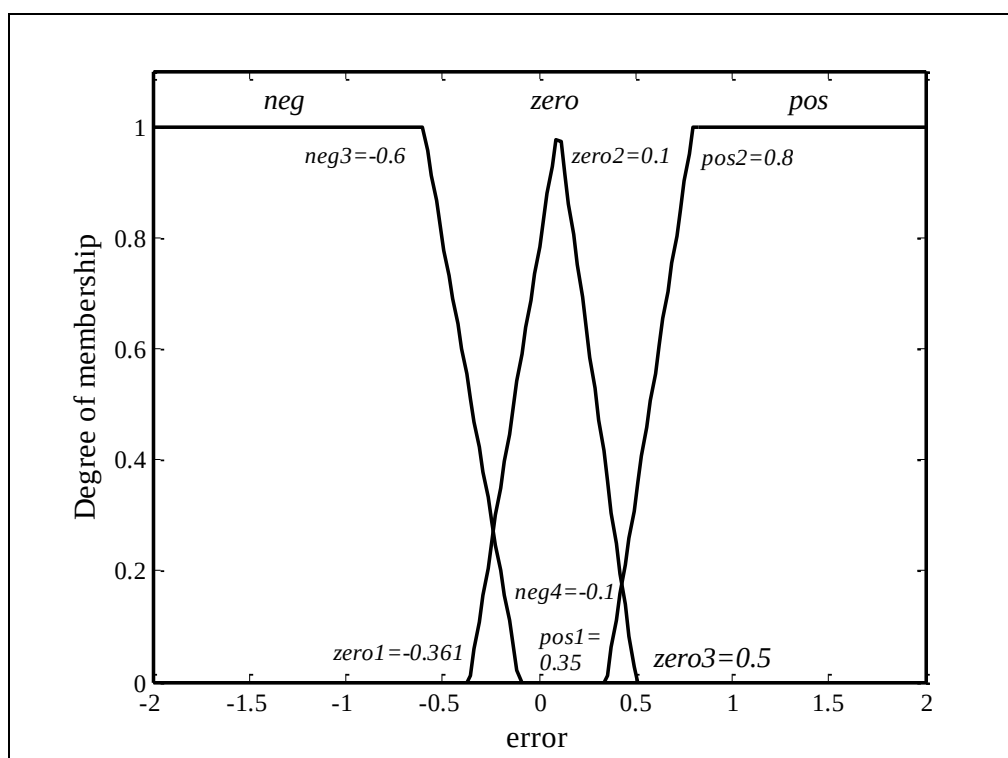


รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของกระแสมอนิกลำดับต่าง ๆ ก่อนมีการน็อคกระแสชดเชย

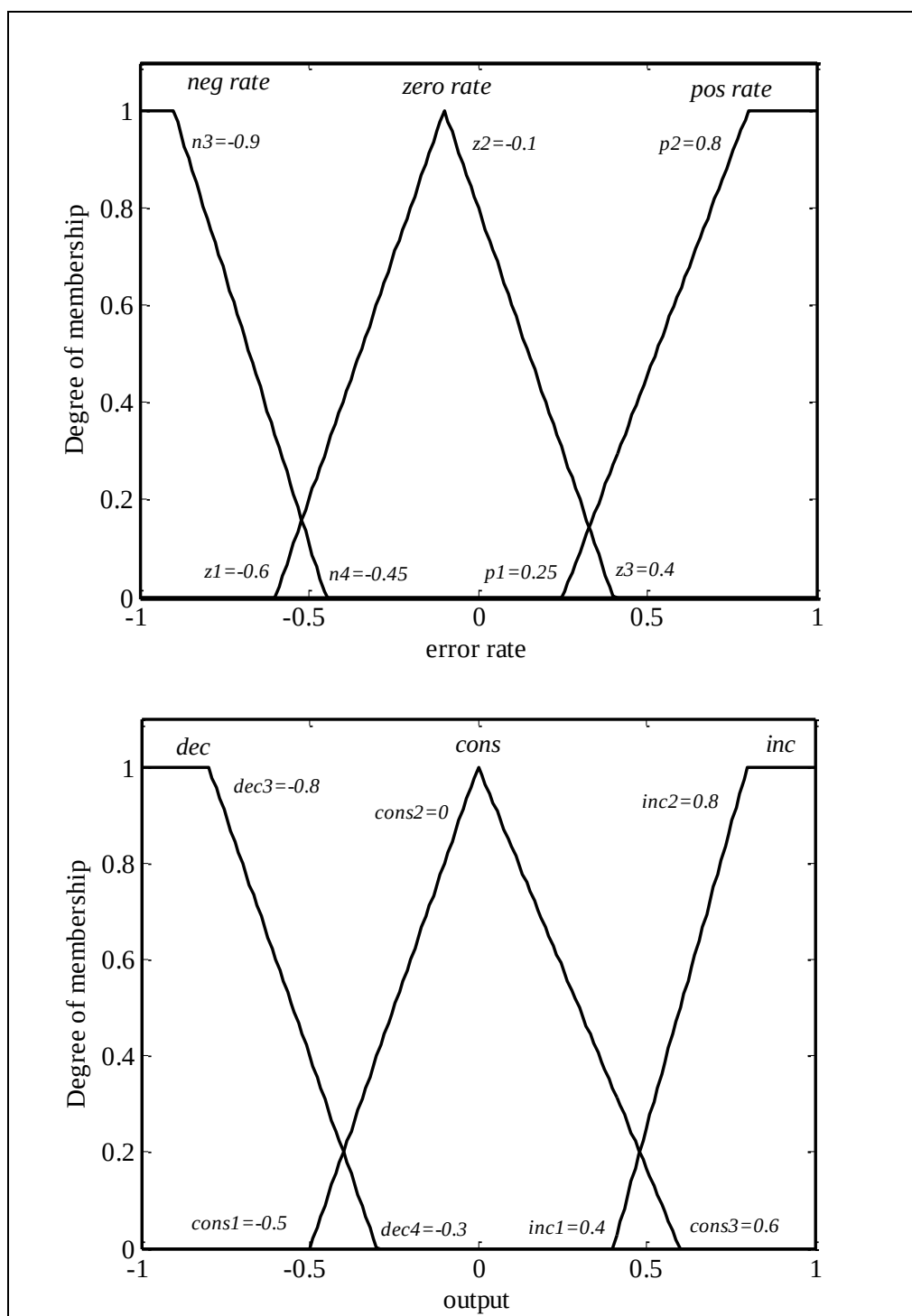


รูปที่ 4.19 สเปกตรัมของกระแสมอนิกลำดับต่าง ๆ หลังมีการน็อคกระแสชดเชย

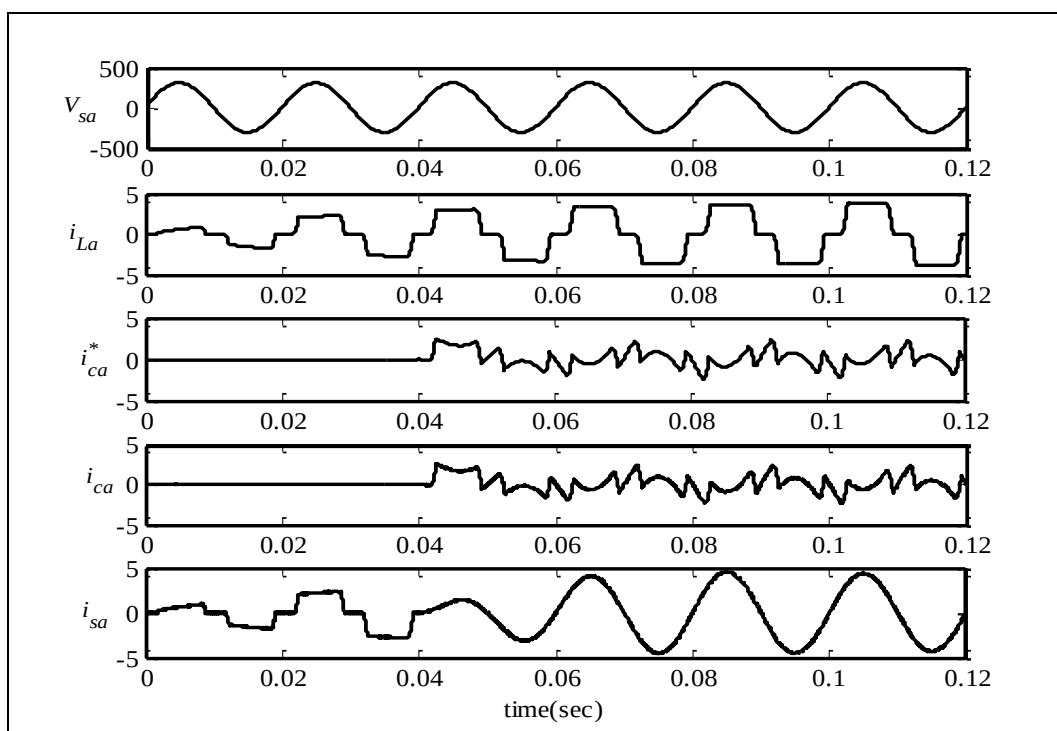
ลักษณะฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของข้อมูลชุดที่ 3 สำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ดังกล่าวพิจารณาได้จากรูปที่ 4.20 และผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยในแต่ละเฟส พิจารณาได้ตามรูปที่ 4.21 รูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 โดยจากการทดสอบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ ทั้ง 3 ชุดข้อมูล สังเกตได้ว่า ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกมีผลต่อค่า %THD ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องกำหนดฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพให้เหมาะสมต่อระบบ ที่นำไปควบคุม



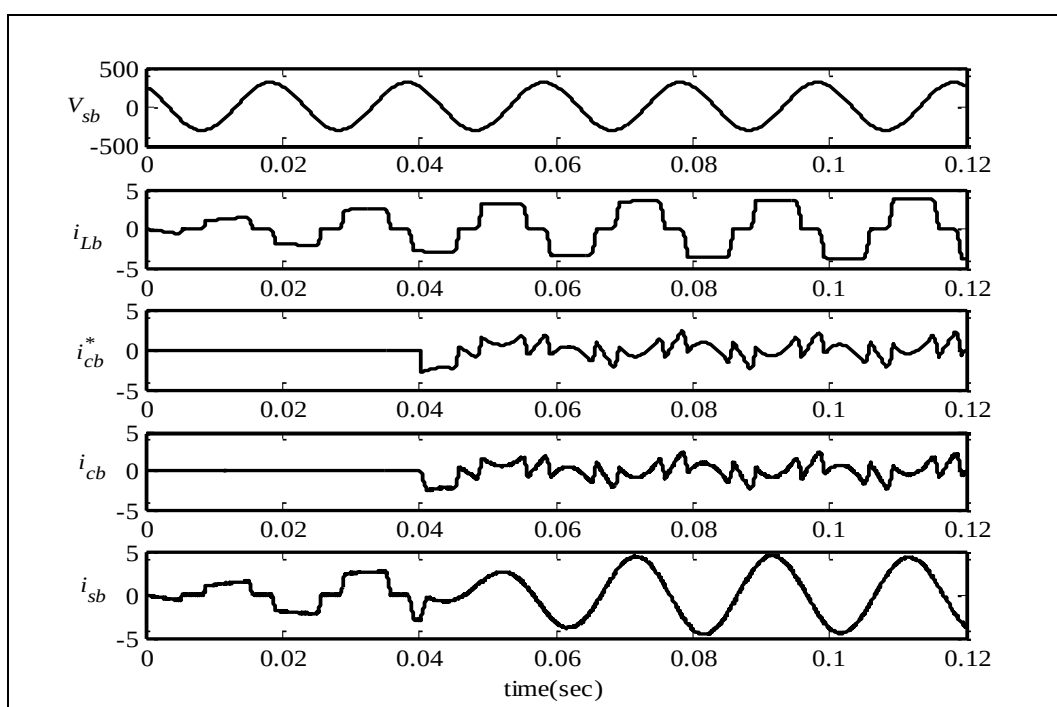
รูปที่ 4.20 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการทดสอบข้อมูลชุดที่ 3



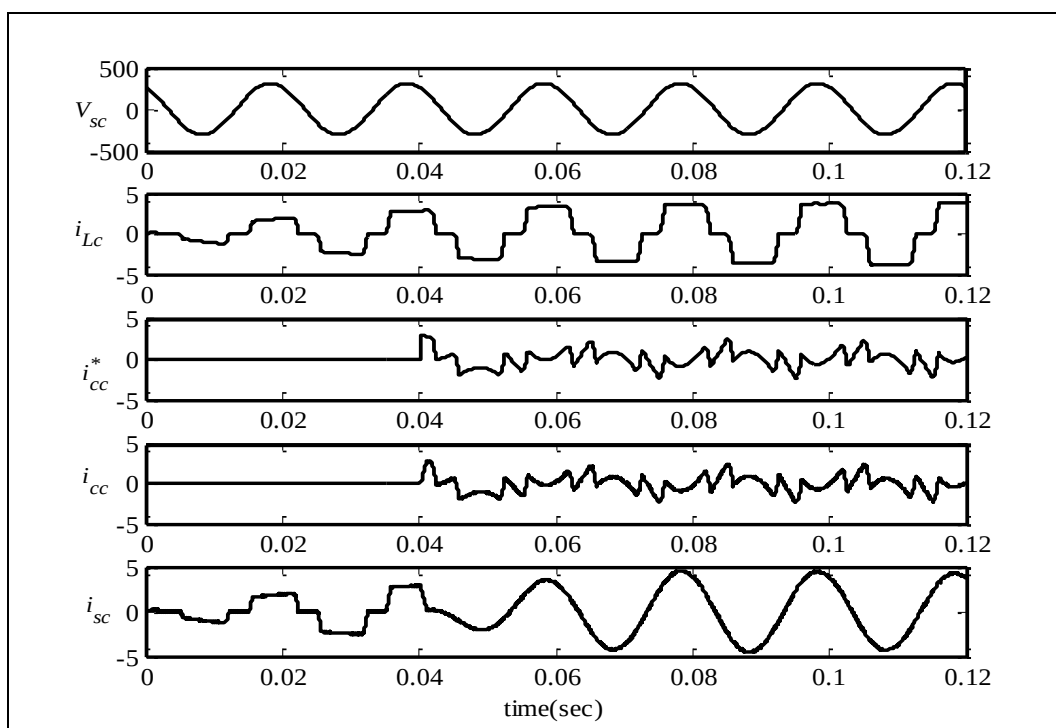
รูปที่ 4.20 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการทดสอบข้อมูลชุดที่ 3 (ต่อ)



รูปที่ 4.21 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส a



รูปที่ 4.22 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส b



รูปที่ 4.23 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส c

จากรูปที่ 4.21 ถึง รูปที่ 4.23 ช่วงเวลา 0 - 0.04 วินาที ยังไม่มีการฉีดกระแสชดเชยให้แก่ระบบ ต่อมาที่ช่วงเวลา 0.04 - 0.12 วินาที วงจรกรองกำลังแอคทีฟจะฉีดกระแสชดเชยจริงซึ่งมีรูปสัญญาณเป็นไปตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก จะสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักหลังการชดเชยทั้งสามเฟส (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น เมื่อเทียบกับรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายก่อนมีการชดเชยจะมีลักษณะรูปสัญญาณเหมือนกับกระแสไฟฟ้าทางด้านโหลด (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) โดยค่า %THD หลังการทดสอบของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกรณีเฟส a มีค่าเท่ากับ 1.1022% กรณีเฟส b เท่ากับ 1.1462% และกรณีเฟส c เท่ากับ 1.1245%

4.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกซึ่งเป็นวิธีการควบคุมแบบชาญฉลาดที่พึ่งพาประสบการณ์ของมนุษย์เป็นพื้นฐานในการควบคุม โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำของระบบ ซึ่งระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์ใช้การตรวจจับ

ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่ได้รับการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ได้จากบทที่ 3 และในหัวข้อที่ 4.3 นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการของ Ingram และ Round จะได้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานคือ ค่า V_{dc} เท่ากับ 750 V และ L_f เท่ากับ 0.039 H จากนั้นในหัวข้อที่ 4.4 จะนำเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ซึ่งในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การอนุมานแบบแมมดานิที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด และการดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธีค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด และจากผลการจำลองสถานการณ์ของระบบพบว่า การออกแบบค่าฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกมีความสำคัญต่อสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบเป็นอย่างมาก โดยจากการเปรียบเทียบข้อมูลทั้ง 3 ชุด ที่ได้จากการออกแบบจากประสบการณ์ของผู้วิจัย จะสังเกตได้ว่า ข้อมูลชุดที่ 3 จะให้ค่า %THD หลังการชดเชยของกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 1.1243% และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992. ในบทต่อไปจะนำเสนอวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อปรับปรุงฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพให้มีค่า %THD น้อยกว่าการออกแบบจากประสบการณ์ของผู้วิจัย

บทที่ 5

การปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฟลักซ์ล่อจิก โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

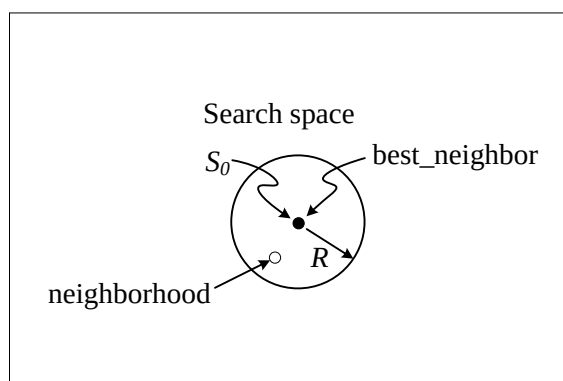
5.1 บทนำ

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟลักซ์ล่อจิกสำหรับวงจรกรองกำลังแยกที่ฟให้มีสมรรถนะการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญต่อการกำจัดฮาร์มอนิก ในบทนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบฟลักซ์ล่อจิกด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว โดยนำเสนอแนวทางใหม่สำหรับการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่เหมาะสม เพื่อให้ตัวควบคุมแบบฟลักซ์ล่อจิกสามารถควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานให้มีสมรรถนะดียิ่งขึ้น และมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลการกำจัดฮาร์มอนิกของตัวควบคุมแบบฟลักซ์ล่อจิกกับวิธีฮิสเตอร์ซิส นอกจากนี้ในบทนี้มีการอธิบายกระบวนการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว การออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟลักซ์ล่อจิกด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ขอบเขตการค้นหา และการทดสอบพารามิเตอร์ รวมทั้งผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผลไว้ในบทนี้ด้วยเช่นกัน

5.2 การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

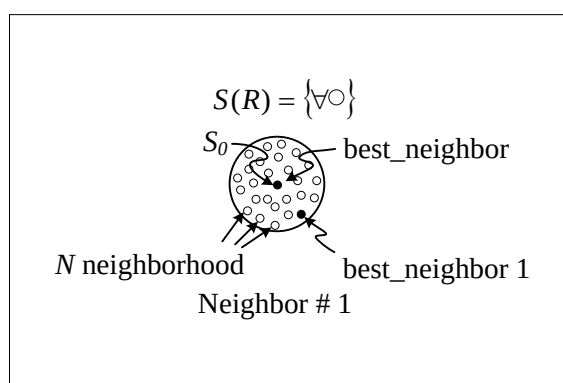
วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) เป็นเทคนิคการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์วิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง อัลกอริทึมนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามู (Tabu Search: TS) ที่ได้รับการพัฒนาโดย กองพัน อารีรักษ์ และสราวุฒ สุจิตจร (2545) ซึ่งการพัฒนาการปรับปรุงประสิทธิภาพการค้นหาให้ดียิ่งขึ้น โดยเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในอัลกอริทึม คือ การเดินย้อนรอย (black - tracking) และการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive search radius) กลไกการเดินย้อนรอยจะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดกลไกนี้จะเลือกคำตอบในรายการตามู (Tabu list) เพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น สำหรับกลไกการปรับรัศมีการค้นหาจะทำการปรับลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุด โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา
 ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น S_0 ภายในพื้นที่การค้นหา และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา

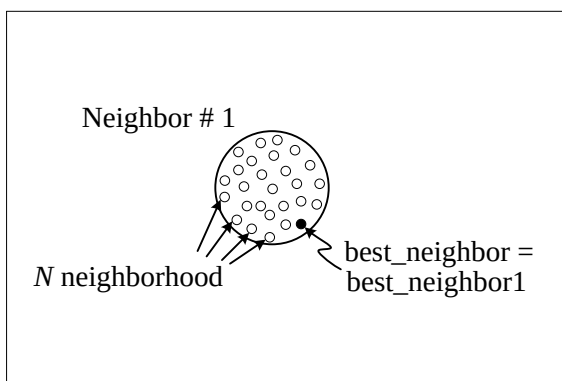
ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบ รอบ ๆ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง ดังรูปที่ 5.2



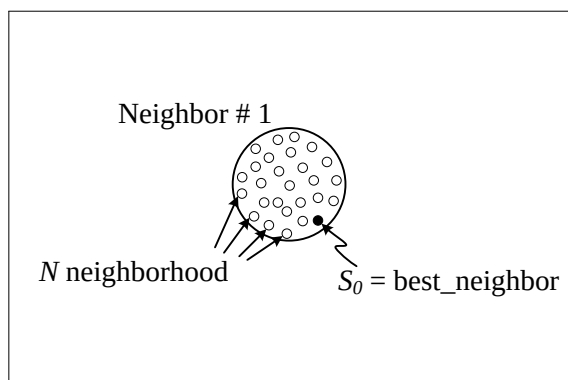
รูปที่ 5.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินคำตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ S_i เป็นคำตอบที่ดีที่สุดที่สุดใน $S(R)$

ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ ดังนั้นกำหนดให้ $S_0 = S_1$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตามดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4

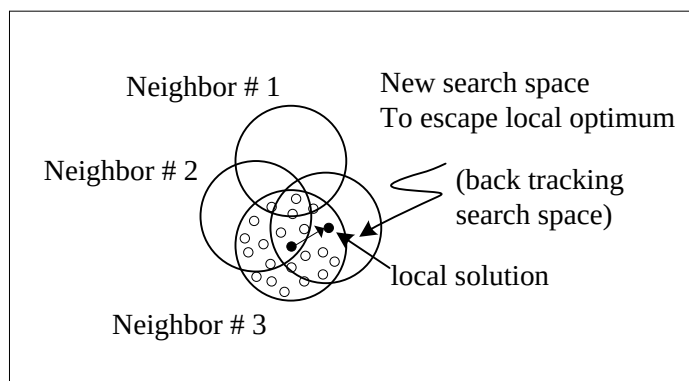


รูปที่ 5.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่



รูปที่ 5.4 กำหนดค่า S_0 ใหม่

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า $\text{count} \geq \text{count}_{\max}$ จะหยุดกระบวนการการค้นหา โดยที่ค่า S_0 คือ คำตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 และเริ่มกระบวนการใหม่อีกครั้งจนกระทั่งได้คำตอบที่พอใจ



รูปที่ 5.5 กลไกการเดินย้อนรอย

ขั้นตอนที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตามูเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 5.5

ขั้นตอนที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5.1)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (5.1)$$

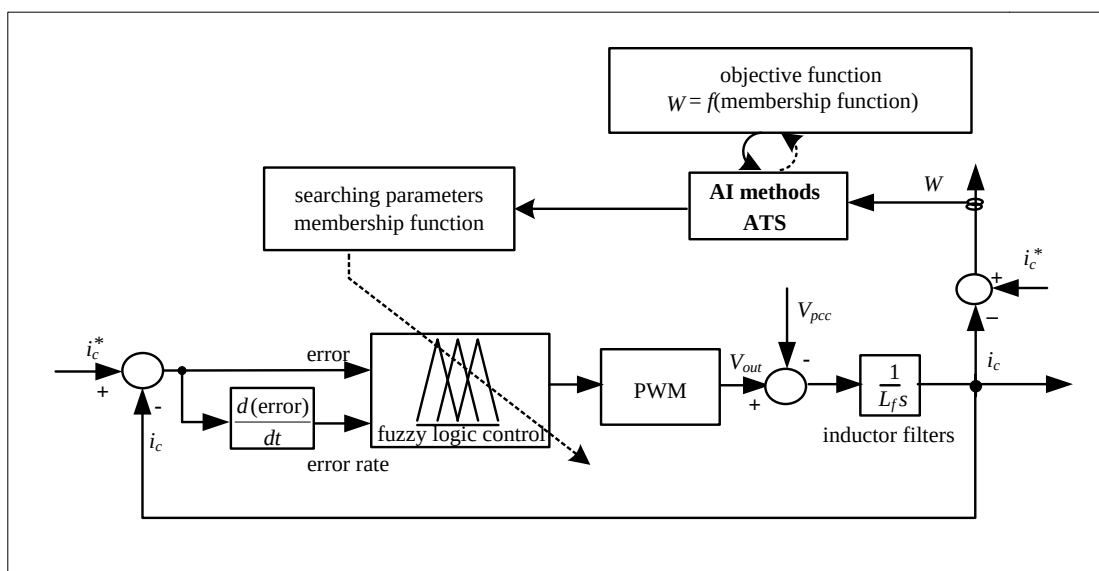
โดยที่ DF คือ ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมี (Decreasing Factor)

5.3 การออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจะดำเนินการโดยค้นหาค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้ง 21 พารามิเตอร์ โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว หรือ วิธี ATS ตามที่อธิบายในรายละเอียดตามหัวข้อที่ 5.2 ซึ่งกระบวนการปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการควบคุมการฉีดกระแสของ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยวิธี ATS สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.6 และโปรแกรมการค้นหาค่าด้วยวิธีดังกล่าว ดูได้จากผนวก ข.



รูปที่ 5.6 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธี ATS

จากรูปที่ 5.6 กระบวนการปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจะเริ่มจากการคำนวณค่าความผิดพลาดที่เกิดจากผลต่างของค่ากระแสอ้างอิงกับค่ากระแสชดเชยจริง และใช้ค่าความผิดพลาดดังกล่าวเป็นอินพุตให้แก่ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก โดยเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มได้แรงดัน V_{out} จากนั้นนำแรงดัน V_{out} ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_f จะได้ค่ากระแสชดเชยจริง และจะถูกนำไปชั้ด้วยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาค่าด้วยวิธี ATS ใช้ค่า w เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทั้งนี้เนื่องจากตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้สามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามค่ากระแสอ้างอิง ดังนั้นถ้ากระแสชดเชยมีค่าใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงจะส่งผลให้ค่า w มีค่าลดลง และเมื่อค่า w มีค่าลดลง จะส่งผลให้ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน โดยที่ค่า w พิจารณาได้จากสมการที่ (5.2) และพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า w กับค่า %THD ได้ตามสมการที่ (5.3) ดังนี้

$$W = \frac{\sum error^2}{N} \quad (5.2)$$

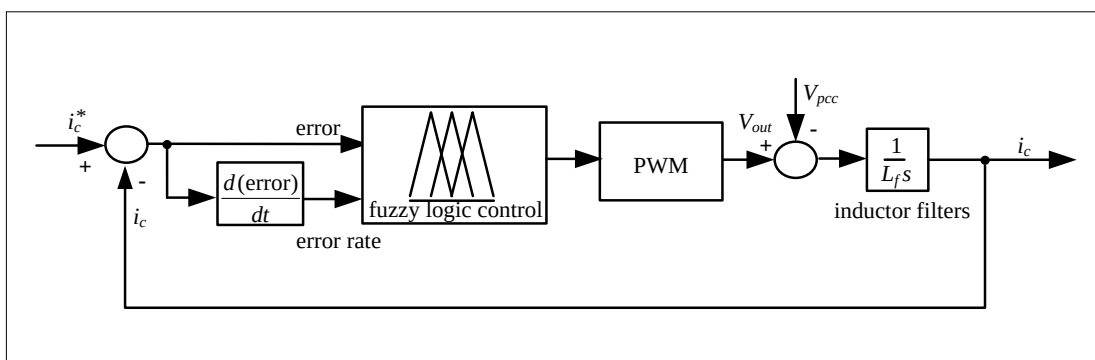
$$W = f(\%THD) \quad (5.3)$$

โดยที่ $error$ คือ ผลต่างของกระแสอ้างอิงกับกระแสชดเชยจริง

N คือ จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด

จากสมการที่ (5.2) สังเกตได้ว่าคุณค่า w สามารถคำนวณได้จากผลรวมของคุณค่า $error$ กำลังสองหารด้วยจำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด และจากสมการที่ (5.3) จะสังเกตได้ว่าคุณค่า w เป็นฟังก์ชันของคุณค่า $\%THD$ ดังนั้นเมื่อค่า w มีค่าลดลงก็จะส่งผลต่อค่า $\%THD$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักให้มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งหมด 21 พารามิเตอร์ด้วยวิธี ATS สามารถพิจารณารายละเอียดได้ดังนี้

จากโครงสร้างการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธี ATS ดังรูปที่ 5.6 สามารถพิจารณาในส่วนของการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกได้ดังรูปที่ 5.7 ซึ่งจากรูปดังกล่าว เป็นการเทียบเคียงระบบบน simulink ลงบน m - file เนื่องจากการค้นหาฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธี ATS บน simulink ใช้เวลาในการประมวลผลที่ยาวนาน ดังนั้นจึงทำการค้นหาด้วยวิธีดังกล่าวบน m - file ทั้งหมดเพื่อลดเวลาในการประมวลผล



รูปที่ 5.7 โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

จากรูปที่ 5.7 จะใช้การคำนวณค่ากระแสชดเชยจากสมการที่ (5.4) และจากสมการดังกล่าวทำการประมาณค่ากระแสชดเชยได้ตามสมการที่ (5.5) ดังนี้

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{V_{out} - V_{pcc}}{L_f} \quad (5.4)$$

โดยที่ V_{pcc} คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (V)

V_{out} คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ (V)

$$\frac{di_c}{dt} \approx \frac{\Delta i_c}{\Delta t} = \frac{i_c(k) - i_c(k-1)}{\Delta t} = \frac{V_{out}(k) - V_{pcc}(k)}{L_f} \quad (5.5)$$

จากสมการที่ (5.5) สามารถคำนวณค่ากระแสชดเชยได้จากสมการที่ (5.6) ดังนี้

$$i_c(k) = i_c(k-1) + \left(\frac{V_{out}(k) - V_{pcc}(k)}{L_f} \right) \times \Delta t \quad ; \quad k = 1, 2, 3, \dots, L \quad (5.6)$$

โดยที่ Δt คือ ช่วงเวลาการชั่งตัวอย่าง (sampling time)

L คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดของการชั่งตัวอย่าง

สำหรับค่าของ $V_{out}(k)$ ในสมการที่ (5.6) เกิดจากการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับพีดีบีลยูเอ็ม ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ถ้า $output_{FLC} \geq 0.5$ แล้ว กำหนดให้ค่า $V_{out}(k)$ เท่ากับ $+V_{dc}$

กรณีที่ 2 ถ้า $output_{FLC} < 0.5$ แล้ว กำหนดให้ค่า $V_{out}(k)$ เท่ากับ $-V_{dc}$

กรณีที่ 3 ถ้า $output_{FLC}$ ไม่อยู่ในกรณีที่ 1 และ 2 แล้ว กำหนดให้ค่า $V_{out}(k)$

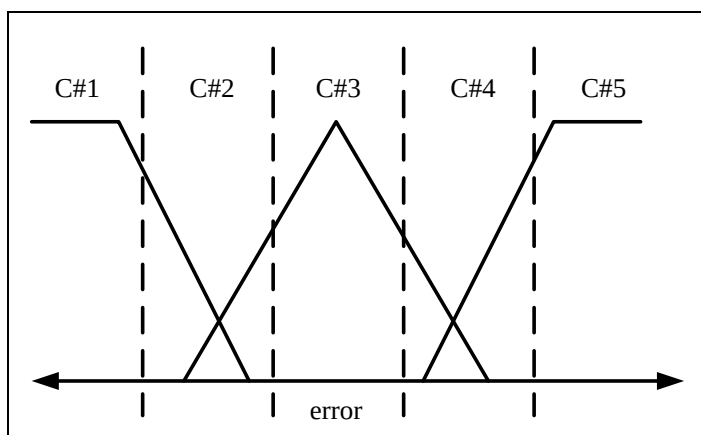
เท่ากับ $V_{out}(k-1)$

หมายเหตุ ค่าแอมพลิจูดของพีดีบีลยูเอ็ม เท่ากับ 0.5 ได้จากการทำการเลือกจากหลาย ๆ ค่า

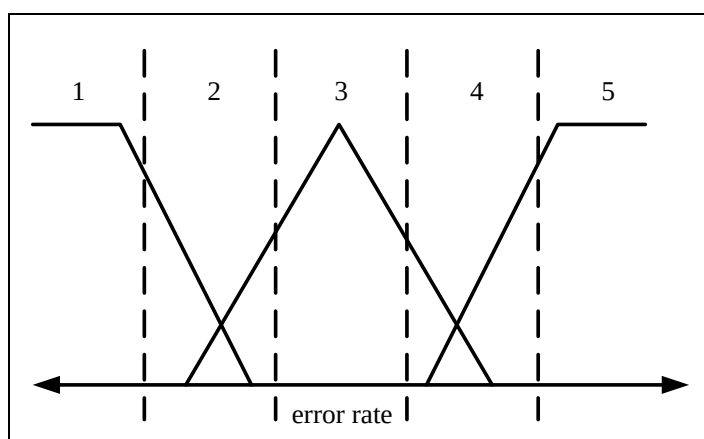
จนกระทั่งได้ค่า เท่ากับ 0.5 ที่เหมาะสมที่สุด โดยค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย (i_c^*)

ได้จากการจำลองสถานการณ์การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟ
ขณะหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากบล็อก fuzzy logic control ดังรูปที่ 5.7 ทำการเขียนโปรแกรมของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ซึ่งดูได้จากภาคผนวก ก. และเปรียบเทียบเอาต์พุตของโปรแกรมที่เขียนขึ้นกับเอาต์พุตที่ได้จาก fuzzy logic toolbox ซึ่งมีเงื่อนไขในการตรวจสอบดังรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 ดังนี้



รูปที่ 5.8 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาด



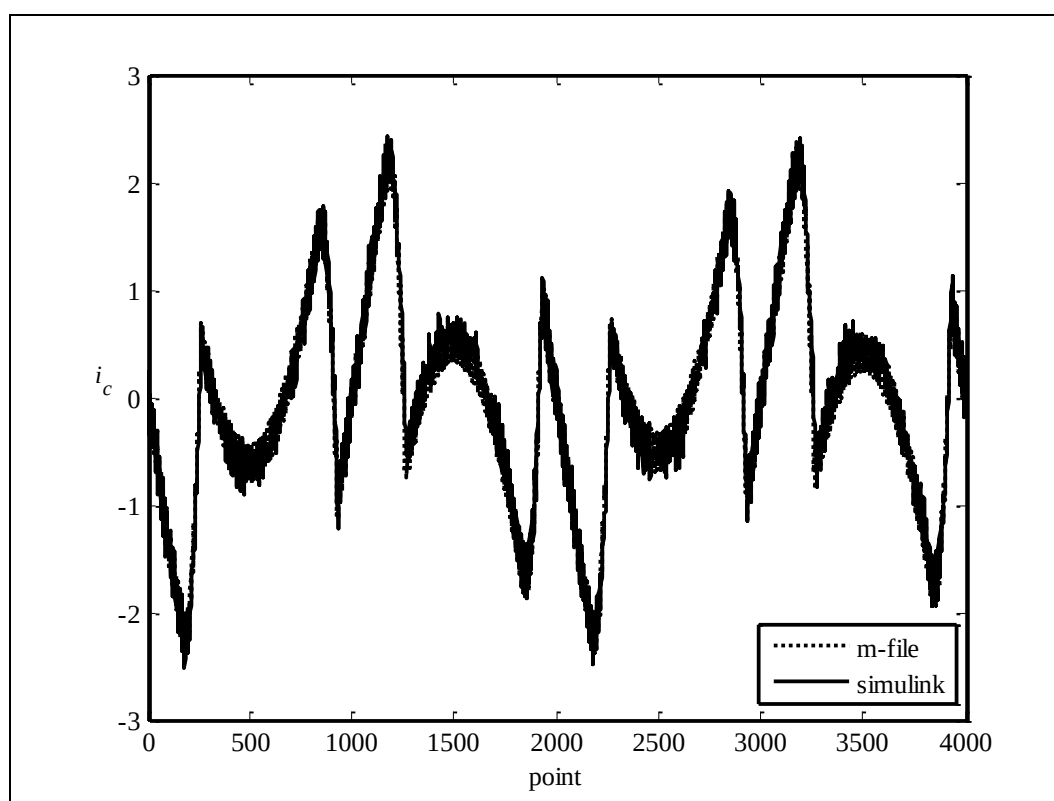
รูปที่ 5.9 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด

จากกรณีต่าง ๆ ตามรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 สามารถพิจารณาได้ตามตารางที่ 5.1 จะสังเกตได้ว่าถ้าค่า error เท่ากับ -1.85 จะอยู่ในกรณี C#1 และค่า error rate เท่ากับ -0.3 อยู่ในกรณีที่ 2 ดังนั้นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกบน simulink เท่ากับ -0.61 เมื่อเทียบกับค่าเอาต์พุตบน m - file เท่ากับ -0.6051 มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อค่า error เท่ากับ -0.02 จะอยู่ในกรณี C#3 และค่า error rate เท่ากับ -0.5 อยู่ในกรณีที่ 1 ดังนั้นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกบน simulink เท่ากับ -0.73 เมื่อเทียบกับค่าเอาต์พุตบน m - file เท่ากับ -0.7277 จะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโปรแกรมที่เขียนขึ้นน่าเชื่อถือได้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิก

case		error	error rate	output - simulink	output - m-file
C#1	1	-1.85	-0.7	-0.81	-0.8082
	2	-1.85	-0.3	-0.61	-0.6051
	3	-1.85	-0.023	-0.8	-0.7964
	4	-1.85	0.28	-0.62	-0.6150
	5	-1.85	0.7	-0.81	-0.8082
C#2	1	-0.8	-0.6	-0.56	-0.5561
	2	-0.8	-0.39	-0.56	-0.5561
	3	-0.8	0.1	-0.01	-0.0154
	4	-0.8	0.29	0.33	0.3235
	5	-0.8	0.5	0.55	0.5475
C#3	1	-0.02	-0.5	-0.73	-0.7277
	2	-0.02	-0.32	-0.61	-0.6089
	3	-0.02	-0.09	-0.04	-0.0404
	4	-0.02	0.26	0.61	0.6016
	5	-0.02	0.49	0.81	0.8082
C#4	1	0.96	-0.8	0.56	0.5575
	2	0.96	-0.35	0.56	0.5575
	3	0.96	0.026	0.56	0.5575
	4	0.96	0.34	0.56	0.5575
	5	0.96	0.7	0.56	0.5575
C#5	1	1.6	-0.55	0.8	0.7977
	2	1.6	-0.27	0.64	0.6360
	3	1.6	-0.15	0.76	0.7506
	4	1.6	0.35	0.69	0.6824
	5	1.6	0.58	0.86	0.8558

จากนั้นพิจารณาการเปรียบเทียบค่ากระแสชดเชยจริงที่ได้จาก m - file กับ simulink ได้จากรูปที่ 5.10 และการเปรียบเทียบค่า W ที่ได้จากระบบ m - file กับค่า %THD ที่ได้จากระบบ simulink ได้ตามตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบค่ากระแสชดเชยจริงบน m - file เทียบกับ simulink

ตารางที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบระบบบน m – file กับ simulink

ชุดข้อมูล	m-file (W)	Simulink (%THD)
1	0.1783	3.0208
2	0.1540	1.9525
3	0.0417	1.1022

จากรูปที่ 5.10 สังเกตได้ว่ารูปสัญญาณของกระแสชดเชยจริงที่ได้จากทั้ง m - file และ simulink มีลักษณะรูปสัญญาณที่ใกล้เคียงกันจึงเชื่อได้ว่าระบบบน m - file ที่จำลองขึ้นมีความ

ใกล้เคียงกับระบบบน simulink และจากตารางที่ 5.2 สังเกตได้ว่าเมื่อค่า W ของข้อมูลทั้ง 3 ชุดของระบบบน m - file มีค่าลดลง ค่า %THD ของระบบบน simulink ก็จะมีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นกัน

5.4 การกำหนดขอบเขตการค้นหาของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การกำหนดขอบเขตของการค้นหาด้วยวิธี ATS เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากมีผลต่อจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหา ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดการปรับขอบเขตของพารามิเตอร์ทั้ง 21 ตัวให้เป็นไปตามรูปที่ 4.17 ในบทที่ 4 โดยจะกำหนดขอบเขตการค้นหาให้ครอบคลุมชุดข้อมูลที่ 3 ตามตารางที่ 4.6 ถึง ตารางที่ 4.8 หากคำตอบที่ได้ชนขอบด้านใดก็จะทำการขยายขอบเขตด้านนั้นออกไป เมื่อคำตอบที่ได้ไม่ชนขอบด้านใดจะใช้ขอบเขตการค้นหานั้นในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี ATS ต่อไป ซึ่งผลการกำหนดขอบเขตการค้นหาสามารถพิจารณาได้ตามตารางที่ 5.3 และตารางที่ 5.4 ดังนี้

ตารางที่ 5.3 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case I และ case II

Parameters	case I		case II	
	limits	result	limits	result
error				
<i>neg3</i>	[-1, -0.4,]	-0.4886	[-1, -0.35]	-0.5204
<i>neg4</i>	[-0.3, 0]	-0.1587	[-0.25, 0]	-0.1998
<i>zero1</i>	[-0.4, -0.3]	-0.3273	[-0.35, -0.25]	-0.2888
<i>zero2</i>	[0, 0.3]	0.0321	[0, 0.2]	0.0413
<i>zero3</i>	[0.4, 0.6]	0.4027	[0.31, 0.5]	0.3100
<i>pos1</i>	[0.3, 0.4]	0.3036	[0.2, 0.31]	0.2040
<i>pos2</i>	[0.6, 1]	0.6281	[0.5, 1]	0.5213
error rate				
<i>n3</i>	[-1, -0.7]	-0.9362	[-1, -0.6]	-0.7411
<i>n4</i>	[-0.5, -0.3]	-0.3761	[-0.5, -0.2]	-0.4234
<i>z1</i>	[-0.7, -0.5]	-0.5694	[-0.6, -0.5]	-0.5957
<i>z2</i>	[-0.3, 0.2]	-0.1970	[-0.2, 0.1]	-0.0165
<i>z3</i>	[0.3, 0.5]	0.4300	[0.24, 0.5]	0.4003
<i>p1</i>	[0.2, 0.3]	0.2311	[0.1, 0.24]	0.1818

ตารางที่ 5.3 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case I และ case II (ต่อ)

Parameters	case I		case II	
	limits	result	limits	result
error rate				
$p2$	[0.5, 1]	0.7855	[0.5, 1]	0.9388
output				
$dec3$	[-1, -0.6]	-0.8947	[-1, -0.6]	-0.6336
$dec4$	[-0.4, -0.2]	-0.3490	[-0.3, -0.1]	-0.1634
$cons1$	[-0.6, -0.4]	-0.4678	[-0.6, -0.3]	-0.3857
$cons2$	[-0.2, 0.3]	0.1616	[-0.1, 0.2]	0.0055
$cons3$	[0.5, 0.7]	0.5537	[0.4, 0.6]	0.5057
$inc1$	[0.3, 0.5]	0.3362	[0.2, 0.4]	0.3720
$inc2$	[0.7, 1]	0.8665	[0.6, 1]	0.6521
W	0.01711		0.01678	
%THD _a	0.9805		0.9363	

ตารางที่ 5.4 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case III และ case IV

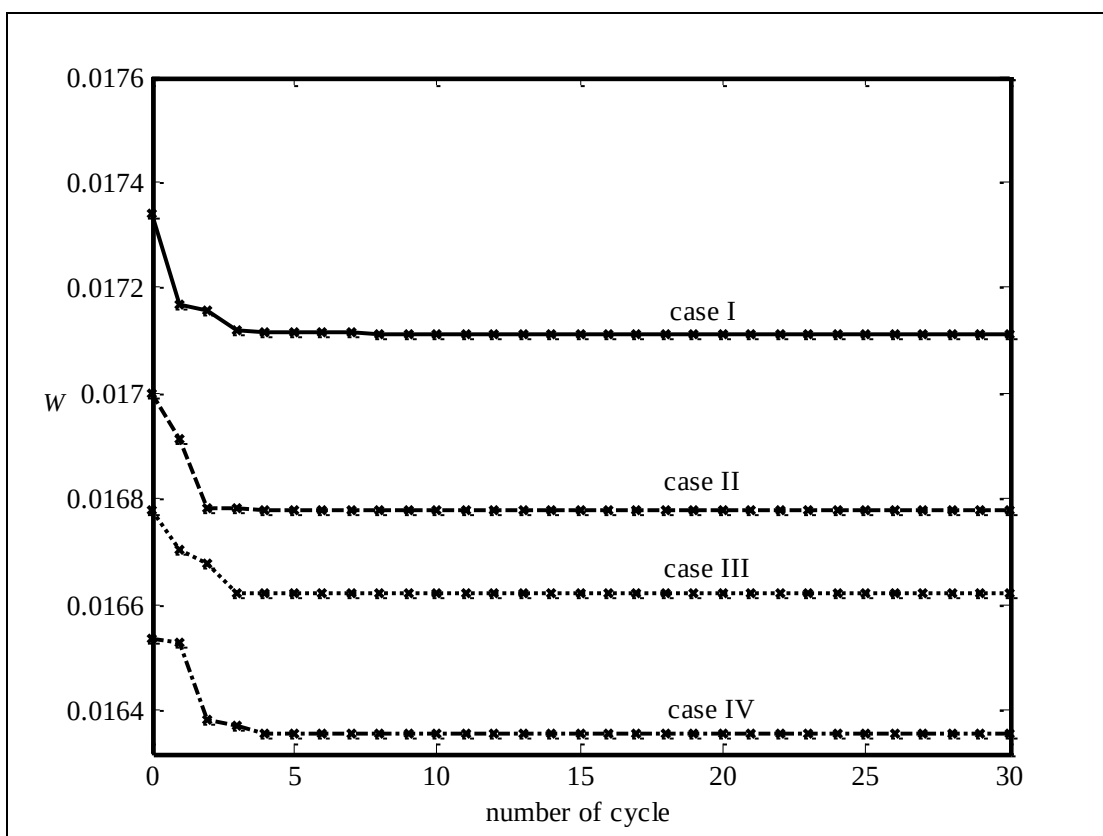
Parameters	case III		case IV	
	limits	result	limits	result
error				
$neg3$	[-1, -0.35]	-0.5558	[-1, -0.35]	-0.9070
$neg4$	[-0.25, 0]	-0.0831	[-0.18, 0]	-0.0270
$zero1$	[-0.35, -0.25]	-0.2610	[-0.35, -0.18]	-0.3042
$zero2$	[0, 0.12]	0.0283	[0, 0.09]	0.0381
$zero3$	[0.25, 0.45]	0.2513	[0.19, 0.45]	0.2137
$pos1$	[0.12, 0.25]	0.1516	[0.09, 0.19]	0.1269
$pos2$	[0.45, 1]	0.9338	[0.45, 1]	0.6558
error rate				
$n3$	[-1, -0.65]	-0.8521	[-1, -0.65]	-0.7633
$n4$	[-0.5, -0.2]	-0.3611	[-0.43, -0.2]	-0.3483

ตารางที่ 5.4 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case III และ case IV (ต่อ)

Parameters	case III		case IV	
	limits	result	limits	result
error rate				
<i>z1</i>	[-0.65, -0.5]	-0.5090	[-0.65, -0.43]	-0.5905
<i>z2</i>	[-0.2, 0.1]	-0.0325	[-0.2, 0.1]	0.0317
<i>z3</i>	[0.24, 0.65]	0.5324	[0.24, 0.6]	0.3148
<i>p1</i>	[0.1, 0.24]	0.1908	[0.1, 0.24]	0.2042
<i>p2</i>	[0.65, 1]	0.6670	[0.6, 1]	0.7677
output				
<i>dec3</i>	[-1, -0.48]	-0.6437	[-1, -0.48]	-0.7774
<i>dec4</i>	[-0.2, -0.08]	-0.1396	[-0.2, -0.08]	-0.1355
<i>cons1</i>	[-0.48, -0.2]	-0.3865	[-0.48, -0.2]	-0.3087
<i>cons2</i>	[-0.08, 0.2]	0.0812	[-0.08, 0.2]	0.0241
<i>cons3</i>	[0.4, 0.58]	0.5571	[0.4, 0.63]	0.5356
<i>inc1</i>	[0.2, 0.4]	0.3559	[0.2, 0.4]	0.3668
<i>inc2</i>	[0.58, 1]	0.7605	[0.63, 1]	0.7310
<i>W</i>	0.01662		0.01635	
%THD _a	0.9098		0.8659	

จากตารางที่ 5.3 และตารางที่ 5.4 จะสังเกตได้ว่าการตั้งขอบเขตของ case I จะกำหนดให้ครอบคลุมข้อมูลชุดที่ 3 ตามตารางที่ 4.6 ถึง ตารางที่ 4.8 โดยผลการทดสอบจะระบุเข้าหาค่า *W* ที่ค่าเท่ากับ 0.01711 ที่รอบการค้นหาเท่ากับ 30 รอบ และส่งผลให้ค่า %THD_a เท่ากับ 0.9805% ดังรูปที่ 5.11 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์บางตัวของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกใกล้กับขอบเขตในการค้นหา เช่น กรณีอินพุตคือ error ค่าพารามิเตอร์ของ *zero3* ได้ผลการค้นหาเท่ากับ 0.4027 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์ค่านี้ มีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตล่าง คือ 0.4 จึงสนใจที่จะพิจารณาในการปรับขอบเขตของพารามิเตอร์ค่านี้เป็นสำคัญ ดังนั้นจึงทำการปรับขอบเขตการค้นหาเป็น case II โดยยังคงรูปร่างตามรูปที่ 4.17 ซึ่งผลการทดสอบจะระบุเข้าหาค่า *W* เท่ากับ 0.01678 ส่งผลให้ค่า %THD_a เท่ากับ 0.8363% โดยค่า *zero2 zero3 pos1 pos2 n3 z1 dec3 dec4 cons1 inc2* มีค่าใกล้กับขอบเขตในการค้นหา เช่น กรณีอินพุตคือ error ค่าพารามิเตอร์

ของ *pos1* ได้ผลการค้นหาเท่ากับ 0.2040 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว มีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตล่างคือ 0.2 ดังนั้นจึงสนใจที่จะปรับขอบเขตการค้นหาใหม่เป็น case III โดยจะลู่เข้าหาค่า W ที่ค่าเท่ากับ 0.01662 ส่งผลให้ค่า %THD_a เท่ากับ 0.9098% ขณะที่ค่าฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ



รูปที่ 5.11 การลู่เข้าหาค่าตอบ W ในกรณีต่าง ๆ

neg4 zero1 zero2 zero3 pos1 z1 p2 cons3 inc2 มีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตในการค้นหา เช่น กรณีอินพุตคือ error rate ค่าพารามิเตอร์ของ *z1* ได้ผลการค้นหาเท่ากับ -0.5090 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว มีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตบนคือ -0.5 จึงสนใจที่จะปรับขอบเขตการค้นหาใหม่เป็น case IV จะสังเกตได้ว่าจะลู่เข้าหาค่า W ที่ค่าเท่ากับ 0.01635 และส่งผลให้ค่า %THD_a เท่ากับ 0.8659% และจากรูปที่ 5.11 จะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการปรับขอบเขตการค้นหาทั้ง 4 กรณีที่รอบการค้นหาเท่ากับ 30 รอบ ขอบเขตในการค้นหาของ case IV จะส่งผลให้ค่า W น้อยสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ ดังนั้นจึงใช้ขอบเขตในการค้นหาของ case IV ในการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของวิธี ATS ต่อไป

5.5 การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว

การค้นหาคำด้วยวิธี ATS ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญด้วยกัน 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาคำด้วยวิธี ATS มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยสามารถพิจารณาผลการทดสอบพารามิเตอร์ทั้ง 4 พารามิเตอร์ โดยใช้ขอบเขตของ case IV ได้ตามตารางที่ 5.5 ถึง ตารางที่ 5.8 ดังนี้

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 5 คำตอบ				
ค่า W	0.016380	0.016380	0.016390	0.016383
จำนวนรอบ	2	2	1	2
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ				
ค่า W	0.016360	0.016480	0.016390	0.016410
จำนวนรอบ	1	1	1	1
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 15 คำตอบ				
ค่า W	0.016360	0.016390	0.016390	0.016380
จำนวนรอบ	1	1	1	1
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ				
ค่า W	0.016370	0.016390	0.016390	0.016383
จำนวนรอบ	1	1	1	1

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ				
ค่า W	0.016360	0.016420	0.016390	0.016390
จำนวนรอบ	1	1	1	1

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง (ต่อ)

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ				
ค่า W	0.016360	0.016370	0.016370	0.016367
จำนวนรอบ	1	1	1	1
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 15 คำตอบ				
ค่า W	0.016360	0.016410	0.016360	0.016377
จำนวนรอบ	1	1	1	1
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ				
ค่า W	0.016410	0.016480	0.016360	0.016417
จำนวนรอบ	1	1	1	1

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น

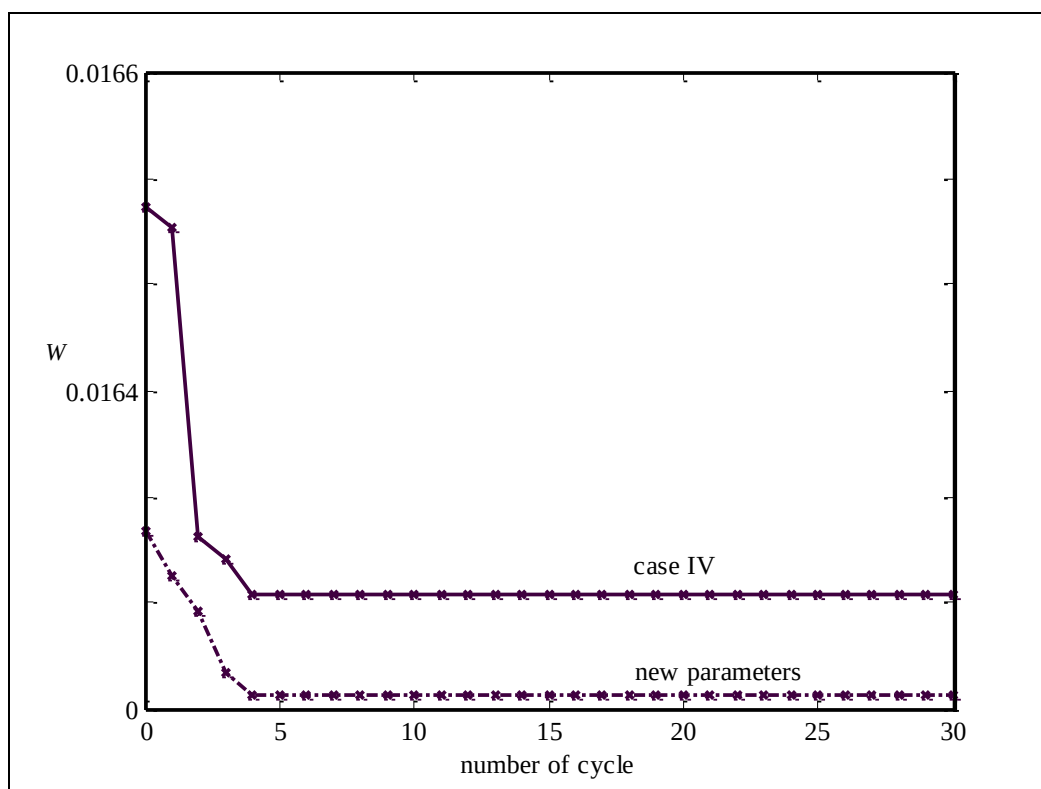
ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5				
ค่า W	0.016360	0.016370	0.016370	0.016367
จำนวนรอบ	1	1	1	1
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1				
ค่า W	0.016380	0.016420	0.016380	0.016393
จำนวนรอบ	1	3	1	2
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 2				
ค่า W	0.016380	0.016390	0.016380	0.016383
จำนวนรอบ	1	5	1	3
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 3				
ค่า W	0.016370	0.016390	0.016380	0.016380
จำนวนรอบ	1	1	1	1

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น (ต่อ)

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 4				
ค่า W	0.016380	0.016380	0.016410	0.016390
จำนวนรอบ	1	1	1	1
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5				
ค่า W	0.016390	0.016460	0.016360	0.016403
จำนวนรอบ	1	4	1	2

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบค่าปรับลดรัศมี

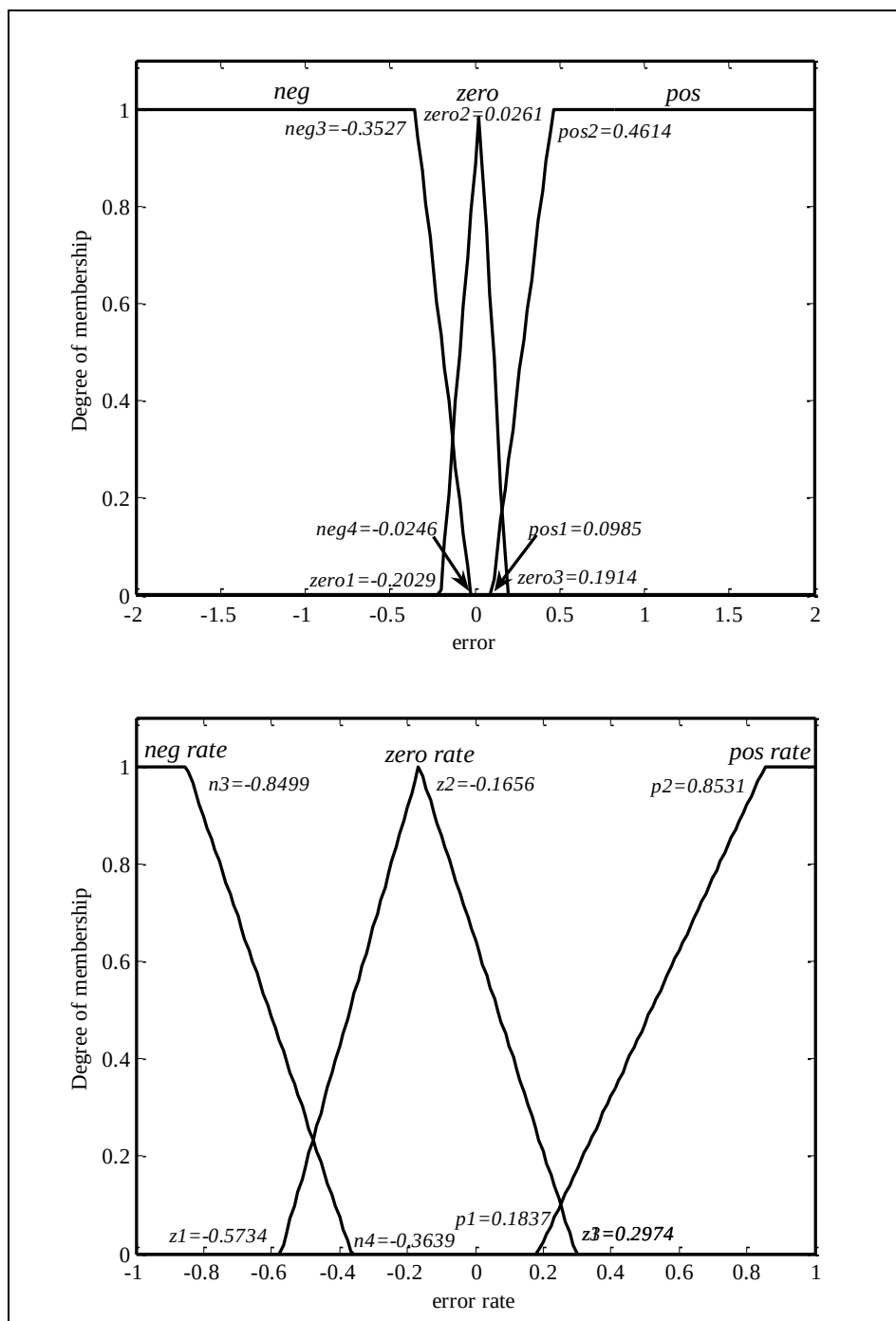
ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1				
ค่า W	0.016360	0.016370	0.016360	0.016363
จำนวนรอบ	1	1	1	1
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2				
ค่า W	0.016360	0.016370	0.016360	0.016363
จำนวนรอบ	1	1	1	1
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3				
ค่า W	0.016360	0.016360	0.016360	0.016360
จำนวนรอบ	1	1	1	1
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4				
ค่า W	0.016360	0.016370	0.016370	0.016367
จำนวนรอบ	1	1	1	1



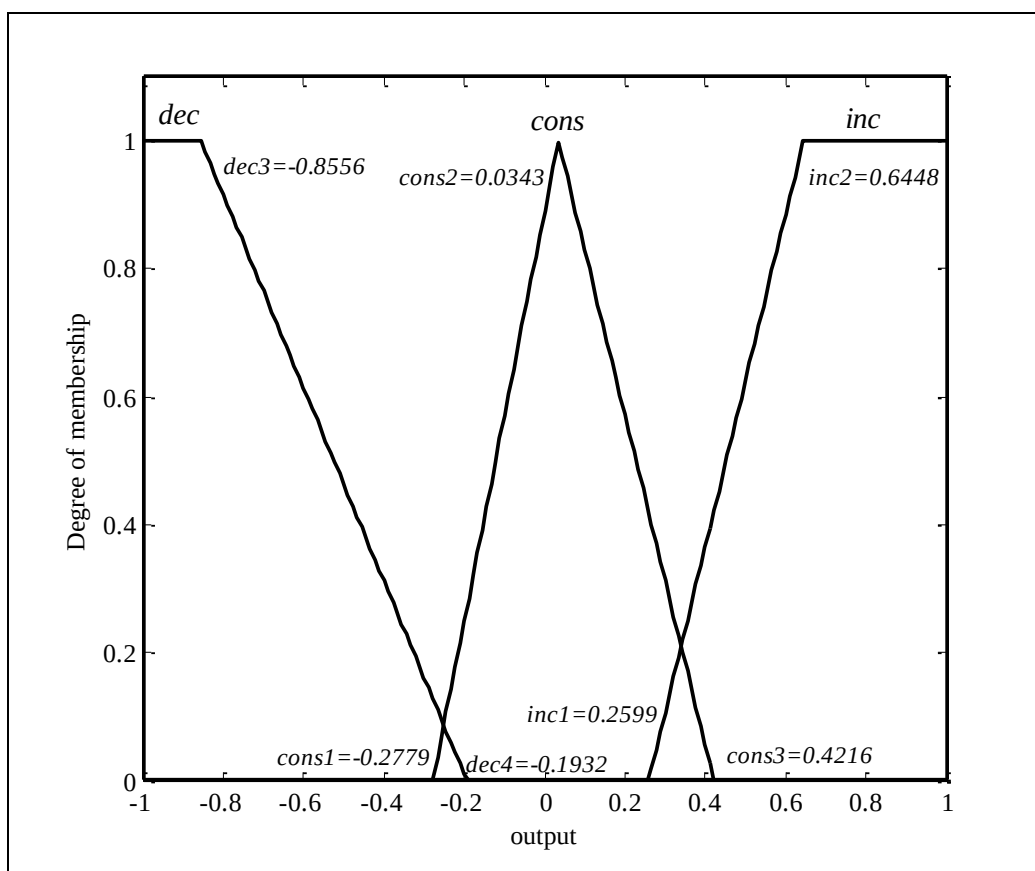
รูปที่ 5.12 การลู่เข้าหาคำตอบ W

จากตารางที่ 5.5 ถึง ตารางที่ 5.8 การเลือกค่าพารามิเตอร์ของ ATS จะใช้เกณฑ์การพิจารณา ค่า W น้อย และจำนวนรอบเฉลี่ยในการเปรียบเทียบความถี่กันไป โดยที่ตารางที่ 5.5 เมื่อพิจารณาที่จำนวนรอบจะมีจำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ 15 คำตอบ และ 20 คำตอบ ที่มีจำนวนรอบเท่ากันคือ 1 รอบ ดังนั้นจึงพิจารณาที่ค่า W ซึ่งค่า W เท่ากับ 0.016380 ที่จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 15 คำตอบน้อยที่สุด ตารางที่ 5.6 เมื่อพิจารณาที่จำนวนรอบจะสังเกตได้ว่าจำนวนรอบเท่ากันทุกคำตอบคือ 1 รอบ ดังนั้นจึงพิจารณาที่ค่า W เท่ากับ 0.016367 ที่จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบจะให้ค่าน้อยที่สุด ตารางที่ 5.7 เมื่อพิจารณาที่จำนวนรอบจะมีค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 3 และ 4 ที่มีจำนวนรอบเท่ากันคือ 1 รอบ ดังนั้นจึงพิจารณาที่ค่า W ซึ่งค่า W เท่ากับ 0.016367 ที่ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 น้อยที่สุด และตารางที่ 5.8 เมื่อพิจารณาที่จำนวนรอบจะสังเกตได้ว่าจำนวนรอบเท่ากันทุกคำตอบคือ 1 รอบ ดังนั้นจึงพิจารณาที่ค่า W เท่ากับ 0.016360 ที่ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 จะให้ค่าน้อยที่สุด โดยผลการทดสอบพารามิเตอร์ของ ATS ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 15 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 และค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 ซึ่งจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะให้ผลการลู่เข้าหาค่า W ตามรูปที่ 5.12 และจากรูป

ดังกล่าว จะสังเกตได้ว่าค่า W เท่ากับ 0.01631 ที่จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 5 รอบ โดยค่า W ของ new parameters จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ case IV ซึ่งไม่มีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และลักษณะฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการค้นหาด้วย ATS พิจารณาได้จากรูปที่ 5.13 ดังนี้



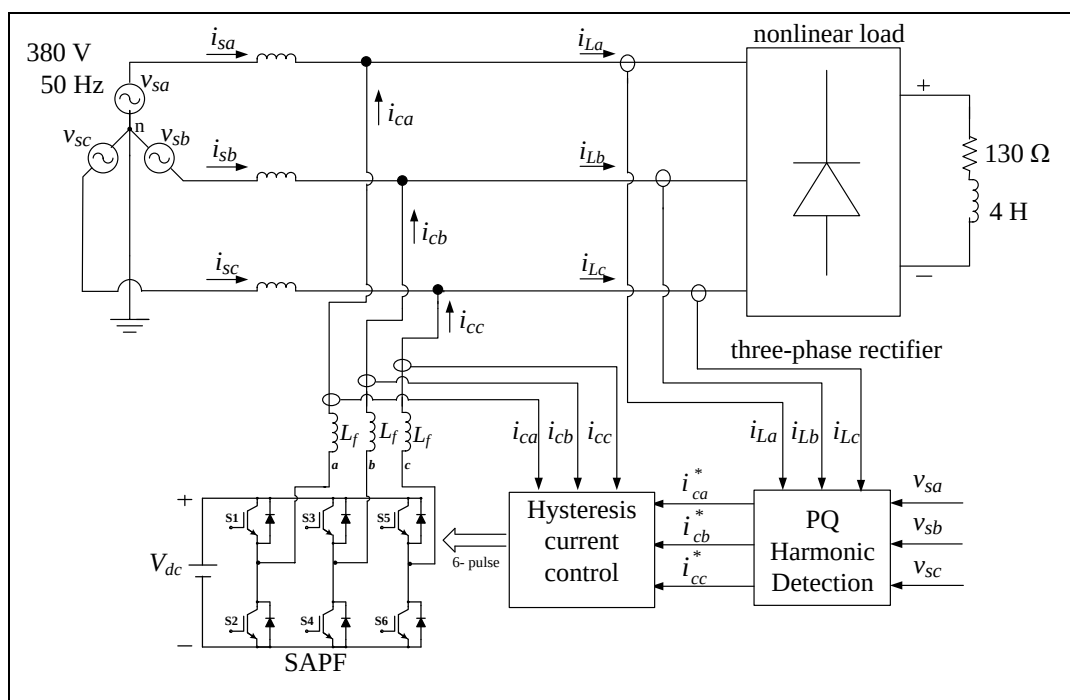
รูปที่ 5.13 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการค้นหาด้วย ATS



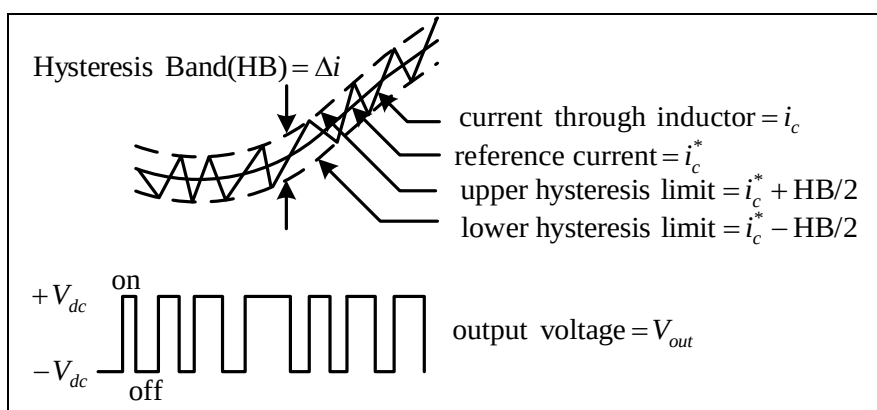
รูปที่ 5.13 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการค้นหาด้วย ATS (ต่อ)

5.6 ทบทวนการควบคุมการฉีดกระแสด้วยวิธีฮิสเทอรีซิส

การควบคุมการฉีดกระแสด้วยวิธีฮิสเทอรีซิส (Hysteresis current control) เป็นวิธีที่สามารถควบคุมการฉีดกระแสได้อย่างได้ผล โดย ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ (2553) ได้มีการนำเสนอวิธีดังกล่าวในการควบคุมการฉีดกระแสของวงจรรอกกำลังแอคทีฟแบบขนาน ซึ่งโครงสร้างระบบดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.14



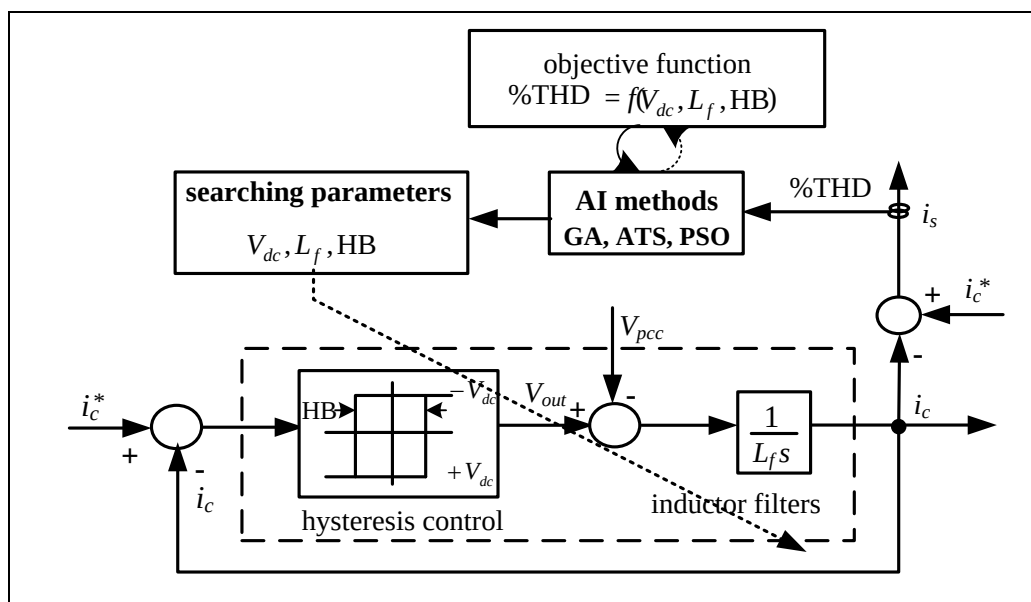
รูปที่ 5.14 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนาน



รูปที่ 5.15 ลักษณะการควบคุมรูปคลื่นสัญญาณด้วยวิธีฮิสเตอร์ซิส

จากรูปที่ 5.14 จะสังเกตได้ว่าระบบดังกล่าวเป็นระบบเดียวกับวิธีการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิกในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งมีการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ เช่นเดียวกัน โดยการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานให้เป็นไปตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกจะใช้บล็อก

Hysteresis current control ซึ่งลักษณะการควบคุมรูปสัญญาณของกระแสชดเชยด้วยบล็อกดังกล่าว สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.15 จากรูปดังกล่าว จะสังเกตได้ว่าแถบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Band: HB) คือ ขอบเขตการสวิงของกระแสชดเชย (i_c) ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างของฮิสเทอรีซิส ซึ่งกระแสชดเชยดังกล่าว สามารถมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงได้โดยอาศัยการควบคุมการทำงานของสวิตช์ไอจีบีที เมื่อพิจารณาการทำงานในกรณีหนึ่งเฟสถ้าไอจีบีทีตัวบนนำกระแสและไอจีบีทีตัวล่างหยุดนำกระแสจะทำให้กระแสชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าขอบเขตบนของฮิสเทอรีซิส (upper hysteresis limit) ไอจีบีทีตัวบนก็จะหยุดนำกระแสในขณะที่ไอจีบีทีตัวล่างนำกระแสแทนส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าลดลง เมื่อค่ากระแสลดลงจนถึงค่าขอบเขตล่างของฮิสเทอรีซิส (lower hysteresis limit) ไอจีบีทีตัวบนก็จะนำกระแสและไอจีบีทีตัวล่างจะหยุดนำกระแสอีกครั้ง โดยจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ตลอดการทำงาน ผลจากการทำงานของไอจีบีทีดังกล่าว จึงทำให้กระแสชดเชยมีการสวิงอยู่ภายในแถบฮิสเทอรีซิส โดยมีลักษณะรูปสัญญาณเป็นไปตามรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย (i_c^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับค่าความถี่สวิตช์ของสัญญาณพัลส์ในรูปที่ 5.15 จะขึ้นอยู่กับกรอกแบบค่าแถบฮิสเทอรีซิส (HB) ค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) และค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f)



รูปที่ 5.16 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน
โดยใช้วิธีการค้นหาทางปัญญาระดับสูง

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ของ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ จึงได้มีการออกแบบพารามิเตอร์ดังกล่าวด้วยวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ 3 วิธี ได้แก่ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว และวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค โดยผลการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟของทั้งสามวิธีดังกล่าวจะถูมาเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบของ Ingram และ Round ซึ่งโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.16 จากรูปดังกล่าว แสดงโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ทั้ง 3 วิธีดังกล่าว มาใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ V_{dc} ค่า L_f และค่า HB ที่เหมาะสมสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาคือ ค่า %THD ที่น้อยที่สุดของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (i_s) หลังการชดเชย ซึ่งค่า L_f มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเทียบกับเวลาตามสมการที่ (5.4) และใช้สมการที่ (5.6) คำนวณหาค่ากระแสชดเชย (i_c) ในการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานเช่นเดียวกัน โดยผลจากการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟของทั้งสามวิธีดังกล่าวพบว่า วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวให้ผลการออกแบบดีที่สุด ซึ่งสามารถพิจารณาผลการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟของวิธีการของ Ingram และ Round และวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวได้ดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกรณีการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานโดยใช้วิธีการของ Ingram และ Round และ วิธี ATS

พารามิเตอร์ของ APF	วิธีการออกแบบ APF	
	วิธีการของ Ingram และ Round	วิธี ATS
V_{dc} (V)	600	750
L_f (H)	0.2361	0.039
HB (A)	0.0056	0.0057
ค่า %THD ก่อนชดเชย	24.3973	
ค่า %THD หลังชดเชย	1.4176	0.9159

จากตารางที่ 5.9 จะสังเกตได้ว่าผลการกำจัดฮาร์มอนิกกรณีวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานออกแบบโดยใช้วิธีการของ Ingram และ Round ค่า %THD ของ i_{sd} หลังการชดเชยได้เท่ากับ

1.4176% และกรณีการออกแบบใช้วิธี ATS ค่า %THD หลังการชดเชยได้ค่าเท่ากับ 0.9159% จากค่าดังกล่าว สังเกตได้ว่าค่า %THD กรณีการออกแบบโดยใช้วิธี ATS มีค่าน้อยกว่ากรณีการออกแบบที่ใช้วิธีการของ Ingram และ Round อย่างไรก็ตามค่า %THD ของทั้งสองวิธียังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ IEEE Std. 519-1992 และน้อยกว่าค่า %THD ก่อนมีการชดเชย ดังนั้นในการควบคุมการบิดกระแสชดเชยด้วยวิธีฮิสเตอร์ซิสจึงใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS คือค่า V_{dc} เท่ากับ 750 V ค่า L_f เท่ากับ 0.039 H และค่า HB เท่ากับ 0.0057 A ที่ให้ค่า %THD น้อยที่สุด เท่ากับ 0.9159%

5.7 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

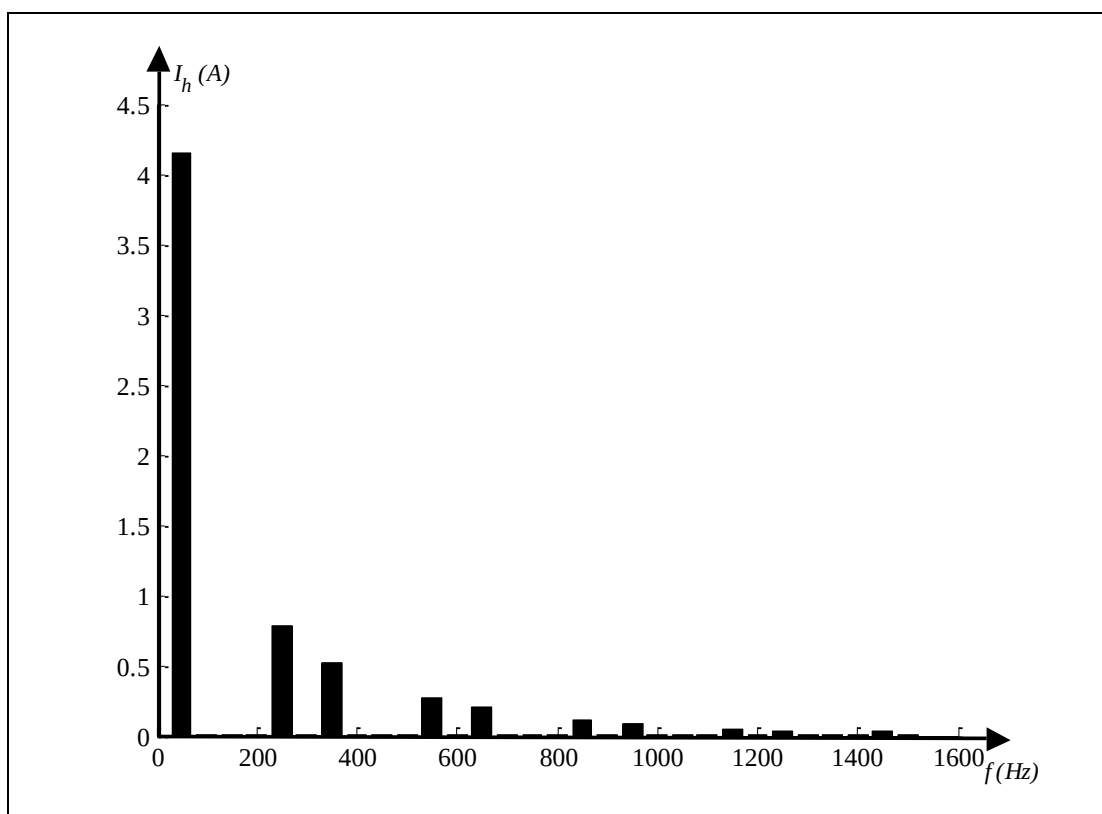
การจำลองสถานการณ์การปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมการบิดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยวิธี ATS ในส่วนของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกใช้การอนุมานฟัซซีแบบแมกดันด้วยวิธีค่าสูงสุด - ต่ำสุด และฟัซซีฟิเคชันด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่มีการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งหมด 21 พารามิเตอร์ด้วยวิธี ATS กับวิธีฮิสเตอร์ซิสที่มีการออกแบบพารามิเตอร์ V_{dc} , L_f และ HB ด้วยวิธี ATS ที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.6 โดยผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการบิดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานของตัวควบคุมสามารถพิจารณาได้ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม

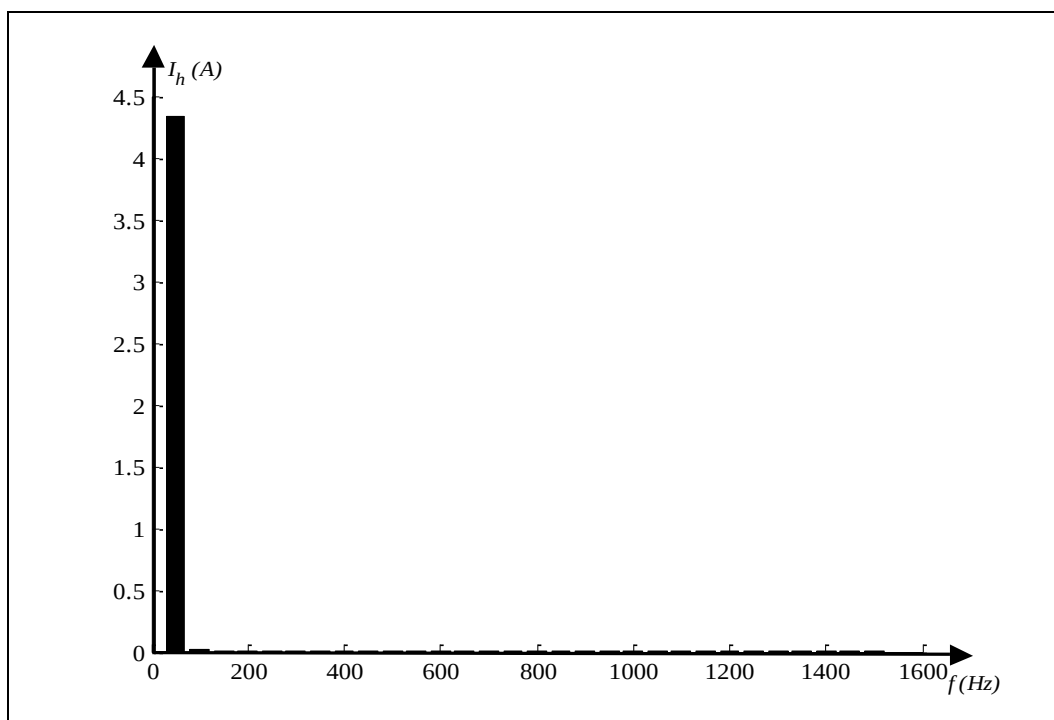
%THD _{av} ของกระแสไฟฟ้า	ชนิดของตัวควบคุมกระแสชดเชย		
	FLC	FLC + ATS	Hysteresis + ATS
%THD _{av} หลังการชดเชย	1.1243%	0.8767%	0.9159%
%THD _{av} ก่อนการชดเชย	24.3973%		

จากตารางที่ 5.10 นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในบทที่ 4 (FLC) การปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกด้วยวิธี ATS ในบทนี้ (FLC+ATS) และวิธีฮิสเตอร์ซิสที่มีการออกแบบพารามิเตอร์ V_{dc} , L_f และ HB ด้วยวิธี ATS ในหัวข้อที่ 5.6 (Hysteresis + ATS) จะสังเกตได้ว่ากรณีตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (FLC) ค่า %THD_{av} หลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 1.1243% กรณีตัวควบคุม FLC + ATS ค่า %THD_{av} หลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ

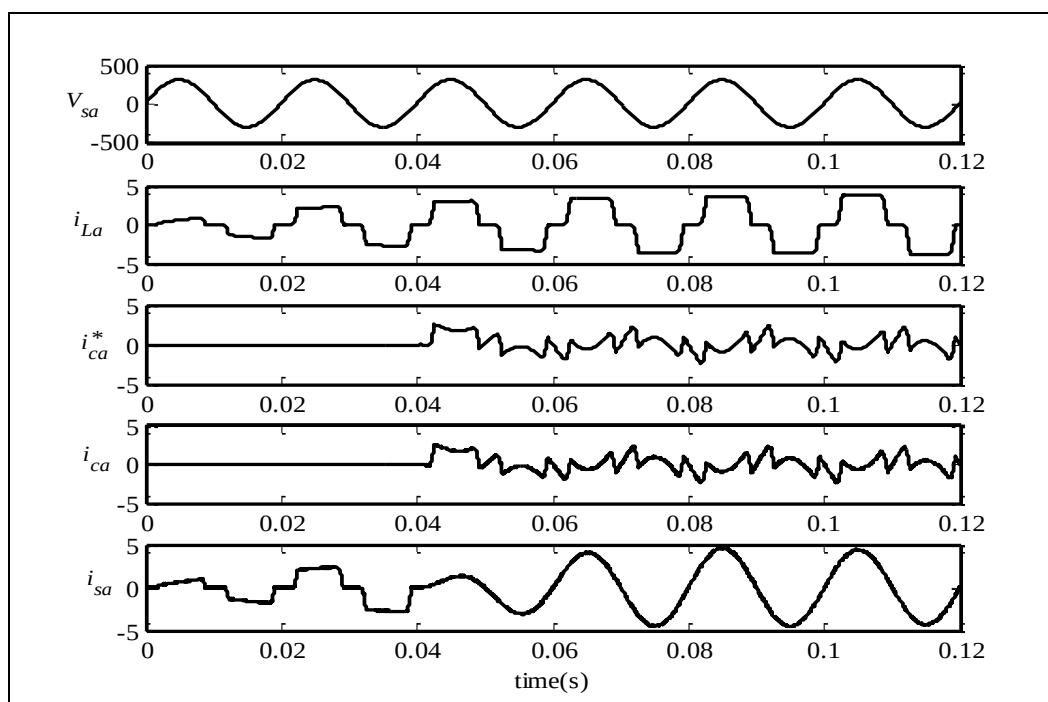
0.8767% และกรณีตัวควบคุม Hysteresis + ATS ค่า $\%THD_{av}$ หลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0.9159% จากค่า $\%THD_{av}$ ดังกล่าว สังเกตได้ว่าค่า $\%THD_{av}$ กรณีตัวควบคุม FLC + ATS มีค่าน้อยที่สุด และน้อยกว่าค่า $\%THD_{av}$ ก่อนการชดเชยที่มีค่าเท่ากับ 24.3973% โดยเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 และสามารถพิจารณาสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ก่อนและหลังการฉีดกระแสชดเชยได้ดังรูปที่ 5.17 และรูปที่ 5.18 ซึ่งจากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่าเมื่อทำการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกจะพบว่า ฮาร์มอนิกอันดับเลขคู่จะถูกกำจัดออกไป โดยปริมาณกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับจะมีปริมาณลดน้อยลง ซึ่งรูปสัญญาณกระแสก่อนและหลังการชดเชยกรณีเฟส a เฟส b และ เฟส c พิจารณาได้ตามรูปที่ 5.19 รูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21 ณ ลำดับดังนี้



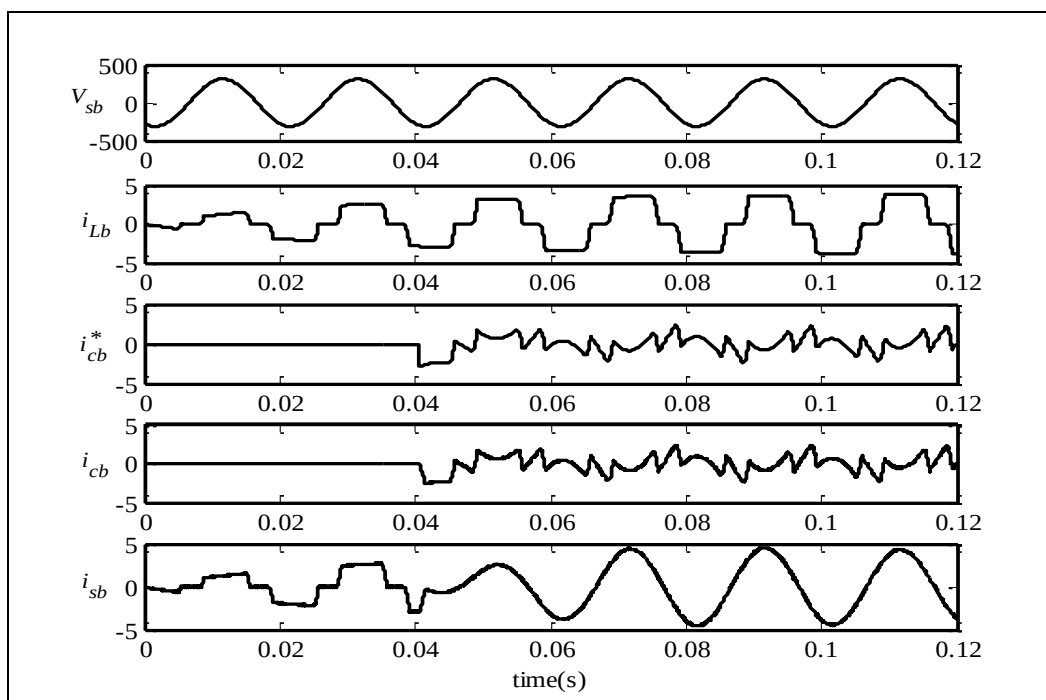
รูปที่ 5.17 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ก่อนมีการฉีดกระแสชดเชย



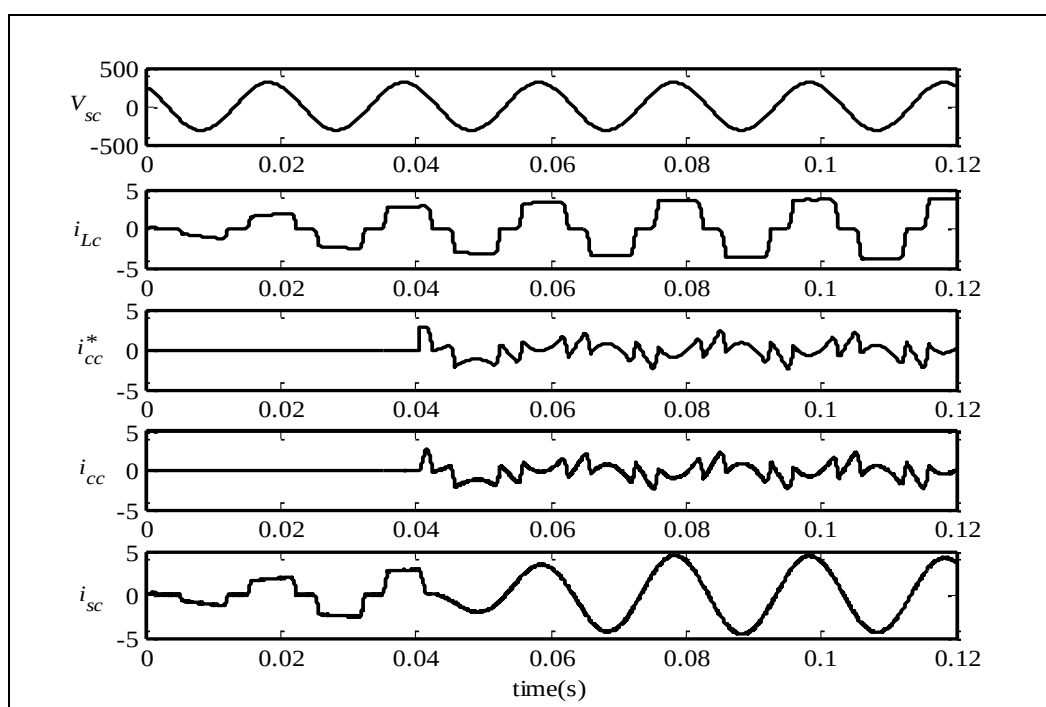
รูปที่ 5.18 สเปกตรัมของกระแสฮาร์โมนิกลำดับต่าง ๆ หลังมีการฉีดกระแสชดเชย



รูปที่ 5.19 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส a



รูปที่ 5.20 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส *b*



รูปที่ 5.21 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส *c*

จากรูปที่ 5.19 ถึง รูปที่ 5.21 ช่วงเวลา 0 - 0.04 วินาที ยังไม่มีการฉีดกระแสชดเชยให้แก่ระบบ ต่อมาที่ช่วงเวลา 0.04 - 0.12 วินาที วงจรกรองกำลังแอกทีฟจะฉีดกระแสชดเชยจริงซึ่งมีรูปสัญญาณเป็นไปตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก จะสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักหลังการชดเชยทั้งสามเฟส (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น เมื่อเทียบกับรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายก่อนมีการชดเชยจะมีลักษณะรูปสัญญาณเหมือนกับกระแสไฟฟ้าทางด้านโหลด (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) โดยค่า %THD หลังการทดสอบของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกรณีเฟส a มีค่าเท่ากับ 0.8652% กรณีเฟส b เท่ากับ 0.8835% และกรณีเฟส c เท่ากับ 0.8814% นอกจากนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้มีการเปรียบเทียบวิธีการดีฟัซซิฟิเคชันและการอนุมานแบบฟัซซีว่าวิธีใดให้ผลในการควบคุมระบบได้ดีที่สุด ซึ่งจะพิจารณาเปรียบเทียบ 4 วิธี ได้แก่ วิธีโบเชกเตอร์ (BOA) วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (MOM) วิธีหาค่าน้อยสุดของค่าสูงสุด (SOM) และวิธีหาค่ามากที่สุดของค่าสูงสุด (LOM) ซึ่งพิจารณาได้ดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 การเปรียบเทียบค่า %THD เฉลี่ย กับวิธีการดีฟัซซิฟิเคชันแบบต่าง ๆ

วิธี	การอนุมานแบบแมมดานิ	
	ค่าสูงสุด - ต่ำสุด	ค่าสูงสุด - ผลคูณ
BOA	0.8841	0.8972
MOM	0.8767	0.8910
SOM	1.7942	0.8883
LOM	0.9055	0.9018

จากตารางที่ 5.11 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบการอนุมานแบบแมมดานิด้วยวิธีค่าสูงสุด - ต่ำสุด และวิธีค่าสูงสุด - ผลคูณ กับวิธีการดีฟัซซิฟิเคชันทั้ง 4 วิธี จะพบว่าการอนุมานแบบแมมดานิด้วยวิธีค่าสูงสุด - ต่ำสุด ที่มีการดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธี MOM ให้ผลดีที่สุดที่ค่า %THD เฉลี่ยเท่ากับ 0.8767%

5.8 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์คือ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งเป็น

อัลกอริทึมการค้นหาที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง โดยจะพบว่าการกำหนดขอบเขตของการค้นหา และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธี ATS ให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการค้นหา โดยค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่เหมาะสมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 15 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ ค่าเริ่มเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 และค่าปรับลดเริ่มเท่ากับ 1.3 โดยฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพในการค้นหาด้วยวิธี ATS ส่งผลให้ค่า %THD ลดลงตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 เท่ากับ 0.8767% และจากการเปรียบเทียบสมรรถนะของ ตัวควบคุมจะพบว่ากรณีตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่มีการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ ทั้งหมด 21 พารามิเตอร์ด้วยวิธี ATS (FLC + ATS) มีสมรรถนะการควบคุมการบิดกระแสชดเชย ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในบทที่ 4 (FLC) และกรณีควบคุมด้วยวิธี ฮิสเทอรีซิสที่มีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ V_{dc} , L_f และ HB ด้วยวิธี ATS (Hysteresis + ATS) อีกด้วย นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบวิธีการดีฟัซซิฟิเคชันและการอนุมานแบบฟัซซีพบว่า การอนุมานแบบแมกดันด้วยวิธีค่าสูงสุด - ต่ำสุด ที่มีการดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธี MOM ให้ผลดีที่สุดในที่ค่า %THD เฉลี่ยเท่ากับ 0.8767% ในบทต่อไปผู้วิจัยจะนำเสนอตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับ ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานต่อไป

บทที่ 6

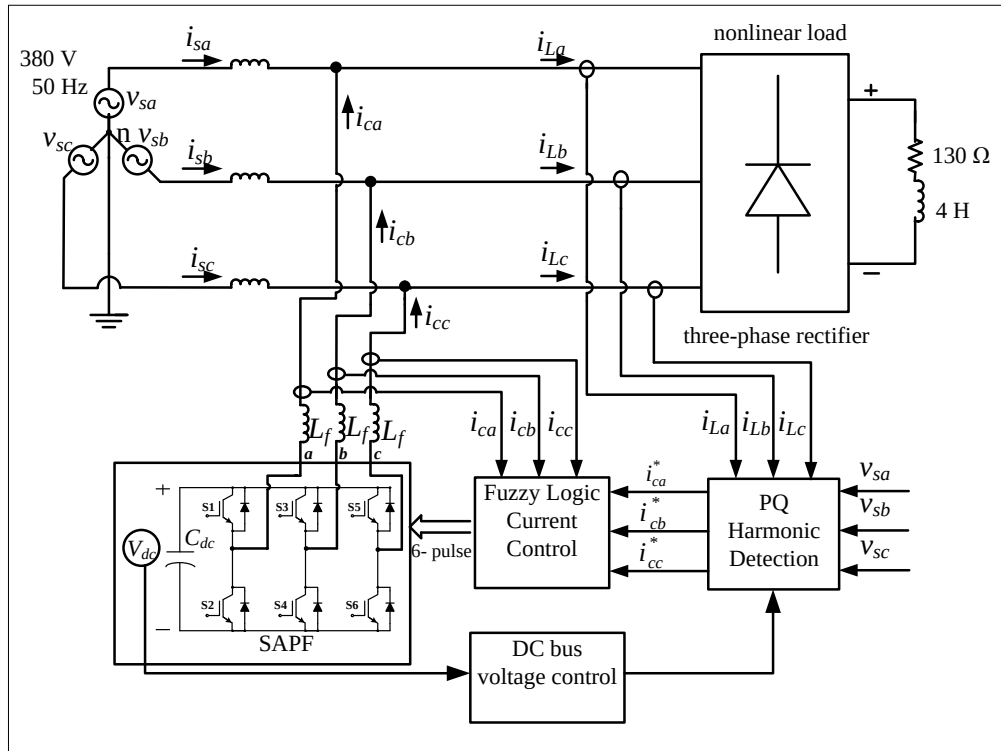
การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

6.1 บทนำ

การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการกำจัดฮาร์มอนิก การคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของตัวเก็บประจุให้มีค่าคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้จะส่งผลต่อสมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนาน ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่ใช้วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด และดีฟัซซีฟิเคชันด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด ดัชนีชี้วัดสมรรถนะของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกนี้ จะดูที่ %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย และดูที่ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันบัลไฟตรงที่ต้องการกับแรงดันบัลไฟตรงจริง นอกจากนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งการยืนยันผลการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวจะใช้การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยรายละเอียดทั้งหมดรวมถึงการอภิปรายผลได้นำเสนอไว้ในบทนี้ด้วยเช่นกัน

6.2 การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนาน

การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนานจะใช้ระบบเดียวกันกับการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกตามรูปที่ 4.1 ในบทที่ 4 แต่ต่างกันที่การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนานจะเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวเก็บประจุ ซึ่งพิจารณาได้ดังรูปที่ 6.1

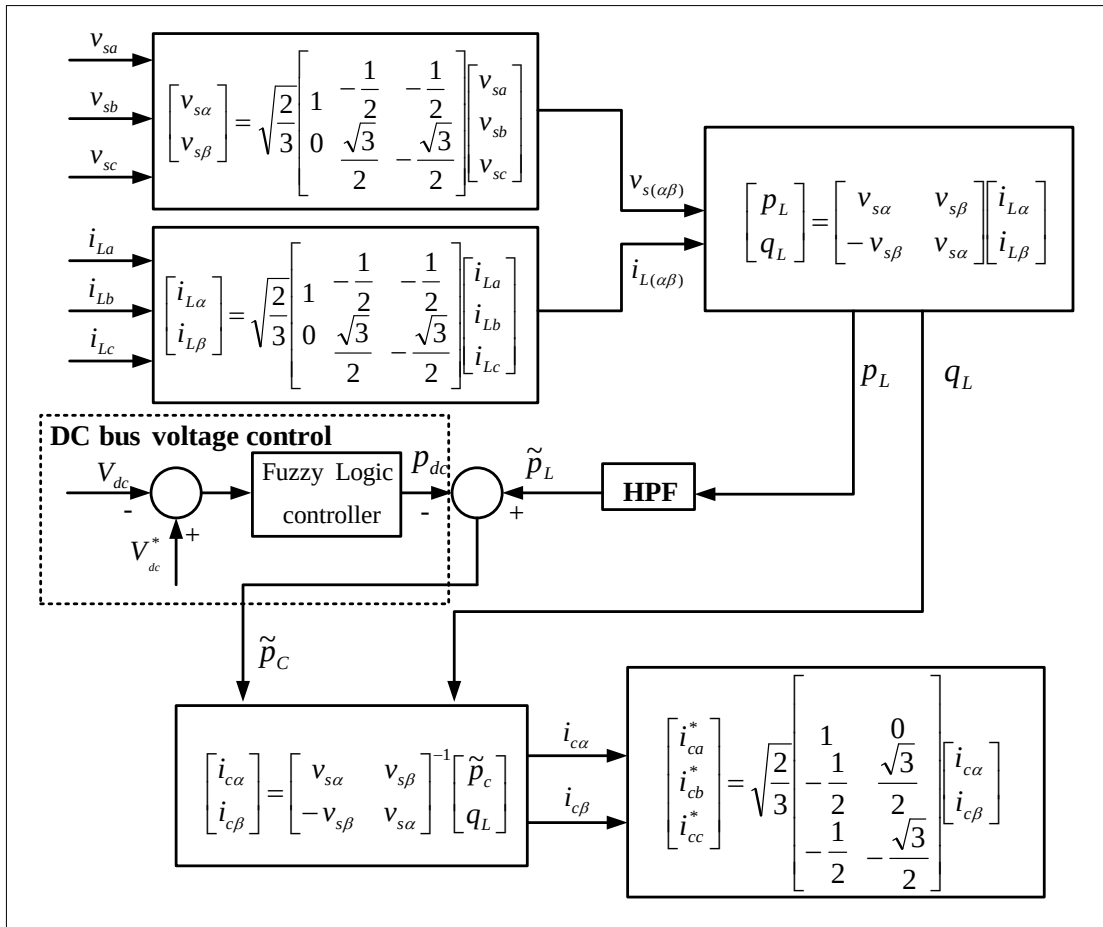


รูปที่ 6.1 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน
เมื่อมีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

จากรูปที่ 6.1 สังเกตได้ว่ามีบล็อก DC bus voltage control สำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเพิ่มเข้ามา เพื่อคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของค่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ให้มีค่าคงที่ เท่ากับ 750 V โดยตัวเก็บประจุใช้ค่าเท่ากับ 150 μF ซึ่งได้จากการเลือกค่าโดยใช้วิธีของ Thierry Thomas (1998) ดังสมการที่ (6.1)

$$C_{dc, \min} = \frac{0.32}{\Delta V_{dc} \times V_{dc}^*} = \frac{0.32}{3 \times 750} = 142.22 \mu\text{F} \text{ (เลือกใช้ค่า } C_{dc} = 150 \mu\text{F)} \quad (6.1)$$

จากสมการที่ (6.1) กำหนดให้ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (V_{dc}^*) มีค่าเท่ากับ 750 V ซึ่งได้จากการออกแบบในบทที่ 4 และกำหนดให้ค่าผลต่างของแรงดันบัสไฟตรง (ΔV_{dc}) มีค่าเท่ากับ 3 V โดยในส่วนของบล็อก Fuzzy Logic Current Control จะใช้ค่าฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่ได้จากการปรับปรุงสมรรถนะการนิโคกระแสดชเชยด้วยวิธีการค้นหาด้วยวิธี ATS จากบทที่ 5 และใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ซึ่งพิจารณาได้ดังรูปที่ 6.2 ดังนี้

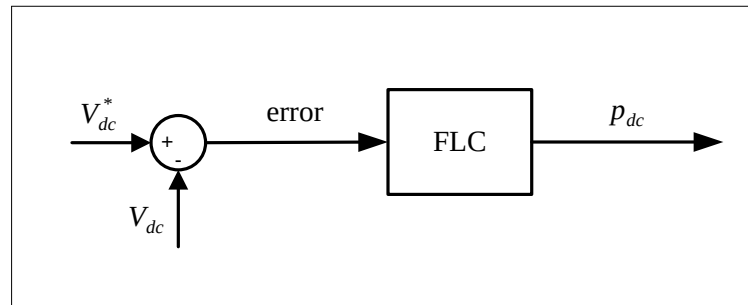


รูปที่ 6.2 แผนภาพการคำนวณการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

จากรูปที่ 6.2 บล็อกการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (DC bus voltage control) ใช้บล็อกตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic controller) เข้ามาแทรกอยู่ในส่วนของกำลังแอกทีฟของขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ซึ่งอินพุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก คือ ผลต่างของค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงที่ได้จากการออกแบบ (V_{dc}^*) กับค่าแรงดันบัสไฟตรงค่าจริงที่ได้จากการวัดตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์ (V_{dc}) ส่วนเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (p_{dc}) จะถูกนำไปหักลบกับปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ ($\tilde{p}_L$) โดยผลต่างของปริมาณทั้งสอง คือ ปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟที่ใช้ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชย ($\tilde{p}_C$) โดยที่การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ จะใช้วงจรกรองผ่านสูงอันดับที่ 2 ที่ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 10 Hz ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟออกจากปริมาณกำลังแอกทีฟมูลฐาน ซึ่งได้จากการทดสอบในบทที่ 3

6.2.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงจะพิจารณาจากบล็อก DC bus voltage control ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งสามารถพิจารณาโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการควบคุมดังกล่าวได้ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

จากรูปที่ 6.3 สังเกตได้ว่าอินพุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกมีเพียงอินพุตเดียว คือ ค่าความผิดพลาด (error) ซึ่งแตกต่างจากอินพุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกของบทก่อนหน้านี้ ที่ประกอบไปด้วย 2 อินพุตคือ error และ error rate เนื่องจากถ้าพิจารณาอินพุต error rate ในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมด้วยจะพบว่าตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมให้ค่าแรงดันบัลไฟตรงมีค่าตรงตามที่ทำการออกแบบไว้ได้ แต่ส่งผลทำให้ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไม่สามารถลดลงได้ ซึ่งจุดประสงค์หลักในการควบคุมคือ ต้องการให้ค่าแรงดันบัลไฟตรงมีค่าคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้และค่า %THD ต้องลดลงตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 ดังนั้นการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจะพิจารณาที่อินพุตคือ error เพียงอย่างเดียว โดยจะรับค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง (V_{dc}^*) และค่าแรงดันบัลไฟตรงจริง (V_{dc}) ซึ่งผลต่างระหว่างค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงกับค่าแรงดันบัลไฟตรงจริงคือ ค่าความผิดพลาด (error) ซึ่งเป็นสัญญาณทางด้านอินพุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ (6.2) จากนั้นนำอินพุตดังกล่าวผ่านบล็อกควบคุมแบบฟัซซีลอจิกและเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกคือ p_{dc} ซึ่งจะถูกนำไปหักลบกับปริมาณ $\tilde{p}_L$ เพื่อให้ได้ปริมาณ $\tilde{p}_c$ ต่อไป

$$\text{error} = V_{dc}^* - V_{dc} \quad (6.2)$$

ค่าความผิดพลาด และเอาต์พุตจะถูกกำหนดด้วยตัวแปรทางภาษา และค่าทางภาษา ซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามตารางที่ 6.1 ดังนี้

ตารางที่ 6.1 ตัวแปรทางภาษา และค่าทางภาษา

ระบบ	ชื่อตัวแปร	ความหมาย	ค่าตัวแปร	ความหมาย
อินพุต	error	ค่าความผิดพลาด	<i>neg</i> (negative) <i>zero</i> <i>pos</i> (positive)	ลบ ($V_{dc}^* < V_{dc}$) ศูนย์ ($V_{dc}^* = V_{dc}$) บวก ($V_{dc}^* > V_{dc}$)
เอาต์พุต	p_{dc}	ระดับกำลังไฟฟ้า ที่ตัวเก็บประจุ	<i>dec</i> <i>cons</i> <i>inc</i>	ลดลง คงที่ เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 6.1 จะสังเกตได้ว่าเมื่อพิจารณาอินพุตค่าความผิดพลาดเป็นตัวแปรทางภาษาจะให้ค่าความผิดพลาดเป็น “ลบ” “ศูนย์” “บวก” เช่น ค่าความผิดพลาดเป็นบวกหมายถึงค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงมากกว่าค่าแรงดันบัสไฟตรงจริง และเอาต์พุตเป็นระดับกำลังไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ จะให้ค่าระดับกำลังไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุเป็น “ลดลง” “คงที่” “เพิ่มขึ้น”

โครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในส่วนของการปฏิบัติการฟัซซี่ฟิเคชันจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลอินพุตแบบธรรมดา คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรงที่มีหน่วยเป็นโวลต์ (V) ให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรทางภาษาหรือตัวแปรแบบฟัซซี่คือค่าความผิดพลาดของแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงกับแรงดันบัสไฟตรงจริง และชุดปฏิบัติการดีฟัซซี่ฟิเคชันมีหน้าที่แปลงข้อมูลแบบฟัซซี่คือ ค่าระดับกำลังไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไปเป็นข้อมูลแบบธรรมดา คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็นวัตต์ (W) เพื่อให้ระบบที่ควบคุมเข้าใจสัญญาณดังกล่าว

จากระบบดังรูปที่ 6.1 ค่าของความผิดพลาดเป็นไปได้ 3 แบบ คือ {“ลบ” “ศูนย์” “บวก”} สามารถมีเงื่อนไขต่าง ๆ ได้ทั้งหมด 3 แบบ โดยจะพิจารณาระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่มี 1 อินพุต ได้แก่ error และ 1 เอาต์พุตคือ p_{dc} ซึ่งการออกแบบกฎของฟัซซี่ของตัวแปรทั้งสามพิจารณาได้ดังนี้

- กฎข้อที่ 1 IF error = *neg* THEN $p_{dc} = dec$
 กฎข้อที่ 2 IF error = *zero* THEN $p_{dc} = cons$
 กฎข้อที่ 3 IF error = *pos* THEN $p_{dc} = inc$

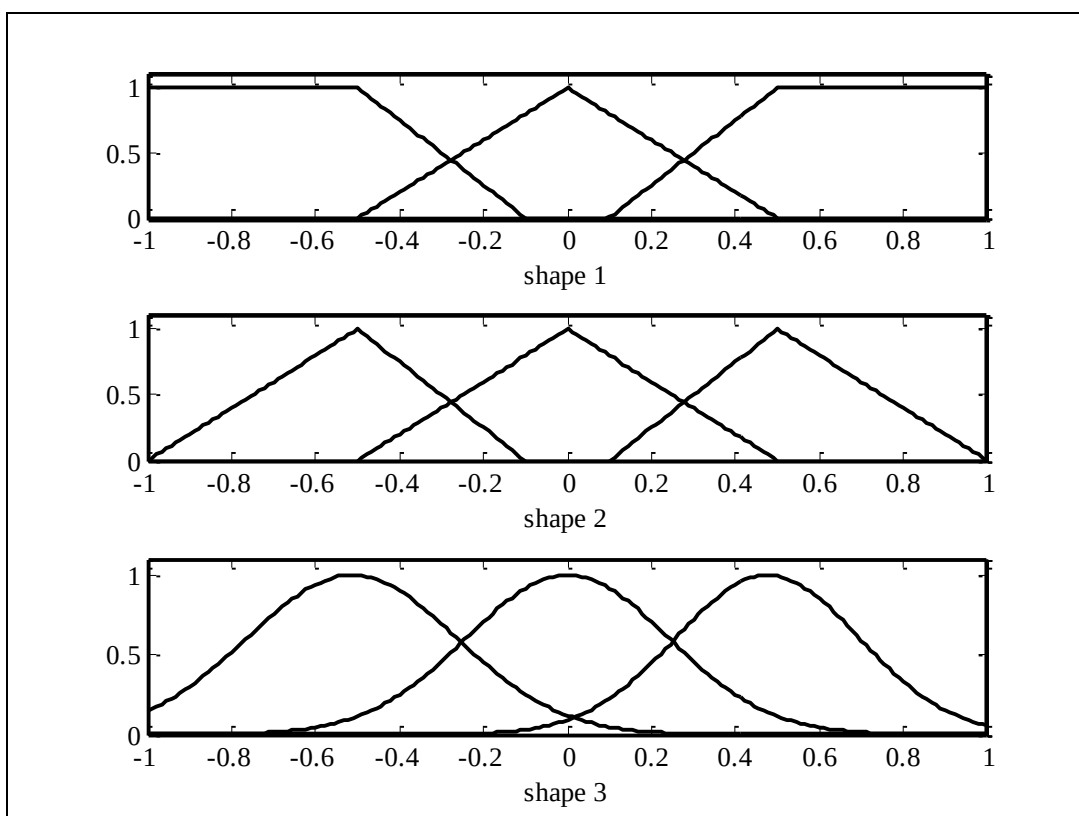
จากกฎการควบคุมดังกล่าว จะอธิบายกฎข้อที่ 1 กฎข้อที่ 2 และกฎข้อที่ 3 ในรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

จากกฎข้อที่ 1 ถ้าค่า $error$ อยู่ในเซตของ neg และค่า p_{dc} จะอยู่ในเซตของ dec หมายความว่าค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง (V_{dc}^*) น้อยกว่าค่าแรงดันบัลไฟตรงจริง (V_{dc}) ดังนั้น เอาต์พุตจึงต้องลดระดับกำลังไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุลง

จากกฎข้อที่ 2 ถ้าค่า $error$ อยู่ในเซตของ $zero$ และค่า p_{dc} จะอยู่ในเซตของ $cons$ หมายความว่าค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง (V_{dc}^*) เท่ากับค่าแรงดันบัลไฟตรงจริง (V_{dc}) ดังนั้น เอาต์พุตจึงต้องมีระดับกำลังไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุคงที่

จากกฎข้อที่ 3 ถ้าค่า $error$ อยู่ในเซตของ pos และค่า p_{dc} จะอยู่ในเซตของ inc หมายความว่าค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง (V_{dc}^*) มากกว่าค่าแรงดันบัลไฟตรงจริง (V_{dc}) ดังนั้น เอาต์พุตจึงต้องเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขึ้น

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ใช้การอนุมานแบบเมมดานิที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด และการดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธีค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (Mean of Maximum: MOM) โดยในขั้นแรกจะทำการทดสอบรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่นำมาเปรียบเทียบมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ดังรูปที่ 6.4 จากรูปดังกล่าว รูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของ shape 1 ประกอบด้วย triangular membership function (trimf) ผสมกับ trapezoidal membership function (trapmf) shape 2 ประกอบด้วย triangular membership function (trimf) และ shape 3 ประกอบด้วย gaussian curve membership function (gaussmf) ซึ่งการเปรียบเทียบผลการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่ใช้รูปร่างของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้ง 3 แบบ ดูได้จากตารางที่ 6.2 โดยพิจารณาจากค่า $\%error$ ซึ่งเกิดจากผลต่างของค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงกับค่าแรงดันบัลไฟตรงจริงรวมกับค่า $\%THD_{av}$ ได้จากสูตรการคำนวณตามสมการที่ (3.18) ซึ่งจากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่ารูปร่างทั้ง 3 แบบ ให้ค่า $\%error$ และค่า $\%THD_{av}$ ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้รูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ shape 1 เนื่องจากรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพดังกล่าวง่ายต่อการนำไปสร้างจริง

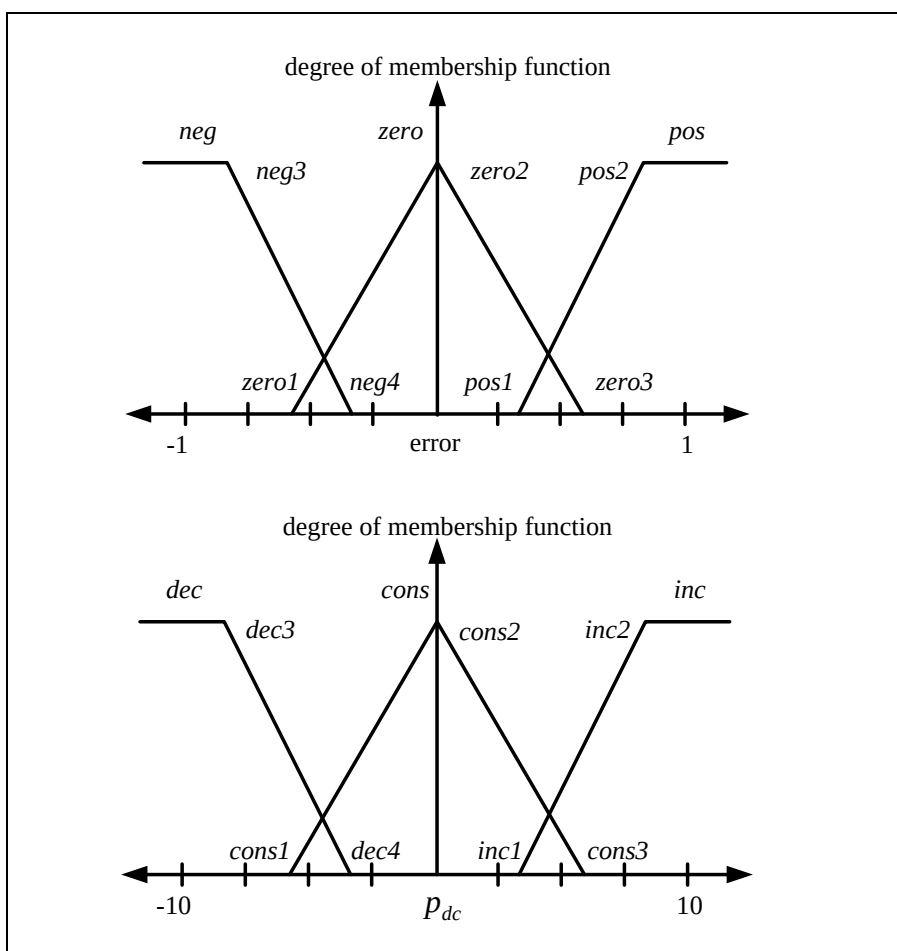


รูปที่ 6.4 รูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

ตารางที่ 6.2 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

รูปร่าง	เฟส			%error	%THD _{av}
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		
shape 1	1.1029	1.1496	1.1133	0.0931	1.1219
shape 2	1.1273	1.1324	1.1285	0.0936	1.1294
shape 3	1.1131	1.1362	1.1242	0.0935	1.1245

จากการเปรียบเทียบดังกล่าวข้างต้น เมื่อพิจารณาลักษณะของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพสำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ทั้งหมดจำนวน 14 พารามิเตอร์ ซึ่งพิจารณาได้ดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุต

จากรูปที่ 6.5 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุตจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ต้องทำการออกแบบอยู่จำนวนทั้งหมด 14 พารามิเตอร์ ได้แก่ *neg3 neg4 zero1 zero2 zero3 pos1 pos2 dec3 dec4 cons1 cons2 cons3 inc1* และ *inc2* โดยในเบื้องต้นจะทำการสุ่มค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวในกรณีต่าง ๆ ด้วยวิธีการลองผิดลองถูกจำนวนหลายชุดข้อมูลจนกระทั่งได้ทำการเลือกชุดข้อมูลที่ดีที่สุดจำนวน 3 ชุดข้อมูลด้วยกัน เพื่อนำมาทดสอบด้วยการจำลองสถานการณ์ ซึ่งการทดสอบประกอบด้วยฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาด และเอาต์พุตของทั้ง 3 ชุดข้อมูล โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวได้แสดงไว้ตามตารางที่ 6.3 และตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.3 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาด

ชุดข้อมูล	error						
	neg		zero			pos	
	neg3	neg4	zero1	zero2	zero3	pos1	pos2
1	-0.60100	-0.06614	-0.09260	0.01323	0.16700	0.11900	0.67000
2	-0.82280	0.00265	-0.02380	0.00264	0.04497	0.02910	0.87570
3	-0.82300	-0.01323	-0.02380	0.00264	0.04497	0.02910	0.87570

ตารางที่ 6.4 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของเอาต์พุต

ชุดข้อมูล	P_{dc}						
	dec		cons			inc	
	dec3	dec4	cons1	cons2	cons3	inc1	inc2
1	-6.64000	-0.87300	-1.19000	-0.18500	1.30000	0.87300	7.70000
2	-9.23000	-0.18520	-0.34390	0.02650	0.50300	0.29100	9.39000
3	-2.88400	-0.29100	-0.60850	0.07940	0.45000	0.13200	1.50800

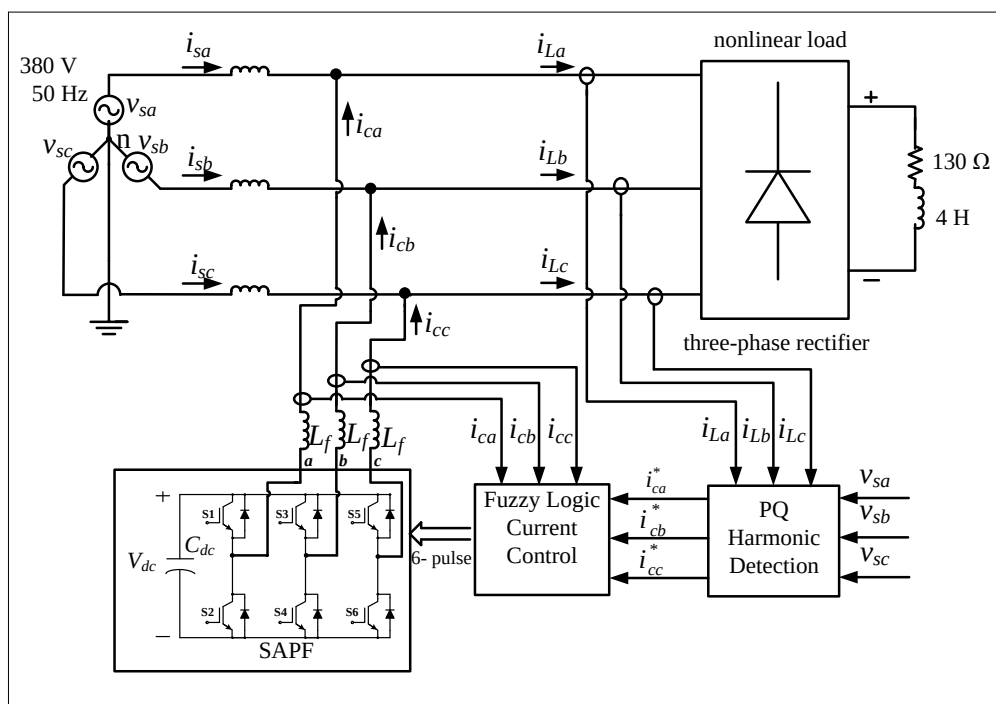
จากชุดข้อมูลทั้ง 3 ชุด จากตารางที่ 6.3 และตารางที่ 6.4 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพดังกล่าวจะถูกนำมาใช้วัดประสิทธิผลด้วยค่า %error ของค่าแรงดันบัลไฟตรงและค่า %THD ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 กำหนดให้ค่า %THD ต้องน้อยกว่า 5 % และในหัวข้อถัดไปจะเป็นการนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยตัวควบคุมแบบฟuzzyลอจิกที่ใช้พารามิเตอร์ตามตารางที่ 6.3 และตารางที่ 6.4 ดังที่เสนอข้างต้น

6.2.2 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

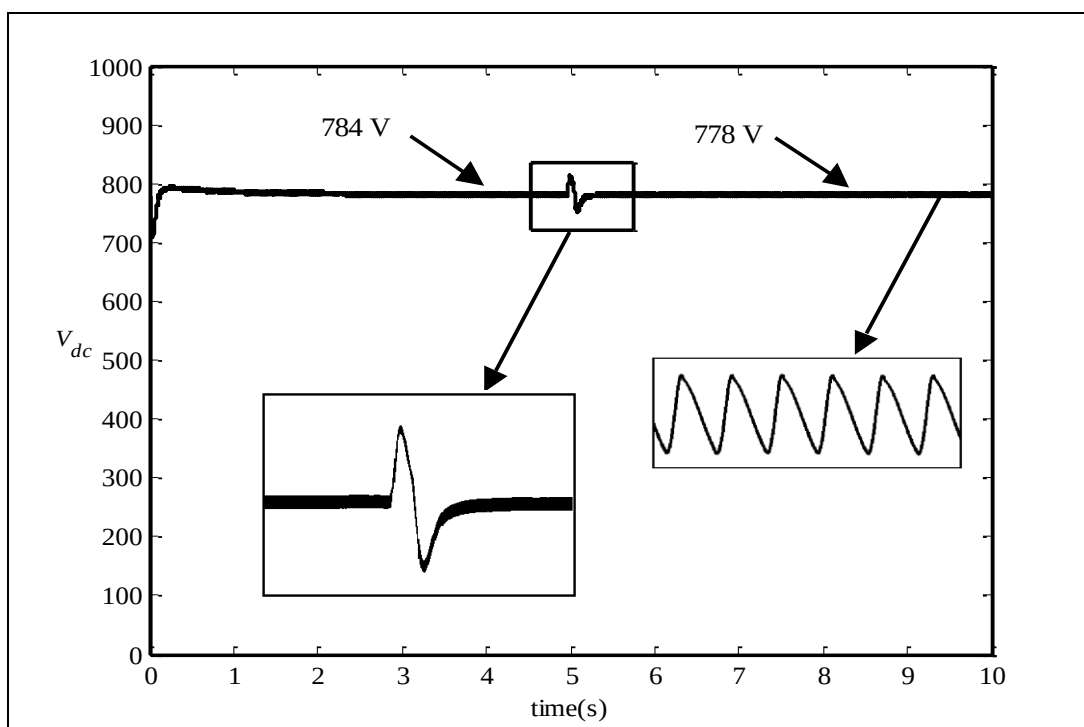
การจำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง และกรณีที่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน ดังนี้

- การจำลองสถานการณ์กรณีไม่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

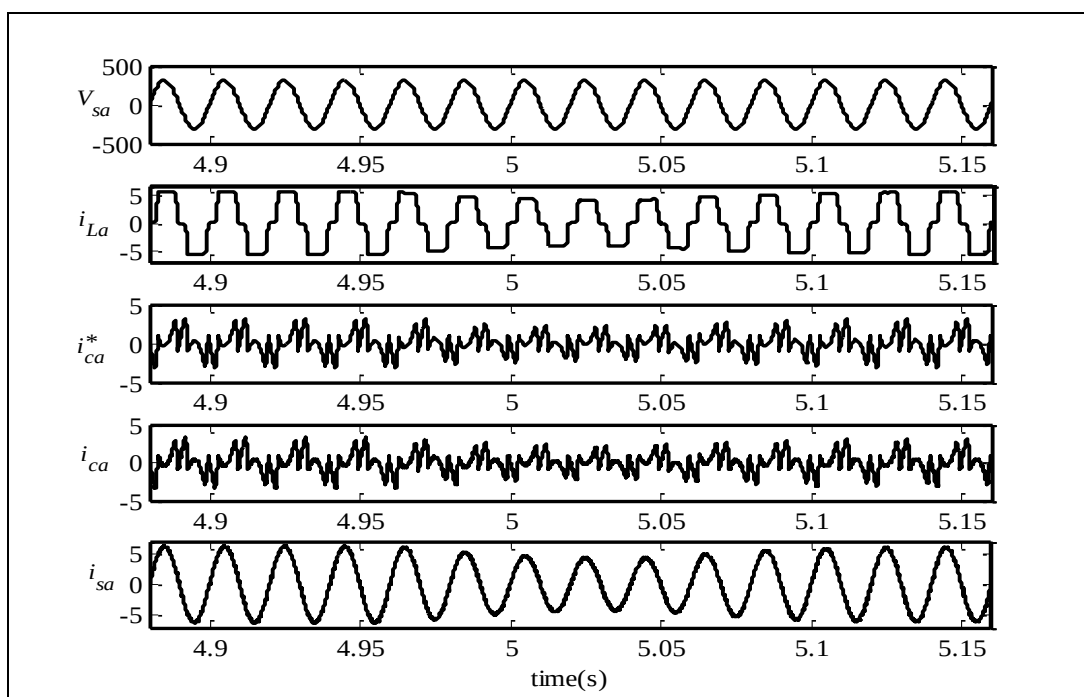
ระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์กรณีไม่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานแสดงได้ดังรูปที่ 6.6 จากรูปดังกล่าวคือ ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุลต่อเข้ากับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแทนด้วยวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นค่าความต้านทานเท่ากับ $130\ \Omega$ ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ $4\ \text{H}$ การตรวจจับฮาร์มอนิกใช้วิธี PQ และการควบคุมกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิกที่ได้รับการปรับปรุงสมรรถนะการติดตามกระแสชดเชยจากบทที่ 5 โดยที่ค่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) มีค่าเท่ากับ $150\ \mu\text{F}$ ซึ่งได้จากการเลือกค่าโดยใช้วิธีของ Thierry Thomas (1998) ตามสมการที่ (6.1) ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงไว้ดังรูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.8 โดยการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว ทำการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานของวงจรเรียงกระแสจาก $R = 130\ \Omega$ เป็น $R = 260\ \Omega$ ตั้งแต่วันที่ 5 วินาที เป็นต้นไป



รูปที่ 6.6 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน
กรณีไม่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง



รูปที่ 6.7 ค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีไม่มีการควบคุม



รูปที่ 6.8 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส a กรณีไม่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

จากรูปที่ 6.7 สังเกตได้ว่าค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในช่วงเวลา 0 ถึง 5 วินาที มีค่าเท่ากับ 784 V ในสภาวะคงตัว และเมื่อโหลดความต้านทานของวงจรเรียงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงจาก $R = 130 \Omega$ เป็น $R = 260 \Omega$ ในช่วงเวลา 5 วินาทีถึง 10 วินาที ค่าแรงดันบัลไฟตรงเพิ่มขึ้นประมาณ 29 V ในช่วงเริ่มต้น และตกลงเหลือ 778 V เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว และจากรูปที่ 6.8 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส a ในช่วงเวลา 4.88 วินาทีถึง 5.16 วินาที (ช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด) สังเกตได้ว่ารูปสัญญาณของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (i_{sa}) มีลักษณะเป็นรูปไซน์ เนื่องจากตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกยังสามารถติดตามกระแสชดเชย (i_{ca}) ได้ตามลักษณะรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิง (i_{ca}^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ แต่จากผลดังกล่าวพบว่าระบบไม่สามารถปรับค่าแรงดันให้มีค่าเท่ากับค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง ซึ่งทำการออกแบบไว้ที่ 750 V ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการไม่มีการควบคุมค่าแรงดันดังกล่าว

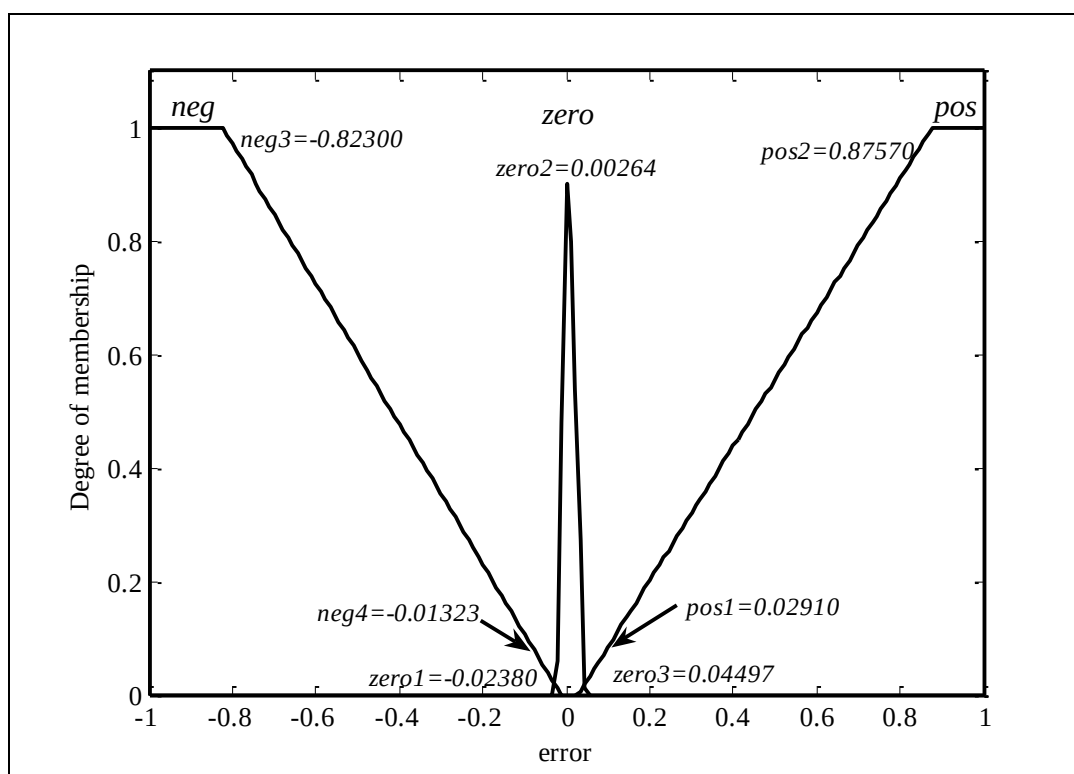
- การจำลองสถานการณ์กรณีที่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจะใช้ระบบดังรูปที่ 6.1 การตรวจจับฮาร์มอนิกจะใช้วิธี PQ ที่มีการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ได้จากบทที่ 3 และการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจะใช้ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้รับการปรับปรุงสมรรถนะด้วยวิธี ATS ในบทที่ 5 รวมถึงใช้การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด และดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด ซึ่งการจำลองสถานการณ์จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งหมด 14 พารามิเตอร์ของทั้ง 3 ชุดข้อมูล จากตารางที่ 6.3 และตารางที่ 6.4 โดยชี้วัดประสิทธิภาพผลด้วยค่า %THD ตามสมการที่ (3.18) ร่วมกับค่า %error ของค่าแรงดันบัลไฟตรง และสามารถพิจารณาผลการทดสอบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของทั้ง 3 ชุดข้อมูลได้ดังตารางที่ 6.5 จากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่าค่า %THD หลังการชดเชยของข้อมูลชุดที่ 3 มีค่า %THD น้อยที่สุดเท่ากับ 0.9874% และมีค่า %error ของแรงดันบัลไฟตรงน้อยที่สุดเท่ากับ 0.0479% เมื่อเทียบกับข้อมูลชุดอื่น ๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้ข้อมูลฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของข้อมูลชุดที่ 3 สำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ซึ่งลักษณะฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของข้อมูลชุดที่ 3 สำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกดังกล่าวพิจารณาได้จากรูปที่ 6.9 และผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงเมื่อใช้ข้อมูลชุดที่ 3 แสดงไว้ดังรูปที่ 6.10 และรูปที่ 6.11 โดยทำการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวตั้งแต่

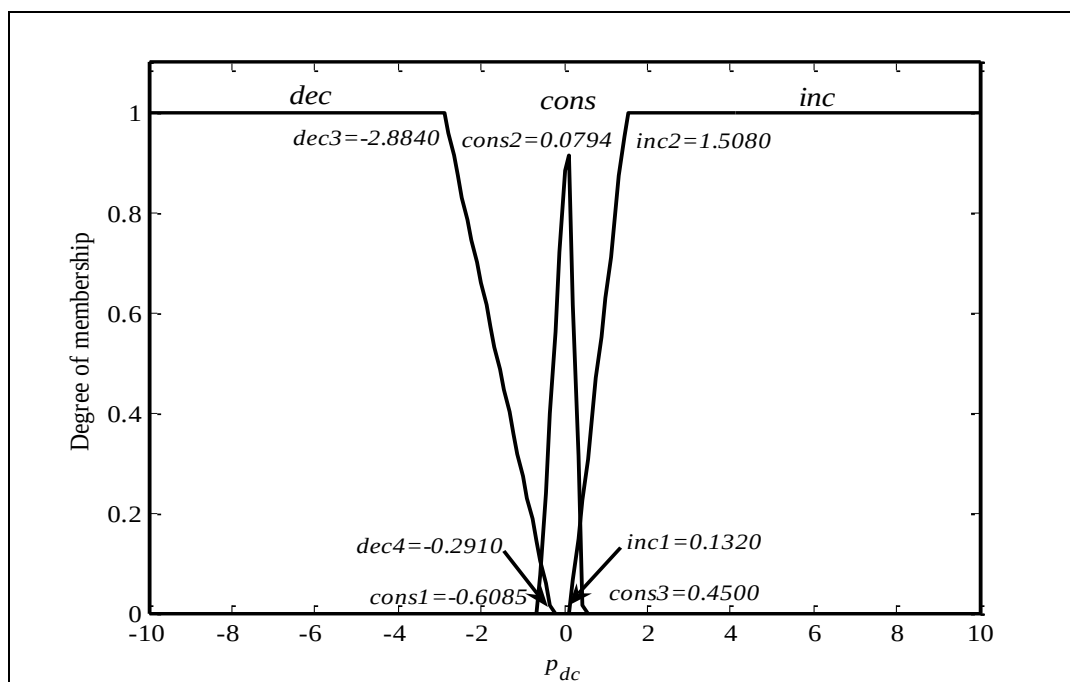
เวลา 0 ถึง 10 วินาที ทำการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานของวงจรเรียงกระแสจาก $R = 130\ \Omega$ เป็น $R = 260\ \Omega$ ในช่วงเวลา 4.88 ถึง 5.16 วินาที

ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

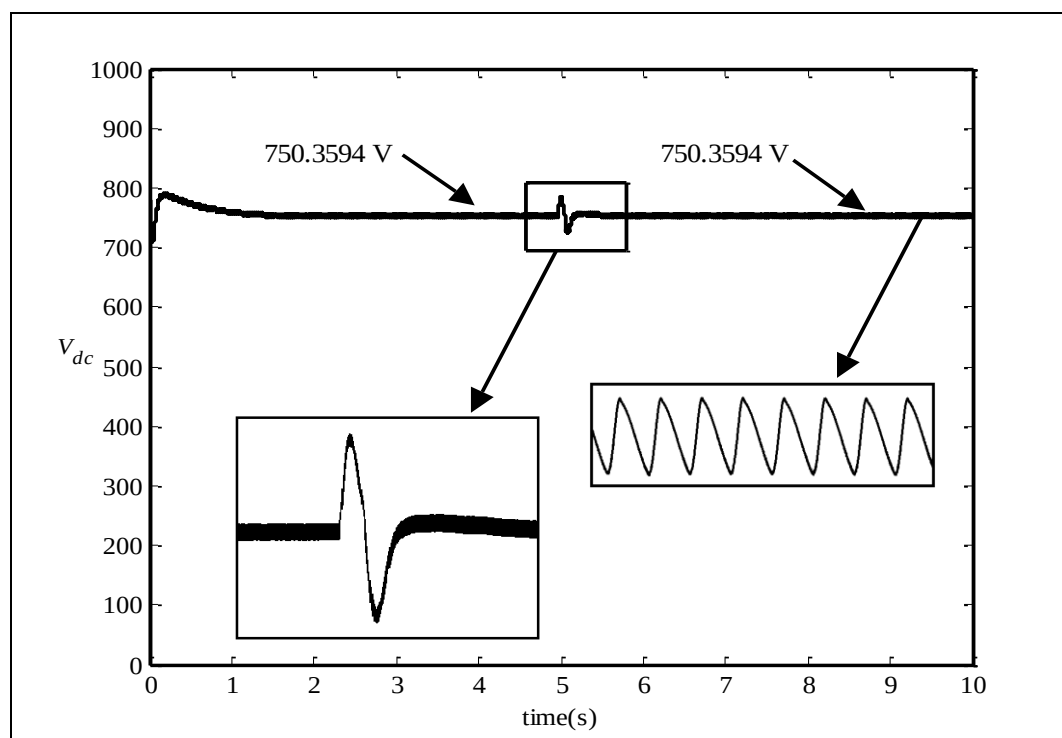
ชุดข้อมูล	เฟส			%THD _{หลังการชดเชย}	%error
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		
1	1.1029	1.1496	1.1133	1.1219	0.0931
2	1.0870	1.0679	1.0762	1.0770	0.0685
3	0.9947	0.9719	0.9957	0.9874	0.0479



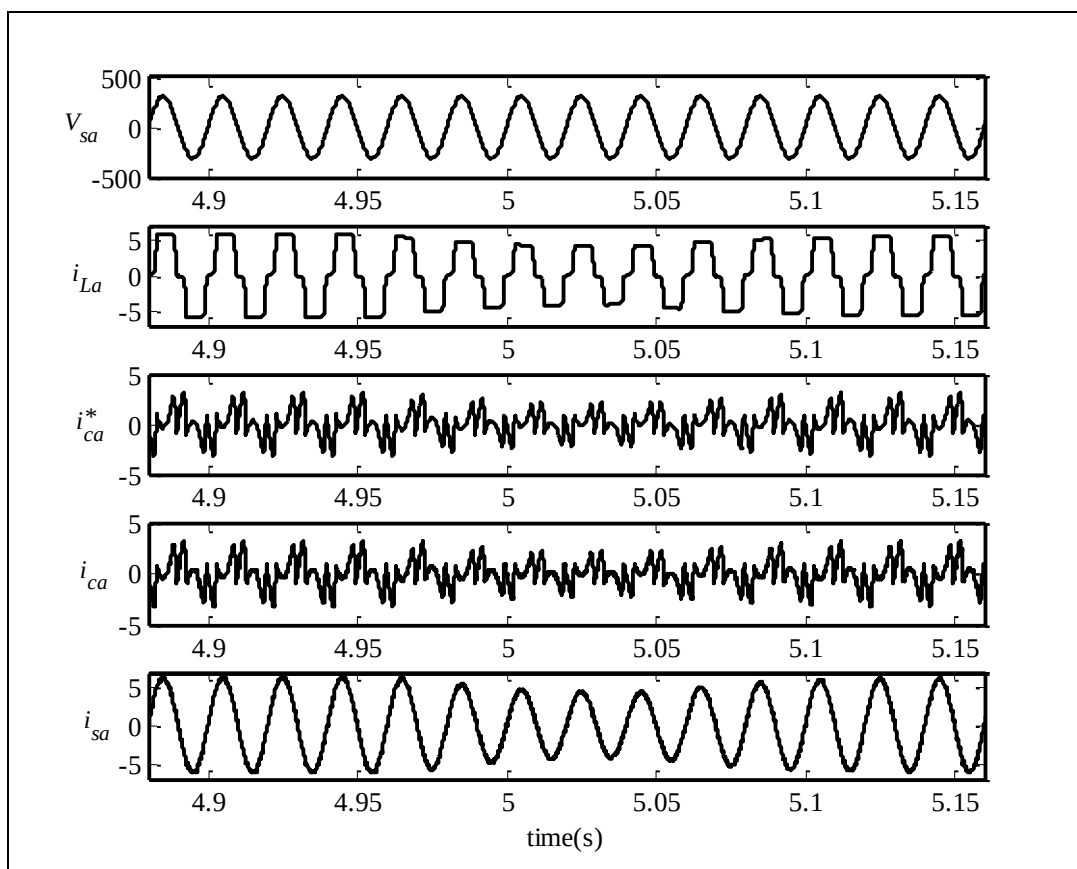
รูปที่ 6.9 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการทดสอบข้อมูลชุดที่ 3



รูปที่ 6.9 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการทดสอบข้อมูลชุดที่ 3 (ต่อ)



รูปที่ 6.10 ค่าแรงดันไฟฟ้าตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีมีการควบคุม



รูปที่ 6.11 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส a กรณีมีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

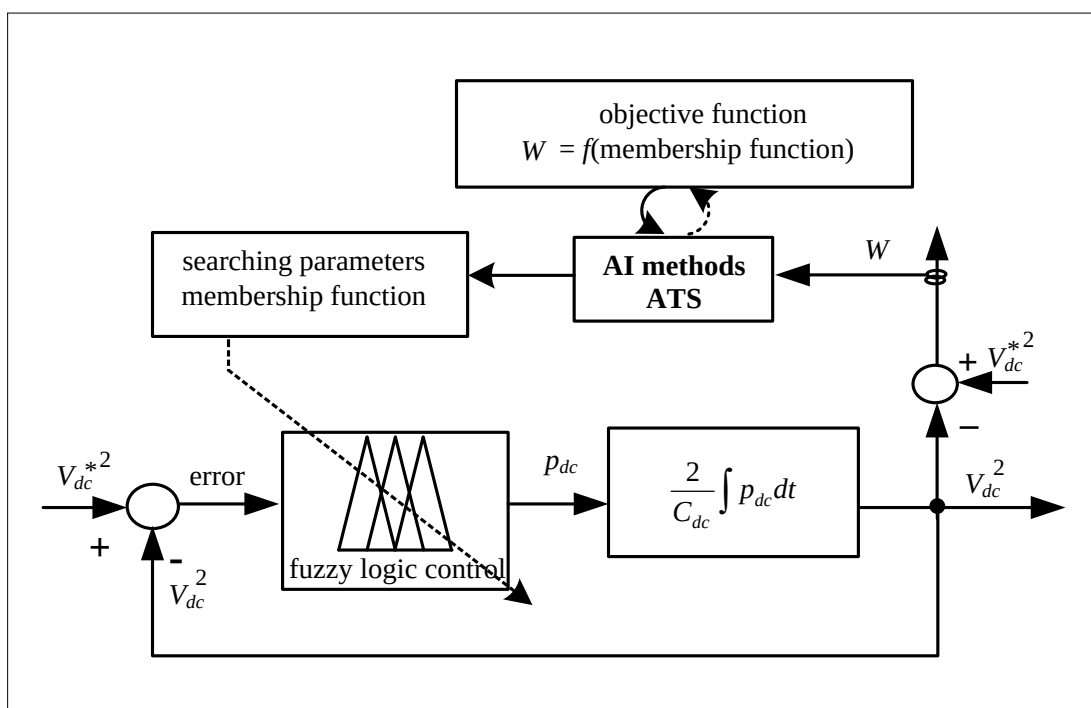
จากรูปที่ 6.10 สังเกตได้ว่าค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน ในช่วงก่อนมีการเปลี่ยนแปลงโหลดมีค่าประมาณ 750.3594 V ใกล้เคียงตามที่ได้ออกแบบไว้เนื่องจากมีตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงดังกล่าว โดยใช้เวลาในการลู่เข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 2 วินาที จากนั้นเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา 4.96 ถึง 5.04 วินาที สังเกตได้ว่า ค่าแรงดันบัลไฟตรงมีค่าเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 784 V และลดลงสู่เข้าสู่ 750.3594 V เช่นเดิมโดยใช้เวลาประมาณ 1 วินาที สำหรับรูปที่ 6.11 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเฟส a ในช่วงเวลา 4.88 ถึง 5.16 วินาที สังเกตได้ว่ารูปสัญญาณของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (i_{sa}) มีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์ โดยที่กรณีโหลด $R=130\ \Omega$ ค่าขดกระแสไฟฟ้าประมาณ 6 A และกรณีโหลด $R=260\ \Omega$ ค่าขดกระแสไฟฟ้าประมาณ 4 A ทั้งนี้เนื่องจากวงจรรอกำลังแอกทีฟสามารถติดตามกระแสชดเชย (i_{ca}) ได้ตามลักษณะรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิง (i_{ca}^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง จากผลดังกล่าวทำให้ค่า%error ของแรงดัน

บัลไฟตรงมีค่าเท่ากับ 0.0479% และส่งผลให้ค่า %THD ภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเท่ากับ 0.9874% ซึ่งค่า %THD ดังกล่าว อยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

6.3 การปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว หรือ วิธี ATS ในการค้นหาค่าฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งหมด 14 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกที่เหมาะสม โดยการค้นหาดังกล่าวประกอบด้วย การออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ การกำหนดขอบเขตการค้นหา และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.3.1 การออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว



รูปที่ 6.12 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธี ATS

การออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานด้วยวิธี ATS สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 6.12 จากรูปดังกล่าว กระบวนการปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจะเริ่มจากการคำนวณค่าความผิดพลาดที่เกิดจากผลต่างของค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงกำลังสองกับค่าแรงดันบัสไฟตรงจริงกำลังสอง และใช้ค่าความผิดพลาดดังกล่าวเป็นอินพุตให้แก่ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก โดยเอาต์พุต p_{dc} ที่ได้จากตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจะถูกนำไปคำนวณด้วยสมการพลังงานที่ตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยมีตัวเก็บประจุเป็นตัวเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งค่าพลังงานที่ตัวเก็บประจุดังกล่าว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.3) ดังนี้

$$E_{dc} = \int p_{dc} dt = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \quad (6.3)$$

จากสมการที่ (6.3) ทำการแก้สมการเพื่อหาค่าแรงดันบัสไฟตรงกำลังสอง (V_{dc}^2) จะได้ดังสมการที่ (6.4)

$$V_{dc}^2 = \frac{2}{C_{dc}} \int p_{dc} dt \quad (6.4)$$

โดยที่ p_{dc} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ (W)

C_{dc} คือ ตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์ (F)

จากสมการที่ (6.4) ค่าแรงดันไฟฟ้า V_{dc}^2 ดังกล่าว จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่า V_{dc}^{*2} ดังรูปที่ 6.12 โดยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาด้วยวิธี ATS ใช้ค่า W เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทั้งนี้เนื่องจากตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้สำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอคทีฟให้มีค่าคงที่ตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ ดังนั้นถ้าแรงดันบัสไฟตรงจริงกำลังสองมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงกำลังสองจะส่งผลให้ค่า W มีค่าลดลง โดยที่ค่า W พิจารณาได้จากสมการที่ (6.5)

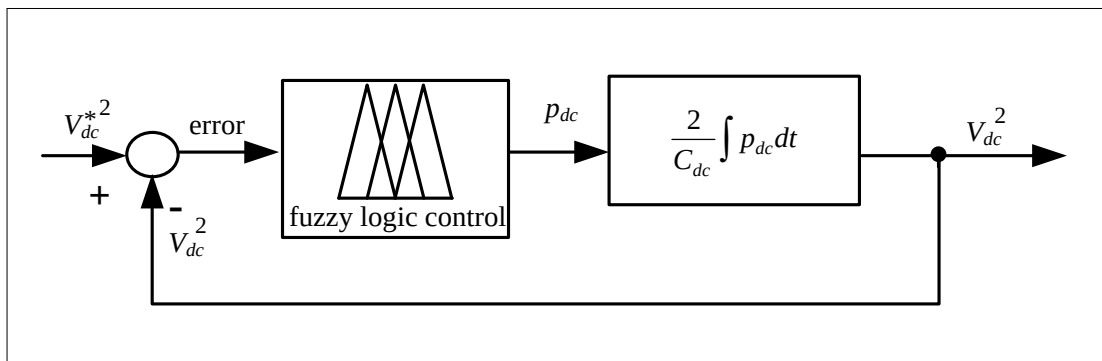
$$W = \frac{\sum error^2}{N} \quad (6.5)$$

โดยที่ $error$ คือ ผลต่างของแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงกำลังสองกับแรงดันบัลไฟตรงจริงกำลังสอง

N คือ จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด

จากสมการที่ (6.5) สังเกตได้ว่าค่า W สามารถคำนวณได้จากผลรวมของค่า $error$ กำลังสองหารด้วยจำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด ซึ่งโปรแกรมการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งหมด 14 พารามิเตอร์ ด้วยวิธี ATS คูได้จากภาคผนวก ก.

จากโครงสร้างการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธี ATS ดังรูปที่ 6.12 สามารถพิจารณาในส่วนของการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกได้ดังรูปที่ 6.13 ซึ่งจากรูปดังกล่าว เป็นการเทียบเคียงระบบบน simulink ลงบน m - file เนื่องจากการค้นหาฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธี ATS บน simulink ใช้เวลาในการประมวลผลที่ยาวนาน ดังนั้นจึงทำการค้นหาด้วยวิธีดังกล่าวบน m - file ทั้งหมดเพื่อลดเวลาในการประมวลผล



รูปที่ 6.13 โครงสร้างการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

จากรูปที่ 6.13 จะใช้การคำนวณค่าแรงดันบัลไฟตรงจริงกำลังสองจากสมการที่ (6.4) และจากสมการดังกล่าว สามารถพิจารณาการประมาณค่าแรงดันบัลไฟตรงจริงกำลังสองได้ตามสมการที่ (6.6) ดังนี้

$$\frac{dV_{dc}^2}{dt} \approx \frac{\Delta V_{dc}^2}{\Delta t} = \frac{V_{dc}^2(k) - V_{dc}^2(k-1)}{\Delta t} = \frac{2p_{dc}}{C_{dc}} \quad (6.6)$$

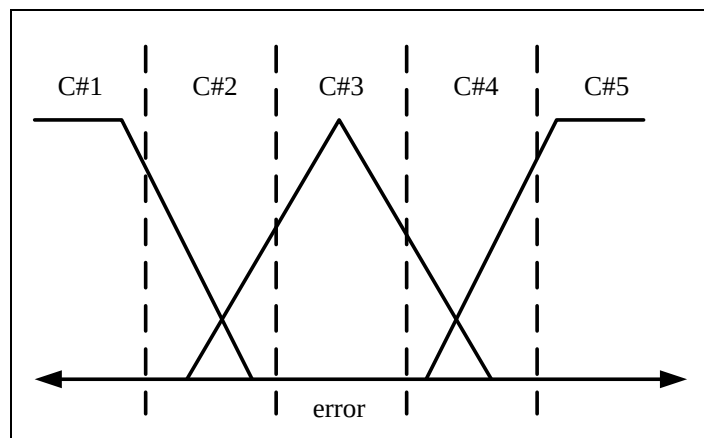
จากสมการที่ (6.6) สามารถคำนวณค่าแรงดันบัลไฟตรงจริงกำลังสองได้จากสมการที่ (6.7) ดังนี้

$$V_{dc}^2(k) = V_{dc}^2(k-1) + \left(\frac{2(p_{dc}(k))}{C_{dc}} \right) \times \Delta t \quad ; \quad k = 1, 2, 3, \dots, L \quad (6.7)$$

โดยที่ Δt คือ ช่วงเวลาการชักตัวอย่าง (sampling time)

L คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดของการชักตัวอย่าง

จากบล็อก fuzzy logic control ดังรูปที่ 6.13 ทำการเขียนโปรแกรมของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก และเปรียบเทียบเอาต์พุตของ โปรแกรมที่เขียนขึ้นกับเอาต์พุตที่ได้จาก fuzzy logic toolbox ซึ่งมีเงื่อนไขในการตรวจสอบดังรูปที่ 6.14 ดังนี้



รูปที่ 6.14 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาด

จากกรณีต่าง ๆ ตามรูปที่ 6.14 สามารถพิจารณาได้ตามตารางที่ 6.6 จะสังเกตได้ว่า ถ้าค่า error เท่ากับ -0.8600 จะอยู่ในกรณี C#1 ดังนั้นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกบน simulink เท่ากับ -6.5 เมื่อเทียบกับค่าเอาต์พุตบน m - file เท่ากับ -6.4420 มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อค่า error เท่ากับ 0.0549 จะอยู่ในกรณี C#4 ดังนั้นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกบน simulink เท่ากับ 5.1 เมื่อเทียบกับค่าเอาต์พุตบน m - file เท่ากับ 5.0870 จะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโปรแกรมที่เขียนขึ้นน่าเชื่อถือได้

ตารางที่ 6.6 ผลการทดสอบค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิก

case	error	output - simulink	output - m-file
C#1	-0.8600	-6.5	-6.4420
C#2	-0.0305	-5.2	-5.1976
C#3	0.0183	0.1	0.0707
C#4	0.0549	5.1	5.0870
C#5	0.9450	5.8	5.7540

6.3.2 การกำหนดขอบเขตการค้นหาของวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว

การกำหนดขอบเขตของการค้นหาด้วยวิธี ATS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดการปรับขอบเขตของพารามิเตอร์ทั้ง 14 ตัว ให้เป็นไปตามรูปที่ 6.5 โดยจะกำหนดขอบเขตการค้นหาให้ครอบคลุมชุดข้อมูลที่ 3 ตามตารางที่ 6.3 และตารางที่ 6.4 หากคำตอบที่ได้ชนขอบด้านใดก็จะทำการขยายขอบเขตด้านนั้นออกไป เมื่อคำตอบที่ได้ไม่ชนขอบด้านใดจะใช้ขอบเขตการค้นหานั้นในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี ATS ต่อไป ซึ่งผลการกำหนดขอบเขตการค้นหาสามารถพิจารณาได้ตามตารางที่ 6.7 และตารางที่ 6.8 ดังนี้

ตารางที่ 6.7 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case I และ case II

Parameters	case I		case II	
	limits	result	limits	result
error				
<i>neg3</i>	[-1, -0.2]	-0.5720	[-0.7, -0.1]	-0.2138
<i>neg4</i>	[-0.015, 0]	-0.0080	[-0.025, -0.001]	-0.0078
<i>zero1</i>	[-0.2, -0.015]	-0.0447	[-0.1, -0.025]	-0.0599
<i>zero2</i>	[0, 0.01]	0.0034	[-0.001, 0.006]	6.6e-4
<i>zero3</i>	[0.03, 0.065]	0.0408	[0.025, 0.055]	0.0428
<i>pos1</i>	[0.01, 0.03]	0.0190	[0.006, 0.025]	0.0080
<i>pos2</i>	[0.065, 1]	0.4907	[0.055, 0.55]	0.4184

ตารางที่ 6.7 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case I และ case II (ต่อ)

Parameters	case I		case II	
	limits	result	limits	result
P_{dc}				
<i>dec3</i>	[-3.5, -1]	-1.4346	[-1.55, -0.6]	-1.3048
<i>dec4</i>	[-0.4, 0]	-0.0132	[-0.1, 0.01]	-0.0252
<i>cons1</i>	[-1, -0.4]	-0.4766	[-0.6, -0.1]	-0.4277
<i>cons2</i>	[0, 0.09]	0.0888	[0.01, 0.15]	0.0846
<i>cons3</i>	[0.3, 0.7]	0.4273	[0.32, 0.8]	0.6298
<i>inc1</i>	[0.09, 0.3]	0.2740	[0.15, 0.32]	0.2807
<i>inc2</i>	[0.7, 1.7]	1.6455	[0.8, 1.68]	1.2282
<i>W</i>	15.7635		10.7276	
%error	0.0146		0.0138	

ตารางที่ 6.8 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case III และ case IV

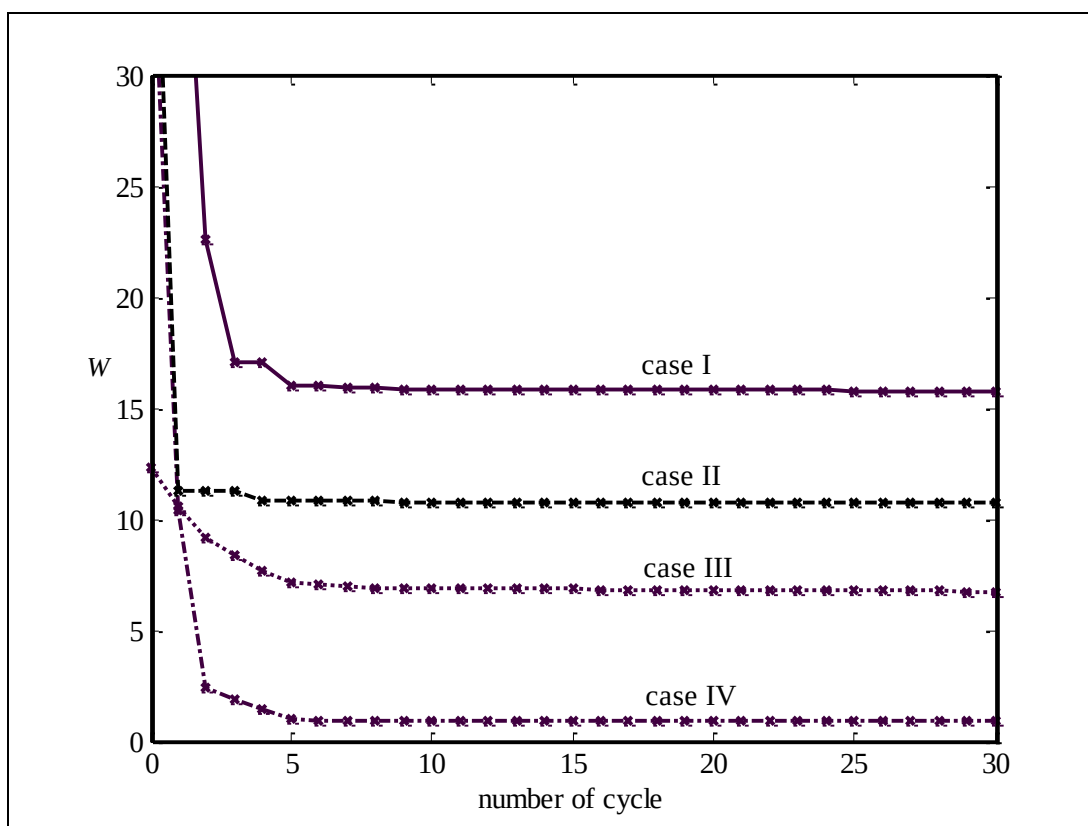
Parameters	case III		case IV	
	limits	result	limits	result
error				
<i>neg3</i>	[-0.3, -0.09]	-0.2452	[-0.26, -0.09]	-0.1848
<i>neg4</i>	[-0.01, -0.0001]	-0.0057	[-0.007, -0.0001]	-1e-4
<i>zero1</i>	[-0.09, -0.01]	-0.0100	[-0.09, -0.007]	-0.0445
<i>zero2</i>	[-0.0001, 0.007]	0.0031	[-0.0001, -0.005]	0.0046
<i>zero3</i>	[0.01, 0.06]	0.0538	[0.03, 0.09]	0.0577
<i>pos1</i>	[0.007, 0.01]	0.0098	[0.005, 0.03]	0.0193
<i>pos2</i>	[0.06, 0.5]	0.2289	[0.09, 0.35]	0.1885
P_{dc}				
<i>dec3</i>	[-1.4, -0.7]	-0.9649	[-1, -0.65]	-0.7855
<i>dec4</i>	[-0.2, 0]	-0.0150	[-0.1, 0.03]	-0.0478
<i>cons1</i>	[-0.7, -0.2]	-0.5731	[-0.65, -0.1]	-0.5350

ตารางที่ 6.8 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา case III และ case IV (ต่อ)

Parameters	case III		case IV	
	limits	result	limits	result
P_{dc}				
<i>cons2</i>	[0, 0.1]	0.0998	[0.03, 0.16]	0.1084
<i>cons3</i>	[0.3, 0.7]	0.4994	[0.29, 0.7]	0.3463
<i>inc1</i>	[0.1, 0.3]	0.2773	[0.16, 0.29]	0.2087
<i>inc2</i>	[0.7, 1.3]	1.2595	[0.7, 1.28]	1.0683
<i>W</i>	6.7508		0.8878	
%error	0.0134		0.0022	

จากตารางที่ 6.7 และตารางที่ 6.8 จะสังเกตได้ว่าการตั้งขอบเขตของ case I จะกำหนดให้ครอบคลุมข้อมูลชุดที่ 3 ตามตารางที่ 6.3 และตารางที่ 6.4 โดยผลการทดสอบจะลู่เข้าหาค่า W ที่ค่าเท่ากับ 15.7635 ที่รอบการค้นหาเท่ากับ 30 รอบ ส่งผลให้ค่า %error เท่ากับ 0.0146% ดังรูปที่ 6.15 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์บางตัวของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกใกล้กับขอบเขตในการค้นหา เช่น กรณีเอาต์พุตคือ p_{dc} ค่าพารามิเตอร์ของ *cons1* ได้ผลการค้นหาเท่ากับ -0.4766 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์ค่านี้มีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตบนคือ -0.4 จึงสนใจที่จะพิจารณาในการปรับขอบเขตของพารามิเตอร์ค่านี้เป็นสำคัญ ดังนั้นจึงทำการปรับขอบเขตการค้นหาเป็น case II โดยยังคงรูปร่างตามรูปที่ 6.5 ซึ่งผลการทดสอบจะลู่เข้าหาค่า W เท่ากับ 10.7276 ส่งผลให้ค่า %error เท่ากับ 0.0138% โดยค่า *neg3 zero2 zero3 pos1 pos2 dec3* มีค่าใกล้กับขอบเขตในการค้นหา เช่น กรณีอินพุตคือ *error* ค่าพารามิเตอร์ของ *zero3* ได้ผลการค้นหาเท่ากับ 0.0428 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว มีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตบนคือ 0.055 ดังนั้นจึงสนใจที่จะปรับขอบเขตการค้นหาใหม่เป็น case III โดยจะลู่เข้าหาค่า W ที่ค่าเท่ากับ 6.7508 ส่งผลให้ค่า %error เท่ากับ 0.0134% ขณะที่ค่าฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ *neg3 neg4 zero1 zero3 pos1 dec4 cons2 inc1 inc2* มีค่าใกล้กับขอบเขตในการค้นหา เช่น กรณีอินพุตคือ *error* ค่าพารามิเตอร์ของ *zero1* ได้ผลการค้นหาเท่ากับ -0.0100 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าดังกล่าวชนกับขอบบนของขอบเขตการค้นหาที่เท่ากับ -0.01 จึงทำการขยายขอบเขตการค้นหาใหม่อีกเช่นเดิม โดยการปรับขอบเขตใหม่เป็น case IV จะสังเกตได้ว่าจะลู่เข้าหาค่า W ที่ค่าเท่ากับ 0.8878 และส่งผลให้ค่า %error เท่ากับ 0.0022% ซึ่งจากรูปที่ 6.15 จะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการปรับขอบเขตการค้นหาทั้ง 4 กรณี ที่รอบการค้นหาเท่ากับ 30 รอบ ขอบเขตในการค้นหาของ case IV จะส่งผลให้ค่า W และค่า

%error น้อยสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ ดังนั้นจึงใช้ขอบเขตในการค้นหาของ case IV ในการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของวิธี ATS ต่อไป



รูปที่ 6.15 การลู่เข้าหาค่าตอบ w ในกรณีต่าง ๆ

6.3.3 การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของวิธี ATS ในบทที่ 5 เป็นที่ทราบว่าวิธีการค้นหาด้วยวิธีดังกล่าวประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการค้นหาด้วยกัน 4 พารามิเตอร์คือ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาด้วยวิธี ATS มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยสามารถพิจารณาผลการทดสอบของพารามิเตอร์ทั้ง 4 พารามิเตอร์ โดยใช้ขอบเขตการค้นหาของ case IV ที่ได้จากตารางที่ 6.8 ได้ตามตารางที่ 6.9 ถึง ตารางที่ 6.12 ดังนี้

ตารางที่ 6.9 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 5 คำตอบ				
ค่า W	0.88770	0.88770	0.88780	0.88773
จำนวนรอบ	13	13	12	13
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ				
ค่า W	0.88780	0.88770	0.88780	0.88777
จำนวนรอบ	16	17	16	16
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 15 คำตอบ				
ค่า W	0.88780	0.88780	0.88780	0.88780
จำนวนรอบ	17	18	18	18
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ				
ค่า W	0.88770	0.88780	0.88780	0.88777
จำนวนรอบ	24	24	23	24

ตารางที่ 6.10 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ				
ค่า W	0.88780	0.88780	0.88780	0.88780
จำนวนรอบ	21	21	21	21
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ				
ค่า W	0.88770	0.88780	0.88780	0.88777
จำนวนรอบ	17	18	18	18
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 15 คำตอบ				
ค่า W	0.88780	0.88770	0.88780	0.88773
จำนวนรอบ	14	13	14	14

ตารางที่ 6.10 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง (ต่อ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ				
ค่า W	0.88780	0.88780	0.88770	0.88773
จำนวนรอบ	13	12	13	13

ตารางที่ 6.11 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น

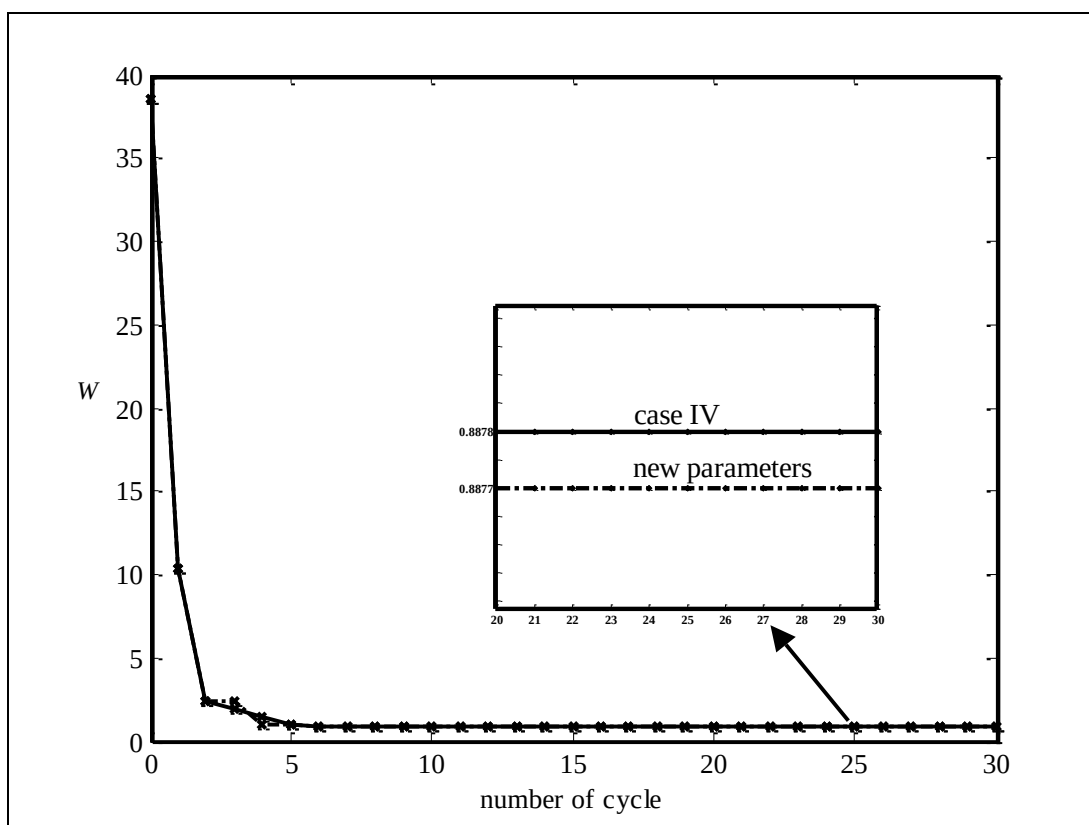
ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5				
ค่า W	0.88780	0.88770	0.88770	0.88770
จำนวนรอบ	13	12	12	12
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1				
ค่า W	0.88780	0.88780	0.88780	0.88780
จำนวนรอบ	21	20	20	20
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 2				
ค่า W	0.88780	0.88780	0.88780	0.88780
จำนวนรอบ	14	14	14	14
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 3				
ค่า W	0.88780	0.88780	0.88770	0.88777
จำนวนรอบ	19	19	18	19
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 4				
ค่า W	0.88770	0.88780	0.88780	0.88777
จำนวนรอบ	13	14	14	14
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5				
ค่า W	0.88780	0.88770	0.88780	0.88777
จำนวนรอบ	17	16	17	17

ตารางที่ 6.12 ผลการทดสอบค่าปรับลดครีมี

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.1				
ค่า W	0.88780	0.88770	0.88780	0.88776
จำนวนรอบ	14	15	14	14
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.2				
ค่า W	0.88780	0.88780	0.88770	0.88776
จำนวนรอบ	13	13	14	13
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.3				
ค่า W	0.88780	0.88770	0.88770	0.88773
จำนวนรอบ	13	12	12	12
ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.4				
ค่า W	0.88780	0.88780	0.88780	0.88780
จำนวนรอบ	16	17	17	17

จากตารางที่ 6.9 ถึง ตารางที่ 6.12 การเลือกค่าพารามิเตอร์ของ ATS จะใช้เกณฑ์การพิจารณาค่า W เฉลี่ย และจำนวนรอบเฉลี่ยในการเปรียบเทียบควบคู่กันไป โดยที่ตารางที่ 6.9 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 5 คำตอบ 10 คำตอบ 15 คำตอบ และ 20 คำตอบ พบว่าที่จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 5 คำตอบ ใช้จำนวนรอบเท่ากับ 13 รอบ และค่า W เท่ากับ 0.88773 น้อยที่สุด และจากตารางที่ 6.10 เมื่อพิจารณาที่ค่า W ที่จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 15 คำตอบ และ 20 คำตอบ จะมีค่า W เท่ากันคือ 0.88773 ดังนั้นจึงพิจารณาที่จำนวนรอบ ซึ่งจำนวนรอบเท่ากับ 13 รอบ ที่จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบจะใช้จำนวนรอบน้อยที่สุด ตารางที่ 6.11 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าครีมีเริ่มต้นค่าต่าง ๆ ที่ค่าครีมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 จะพบว่าใช้จำนวนรอบเท่ากับ 12 รอบ และค่า W เท่ากับ 0.88770 ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุด และตารางที่ 6.12 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.1 1.2 1.3 และ 1.4 พบว่าที่ค่าปรับลดครีมีเท่ากับ 1.3 จะใช้จำนวนรอบเท่ากับ 12 รอบ และค่า W เท่ากับ 0.88773 ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุด จากที่นำเสนอทั้งหมดข้างต้น สรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่ใช้ในงานนี้ ประกอบไปด้วยจำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 5 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ ค่าครีมีเริ่มต้น

เท่ากับ 0.5 และค่าปรับลดมีเท่ากับ 1.3 ซึ่งจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะให้ผลการหาค่า W เท่ากับ 0.8877 ที่จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 12 รอบ ตามรูปที่ 6.16 จากรูปดังกล่าว จะสังเกตได้ว่า ค่า W กรณีใช้ค่าพารามิเตอร์ตามที่ทดสอบ (new parameters) จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ case IV ที่ไม่มีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม



รูปที่ 6.16 การหาค่าตอบ W

6.3.4 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

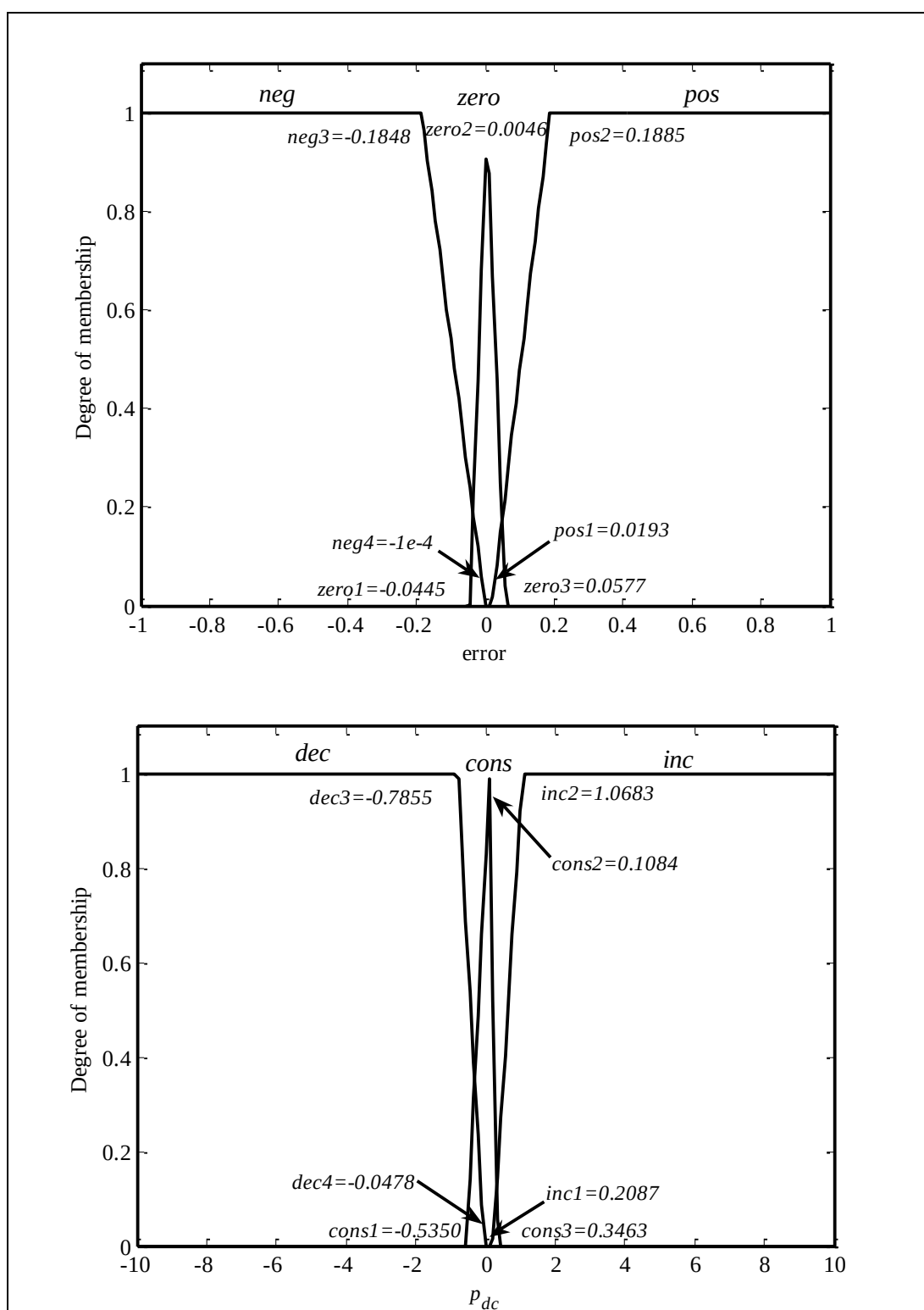
การจำลองสถานการณ์การปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงของ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยวิธี ATS ตามรูปที่ 6.1 จากรูปดังกล่าว ในส่วนของตัว ควบคุมแบบฟuzzyลอจิกใช้การอนุมานฟuzzyแบบแมมดานิด้วยวิธีค่าสูงสุด - ต่ำสุด และฟuzzyฟิเคชัน ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด การตรวจจับฮาร์มอนิกจะใช้วิธี PQ ที่มีการปรับปรุงสมรรถนะการ ตรวจจับฮาร์มอนิกที่ได้จากบทที่ 3 และการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟuzzy ลอจิกจะใช้ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้รับการปรับปรุงสมรรถนะด้วยวิธี ATS ในบทที่ 5

โดยชี้วัดประสิทธิผลด้วยค่า %error ของแรงดันบัลไฟตรงและค่า %THD ตามสมการที่ (3.18) ซึ่งสามารถพิจารณาผลการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลั้ง แอ็กทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกได้ดังตารางที่ 6.13

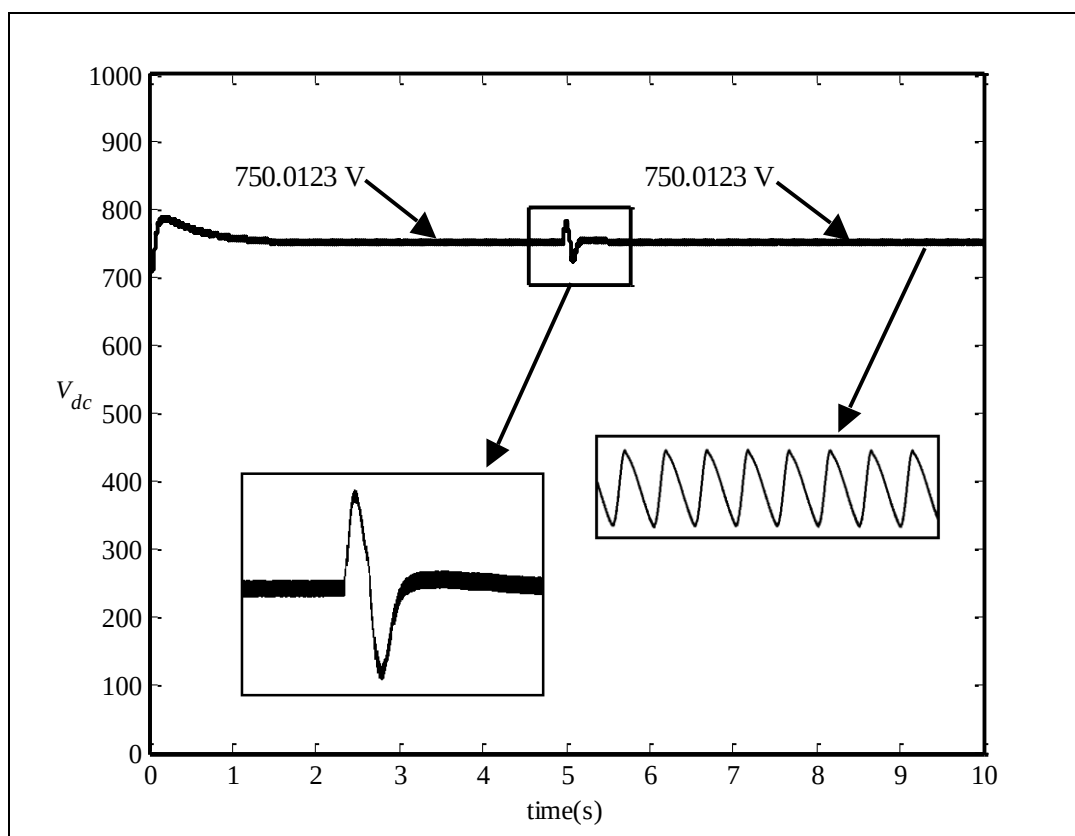
ตารางที่ 6.13 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

%THD หลังการชดเชย	เฟส			%THD _{av}	%error
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		
ปรับปรุงสมรรถนะ ด้วยวิธี ATS	0.9041	0.8983	0.9010	0.9011	0.0016
ข้อมูลชุดที่ 3	0.9947	0.9719	0.9957	0.9874	0.0479

จากตารางที่ 6.13 สังเกตได้ว่าเมื่อทำการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยวิธี ATS ค่า %error ของแรงดันบัลไฟตรงจะมีค่าเท่ากับ 0.0016% และส่งผลให้ค่า %THD_{av} หลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0.9011% ซึ่งค่า %error และค่า %THD_{av} ดังกล่าว จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับข้อมูลชุดที่ 3 ที่ได้จากการทดสอบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพตามตารางที่ 6.5 ซึ่งลักษณะฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี ATS พิจารณาได้จากรูปที่ 6.17 และผลการจำลองสถานการณ์การปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยวิธี ATS แสดงไว้ดังรูปที่ 6.18 และรูปที่ 6.19 โดยทำการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวตั้งแต่เวลา 0 ถึง 10 วินาที ทำการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานของวงจรเรียงกระแสจาก $R = 130\ \Omega$ เป็น $R = 260\ \Omega$ ในช่วงเวลา 4.88 ถึง 5.16 วินาที



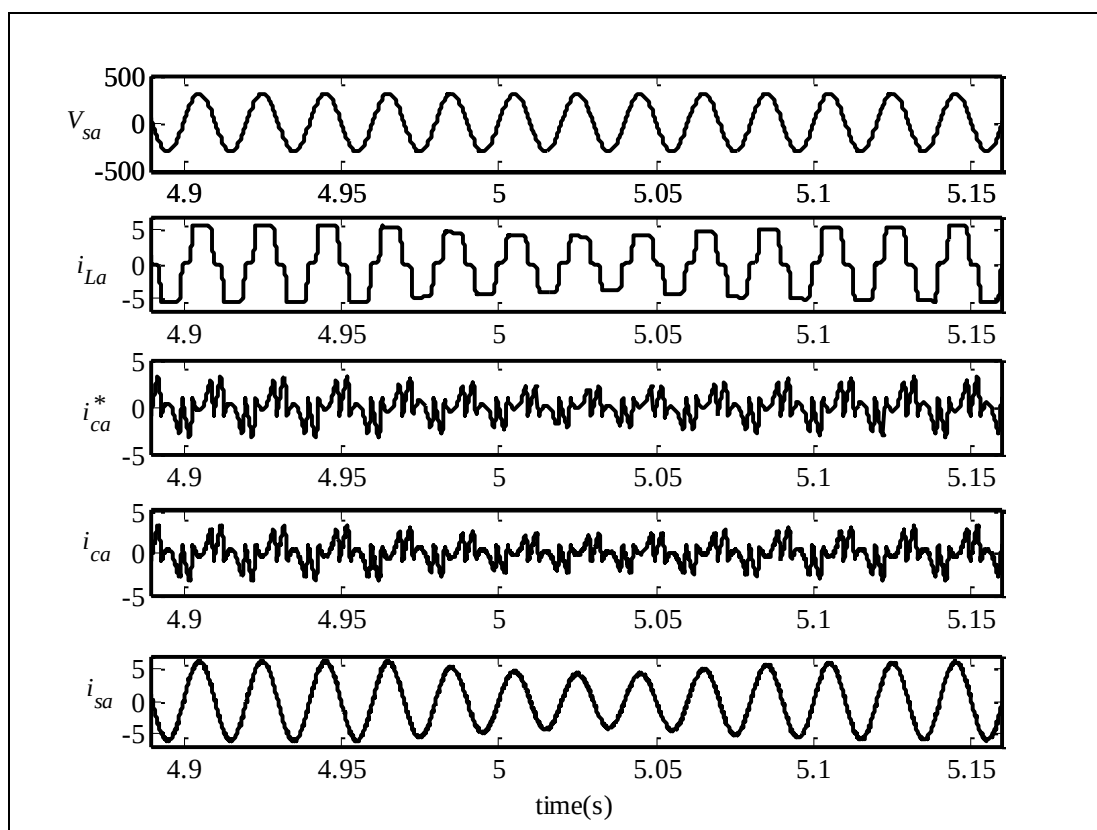
รูปที่ 6.17 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการค้นหาด้วย ATS



รูปที่ 6.18 ค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน
ที่ปรับปรุงสมรรถนะด้วยวิธี ATS

จากรูปที่ 6.18 สังเกตได้ว่าค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานในช่วงก่อนมีการเปลี่ยนแปลงโหลด มีค่าประมาณ 750.0123 V ใกล้เคียงตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้เวลาในการลู่เข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 2 วินาที จากนั้นเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา 4.96 ถึง 5.04 วินาที สังเกตได้ว่าค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 784 V และลดลงลู่เข้าสู่ 750.0123 V เช่นเดิมโดยใช้เวลาประมาณ 1 วินาที สำหรับรูปที่ 6.19 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเฟส α ในช่วงเวลา 4.88 ถึง 5.16 วินาที สังเกตได้ว่ารูปสัญญาณของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (i_{sa}) มีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์ โดยที่กรณีโหลด $R=130\ \Omega$ ค่ายอดกระแสไฟฟ้าประมาณ 6 A และกรณีโหลด $R=260\ \Omega$ ค่ายอดกระแสไฟฟ้าประมาณ 4 A ทั้งนี้เนื่องจากวงจรรอกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชย (i_{ca}) ได้ตามลักษณะรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิง (i_{ca}^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง

จากผลดังกล่าว จึงทำให้ค่า %THD เหลือภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเท่ากับ 0.9011% ซึ่งค่า %THD เหลือดังกล่าว อยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992



รูปที่ 6.19 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส a เมื่อได้รับการปรับปรุงสมรรถนะ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยวิธี ATS

6.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็น วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน จำเป็นต้องมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงดังกล่าวให้มีค่า ตรงตามที่ทำการออกแบบไว้ ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงพบว่า กรณีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่ได้จากการเปรียบเทียบข้อมูล ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้ง 3 ชุด ที่ได้จากการออกแบบจากประสบการณ์ของผู้วิจัย จะสังเกตได้ว่า ข้อมูลชุดที่ 3 จะให้ค่า %error ของแรงดันไฟฟ้าตรงน้อยที่สุดเท่ากับ 0.0479% และค่า %THD หลัง การชดเชยของกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.9874% ซึ่งสามารถควบคุมค่า

แรงดันบัลไฟตรงได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ และให้ประสิทธิภาพที่มากกว่ากรณีที่ไม่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่ไม่สามารถคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงไว้ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด นอกจากนี้ในบทนี้ได้นำเสนอ การปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานด้วยวิธี ATS โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกให้มีค่า %THD และค่า %error น้อยกว่าการออกแบบจากประสบการณ์ของผู้วิจัย โดยค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่เหมาะสมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 5 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 และค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 โดยฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพในการค้นหาด้วยวิธี ATS ส่งผลให้ค่า %THD ลดลงตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 เท่ากับ 0.9011% และมีค่า %error เท่ากับ 0.0016% และเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมจะพบว่ากรณีตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่มีการออกแบบฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งหมด 14 พารามิเตอร์ด้วยวิธี ATS มีสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่ได้จากการออกแบบจากประสบการณ์ของผู้วิจัย

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมาเกี่ยวกับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกคือ การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ร่วมกับตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในการจูนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ ซึ่งผลงานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งหรือ วิธี PQ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าทั้งชนิดสมดุลและไม่สมดุล โดยรายละเอียดเนื้อหาของนิยามส่วนประกอบต่าง ๆ ของวิธี PQ ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 นอกจากนี้ในบทดังกล่าวได้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ โดยทำการปรับปรุงที่วงจรกรองสำหรับใช้แยกปริมาณฮาร์มอนิกออกจากกำลังแอกทีฟมูลฐาน ซึ่งจากการทดสอบพบว่าวงจรกรองผ่านสูงอันดับที่ 2 ที่ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 10 Hz ส่งผลให้ค่า %THD เหลือทั้งสามเฟสเท่ากับ 0.3362% ซึ่งให้สมรรถนะในการตรวจจับฮาร์มอนิกดีที่สุด

การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกเป็นวิธีการควบคุมแบบชาญฉลาดที่พึงพาประสบการณ์ของมนุษย์เป็นพื้นฐานในการควบคุม โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำของระบบ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ทฤษฎีเกี่ยวกับตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก และมีการออกแบบค่าฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกทั้งหมด 21 พารามิเตอร์ โดยจากการเปรียบเทียบข้อมูลทั้ง 3 ชุด ที่ได้จากการออกแบบจากประสบการณ์ของผู้วิจัยจะพบว่าข้อมูลชุดที่ 3 จะให้ค่า %THD หลังการชดเชยของกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดเท่ากับ 1.1243% ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4

การปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกโดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์คือ วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (ATS) ซึ่งสิ่งสำคัญในการค้นหาด้วยวิธีดังกล่าวคือ การกำหนดขอบเขตของการค้นหา และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสม นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมและวิธีการดีฟัซซิฟิเคชันกับการอนุมานแบบฟัซซีจะพบว่ากรณีการควบคุมด้วยวิธี FLC + ATS มีสมรรถนะการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยดีที่สุดที่ค่า %THD เท่ากับ 0.8767% และการอนุมานแบบแมมดานิดด้วยวิธีค่าสูงสุด - ต่ำสุดที่มีการดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธี MOM ให้ผลดีที่สุด รายละเอียดต่าง ๆ ของการปรับปรุงฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งหมด 21 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ตัวเก็บประจุให้มีค่าคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากค่าแรงดันดังกล่าวมีผลต่อสมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการควบคุมค่าแรงดันดังกล่าวโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ซึ่งดัชนีชี้วัดสมรรถนะของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกนี้ จะดูที่ %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย และดูที่ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าตรงที่ต้องการกับแรงดันไฟฟ้าตรงจริง และจากผลการจำลองสถานการณ์พบว่ากรณีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกข้อมูลฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้งหมด 14 พารามิเตอร์ของข้อมูลชุดที่ 3 จะให้ค่า %error ของแรงดันไฟฟ้าตรงน้อยที่สุดเท่ากับ 0.0479% และค่า %THD หลังการชดเชยของกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.9874% ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่มากกว่ากรณีที่ไม่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรง นอกจากนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยวิธี ATS ซึ่งผลการปรับปรุงฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพทั้ง 14 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกด้วยวิธี ATS ส่งผลให้ค่า %error เท่ากับ 0.0016% และค่า %THD ลดลงตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 เท่ากับ 0.9011% ซึ่งรายละเอียดการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6

7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- ควรมีการกำจัดสัญญาณรบกวนเนื่องจากการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไอจีบีที ที่นำมาสร้างเป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

- ควรมีการนำเสนอการค้นหาฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิก โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการค้นหาแบบเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคเพิ่มเติม

- ควรมีการนำผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากซอฟต์แวร์มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางฮาร์ดแวร์เพิ่มเติม เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแยกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิก

- ควรมีการนำวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวไปใช้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิกทั้งอินพุตและเอาต์พุตกับรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพในรูปแบบอื่น ๆ ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งผลที่ได้อาจจะดีกว่ารูปร่างใน shape 1 ก็ได้

รายการอ้างอิง

- ทศพร ณรงค์ฤทธิ์. (2553). การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สราวุฒิ สุจิตจร. (2538). พืชเชื้อล่อจิกกับระบบควบคุม. **วารสารเทคโนโลยีสุรนารี** 2(3): 171-196.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552).1. ปัญหาเชิงคำนวณ. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Abdelkhalek, O., Benachaiba, C., and Haidas, M. (2008). A New Technique Applied to A Fuzzy Regulator to Control the Shunt Active Filter DC Bus Voltage. **Information Technology and Control**. 37(3): 227-232.
- Afonso, J., Couto, C., and Martins, J. (2000). Active Filters with Control Based on the p-q Theory. **IEEE Ind. Electronics Society Newsletter**. 47(3): 5-10.
- Akagi, H., Kanazawa, Y., and Nabae, A. (1983). Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. **Proc. In Int. Power Electronics Conf.** : 1375-1386.
- Akagi, H., Watanabe, E. H., and Aredes, M. (2007). **Instantaneous power theory and applications to power conditioning**. Piscataway, NJ: Wiley.
- Aytekin Bagis. (2003). Determining fuzzy membership functions with tabu search an application to control. **Fuzzy Sets and Systems**. 139: 209-225.
- Bayindir, K. C., Cuma, M. U., and Tumay, M. (2006). Hierarchical neuro-fuzzy current control for a shunt active power filter. **Neural Comput & Application**. 15: 223-238.
- Benalla, H., and Djeghloud, H. (2005). Shunt Active Filter Controlled by Fuzzy Logic. 18: 231-247.
- 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(2): 837-842.

- Bhende, C. N., Mishra, S., and Jain, S. K. (2006). Ts-Fuzzy- Controlled Active Power Filter for Load Compensation. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 21(3): 1459-1465.
- Cardenas, V., Vazquez, N., and Herndndez, C. (1998). Sliding mode control applied to a 3 Φ shunt active power filter using compensation with instantaneous reactive power theory. **29th IEEE Conference on Power Electronics Specialists**. : 236-241.
- Chaoui, A., Gaubert, J. P., Krim, F., and Rambault, L. (2007). Direct power control of shunt active filter. **Power Electronics and Applications**. : 1-11.
- Chen, D., and Xie, S. (2004). Review of the control strategies applied to active power filters. **Proc. of DRPT 2004 Conference**. Hong Kong. 2: 666-670.
- Colak, I., Bayindir, R., Kaplan, O., and Tas, F. (2010). DC Bus Voltage Regulation of an Active Power Filter Using a Fuzzy Logic Controller. **The Ninth International Conference on Machine Learning and Applications**. ICMLA 2010. : 692-696.
- Dell Aquila, A., and Lecci, A. (2003). A Current Control for Three-Phase Four- Wire Shunt Active Filters. **AUTOMATIKA**. 44(3-4): 129-135.
- Dell Aquila, A., Delvino, G., Liserre, M., and Zancbetta, P. (2000). A New Fuzzy Logic Strategy for Active Power Filter. **IEE 2000 Power Electronics and Variable Speed Drives**. : 392-397.
- Dixon, J. W., Contardo, J. M., and Moran, L.A. (1999). A Fuzzy-Controlled Active Front-End Rectifier with Current Harmonic Filtering Characteristics and Minimum Sensing Variables. **IEEE Transactions on Power Electrinics**. 14(4): 724-729.
- Elham, B. M. (1992). A Harmonic Analysis of the Induction Watthour Meter's Registration Error. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 7(3): 1080-1088.
- Elmitwally, A., Abdelkader, S., and El-Kateb, M. (2000). Neural network controlled three-phase four-wire shunt active power filter. **Transmission and Distribution. IEE Proceedings**. 147: 87-92.
- Farrokhi, M., Jamali, S., and Mousavi, S. A. (2004). Fuzzy Logic based Indirect Current Control of the Shunt Active Power Filter. **Power Engineering Conference**. UPEC 2004. 1: 489-493.

- Garus, J., and Zak, B. (2010). Using of Soft Computing Techniques to Control of Underwater Robot. **International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR 2010)**. : 415-419.
- Hamadi, A., Al-Haddad, K., Lagact, P. J., and Chandra, A. (2004). Indirect current control techniques of Three Phase APF Using Fuzzy Logic and Proportional Integral Controller: Comparative analysis. **11th International Conference on Harmonics and Quality of Power**. : 363-366.
- Hamzah, M. K., Abdul Ghafar, A. F., and Mohd Hussain, M. N. (2008). Single-Phase Half-bridge Shunt Active Power Filter Employing Fuzzy Logic Control. **IEEE International Conference on Power Electronics**. : 552-558.
- Herman, N. S., Yusuf, I., and Shamsuddin. (2009). Genetic Algorithms and Designing Membership Function In Fuzzy Logic Controllers. **World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC 2009)**. : 1753-1758.
- IEEE Std. 519-1992. (1993). **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**.
- Ingram, D. M. E., and Round, S. D. (1997). A Novel Digital Hysteresis Current Controller for an Active Power Filter. **IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems**. 2: 744-749.
- Jain, S. K., Agrawal, P., and Gupta, H. O. (2002). Fuzzy logic controllel shunt active power filter for power quality improvement. **IEE Proc. Electr. Power Appli**. 149(5): 317-328.
- Karuppanan, P., and Kamalakanta, M. (2010). PLL with PI, PID and Fuzzy Logic Controllers based Shunt Active Power Line Conditioners. **International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems**. : 1-6.
- Kuma, P., and Mahajan, A. (2009). Soft Computing Techniques for the Control of an Active Power Filter. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 24(1): 452-461.
- Muhaidheen, M., and Meenakshi Sundaram, B. (2008). A Fuzzy Logic Controlled Sliding Mode Control (SMC) of Inverter in Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement. **International Journal of Electrical and Power Engineering**. 2(6): 398-402.

- Narasa Reddy T., and Subramanyam, M. V. (2009). Fuzzy Logic Controlled Shunt Active Power Filter for Mitigation of Harmonics with Different Membership Functions. **International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication technologies.** : 616-620.
- Narongrit T., Areerak K-L., and Srikaew A. (2009). Design of an Active Power Filter using Adaptive Tabu Search. **Proceedings of the 8th WSEAS Int. Conf. on Artificial Intelligence 2009.** : 314-318.
- Palandoken, M., Aksoy, M., and Tumay, M. (2005). A novel approach to active power filter control. **Electrical Engineering.** 87: 33-39.
- Peng, F. Z., Akagi, H., and Nabae, A. (1988). A New Approach to Compensation in Power Systems. **IEEE meeting.** 1: 874-880.
- Puangdowreong, D., and Sujitjorn, S., (2007). Obtaining an Optimum PID Controller Via Adaptive Tabu Search. **ICANNGA 2007.** Part II. LNCS 4432. : 747-755.
- Rice, D. E. (1986). Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics – Their Effect on Power Systems Components. **IEEE Transactions on Industrial.** 22(1): 161-177.
- Ross, T. (1995). Fuzzy logic with engineering applications. **McGraw-Hill.** New York. : 17-180.
- Sharmeela. C., Mohan, M. R., Uma, G., and Baskaran, J. (2007). Fuzzy Logic Controller Based Three-phase Shunt Active Filter for Line Harmonics Reduction. **Journal of Computer Science.** 3(2): 76-80.
- Singh, G. K., Singh, A. K., and Mitra, R. (2007). A simple fuzzy logic based robust active power filter for harmonics minimization under random load variation. **Electric Power System Research.** 77: 1101-1111.
- The Math Works, Inc. (2009). **MATLAB Fuzzy Logic Toolbox Help.**
- Thomas, T., Haddad, K., Joos, G., and Jaafari, A. (1998). Design and performance of active power filters. **IEEE Industry Applications Magazine.** 4: 38-46.
- Teng, M., Xiong, F., Wang, R., and Wu, Z. (2004). Using Genetic Algorithm for Weighted Fuzzy Rule-Based System. **Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation.** : 4292-4295.

- Wagner, V. E. (1993). Effects of Harmonics on Equipment. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 8(2): 672-680.
- Wen Jie Tian, Yue Tian, Lan Ai, and Cheng Liu. (2009). A New optimization Algorithm for Fuzzy Set Design. **International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybematics**. : 431-435.
- Zhang, Dai, Yu, and Kang. (2010). Current Compound Control Strategy for Single-Phase Shunt Active Power Filter. **Power and Energy Engineering Conference**. : 1-4.

ภาคผนวก ก

โปรแกรมควบคุมแบบพีซีล่อจิกแบบ 2 อินพุต

โปรแกรมควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกแบบ 2 อินพุต

โดยนางสาว ปรางจิระ ประสมศักดิ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
พ.ศ. 2553

โปรแกรม *fuzzy.m*

```
function output = fuzzy(error_a,errorrate_a,      n3      = n3a;
neg3a, neg4a, zero1a, zero2a, zero3a, pos1a,      n4      = n4a;
pos2a, n3a, n4a, z1a, z2a, z3a, p1a, p2a,         z1      = z1a;
dec3a, dec4a, cons1a, cons2a, cons3a,             z2      = z2a;
inc1a, inc2a);                                   z3      = z3a;
% โปรแกรมรับอินพุต 23 ค่า โดย 2 อินพุต          p1      = p1a;
ค่าแรก คือ ค่าความผิดพลาด และค่าอัตรา          p2      = p2a;
การเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด อินพุต 21        dec3     = dec3a;
ค่าหลัง คือ ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัว      dec4     = dec4a;
ควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก                          cons1    = cons1a;
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เอาต์พุตที่ได้        cons2    = cons2a;
จากตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก                    cons3    = cons3a;
dT      = 1e-5;                                inc1     = inc1a;
% กำหนดเวลาชักตัวอย่าง (วินาที)              inc2     = inc2a;
% กำหนดตัวแปรให้กับโปรแกรม                  % กำหนดรูปร่างของอินพุต error
error   = error_a;                             % line1 - neg
errorrate= errorrate_a;                       x1       = -2;
neg3    = neg3a;                              yy1      = [0:0.001:1];
neg4    = neg4a;                              % line2 - neg
zero1   = zero1a;                             x2       = [-2 neg3];
zero2   = zero2a;                             y2       = [1 1];
zero3   = zero3a;                             pi2      = polyfit(x2, y2, 1);
pos1    = pos1a;                              % สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด
pos2    = pos2a;                              x2 และ y2
```

```

x2n = [-2: dT: neg3];
yy2 = polyval(pi2, x2n);
% หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง pi2 และ x2n
% line3 - neg
x3 = [neg3 neg4];
y3 = [1 0];
p3 = polyfit(x3, y3, 1);
% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x3
และ y3
x3n = [neg3: dT: neg4];
yy3 = polyval(p3, x3n);
% หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p3 และ x3n
% line1 - zero
x4 = [zero1 zero2];
y4 = [0 1];
p4 = polyfit(x4, y4, 1);
% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x4
และ y4
x4n = [zero1: dT: zero2];
yy4 = polyval(p4, x4n);
% หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p4 และ x4n
% line2 - zero
x5 = [zero2 zero3];
y5 = [1 0];
p5 = polyfit(x5, y5, 1);
% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x5
และ y5
x5n = [zero2: dT: zero3];
yy5 = polyval(p5, x5n);
% หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p5 และ x5n

% line1 - pos
x6 = [pos1 pos2];
y6 = [0 1];
p6 = polyfit(x6, y6, 1);
% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x6
และ y6
x6n = [pos1: dT: pos2];
yy6 = polyval(p6, x6n);
% หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p6 และ x6n
% line2 - pos
x7 = [pos2 2];
y7 = [1 1];
p7 = polyfit(x7, y7, 1);
% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x7
และ y7
x7n = [pos2: dT: 2];
yy7 = polyval(p7, x7n);
% หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p7 และ x7n
% line3 - pos
x8 = 2;
yy8 = [0: 0.001: 1];
% กำหนดรูปร่างของอินพุต error rate
% line1 - n
x9 = -1;
yy9 = [0: 0.001: 1];
% line2 - n
x10 = [-1 n3];
y10 = [1 1];
p10 = polyfit(x10, y10, 1);

```

```

% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x10 yy13 = polyval(p13, x13n);
และ y10 % หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p13 และ x13n
x10n = [-1: dT: n3]; % line1 - p
yy10 = polyval(p10, x10n); x14 = [p1 p2];
% หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p10 และ x10n y14 = [0 1];
% line3 - n p14 = polyfit(x14, y14, 1);
x11 = [n3 n4]; % สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x14
y11 = [1 0]; และ y14
p11 = polyfit(x11, y11, 1); x14n = [p1: dT: p2];
% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x11 yy14 = polyval(p14, x14n);
และ y11 % หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p14 และ x14n
x11n = [n3: dT: n4]; % line2 - p
yy11 = polyval(p11, x11n); x15 = [p2 1];
% หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p11 และ x11n y15 = [1 1];
% line1 - z p15 = polyfit(x15, y15, 1);
x12 = [z1 z2]; % สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x15
y12 = [0 1]; และ y15
p12 = polyfit(x12, y12, 1); x15n = [p2: dT: 1];
% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x12 yy15 = polyval(p15, x15n);
และ y12 % หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p15 และ x15n
x12n = [z1: dT: z2]; % line3 - p
yy12 = polyval(p12, x12n); x16 = 1;
% หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p12 และ x12n yy16 = [0: 0.001: 1];
% line2 - z % กำหนดรูปร่างของเอาต์พุต
x13 = [z2 z3]; % line1 - dec
y13 = [1 0]; x17 = -1;
p13 = polyfit(x13, y13, 1); yy17 = [0: 0.001: 1];
% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด % line2 - dec
x13 และ y13 x18 = [-1 dec3];
x13n = [z2: dT: z3]; y18 = [1 1];

```

```

p18 = polyfit(x18, y18, 1);          x21n = [cons2: dT: cons3];
% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x18 yy21 = polyval(p21, x21n);
และ y18                             % หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p21 และ x21n
x18n = [-1: dT: dec3];              % line1 - inc
yy18 = polyval(p18, x18n);          x22 = [inc1 inc2];
% หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p18 และ x18n yy22 = [0 1];
% line3 - dec                        p22 = polyfit(x22, y22, 1);
x19 = [dec3 dec4];                  % สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x22
y19 = [1 0];                        และ y22
p19 = polyfit(x19, y19, 1);          x22n = [inc1: dT: inc2];
% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x19 yy22 = polyval(p22, x22n);
และ y19                             % หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p22 และ x22n
x19n = [dec3: dT: dec4];            % line2 - inc
yy19 = polyval(p19, x19n);          x23 = [inc2 1];
% หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p19 และ x19n yy23 = [1 1];
% line1 - cons                       p23 = polyfit(x23, y23, 1);
x20 = [cons1 cons2];                % สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x23
y20 = [0 1];                        และ y23
p20 = polyfit(x20, y20, 1);          x23n = [inc2: dT: 1];
% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x20 yy23 = polyval(p23, x23n);
และ y20                             % หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p23 และ x23n
x20n = [cons1: dT: cons2];          % line3 - inc
yy20 = polyval(p20, x20n);          x24 = 1;
% หาจุดตัดแกน y ของเส้นตรง p20 และ x20n yy24 = [0: 0.001: 1];
% line2 - cons                       %%% เงื่อนไขที่ 1 (error<=neg3)
x21 = [cons2 cons3];                if error<=neg3 & errorrate<=n3
y21 = [1 0];                        output = (dec3-1)/2;
p21 = polyfit(x21, y21, 1);          elseif error<=neg3 & errorrate<z1
% สร้างสมการเส้นตรงที่ประกอบด้วยจุด x21 & errorrate>n3
และ y21                             membl = 1;

```

```

memb2 = polyval(p11, errorrate);      dec = min(dec3a, dec3b);
memb = min(memb1, memb2);            output = (dec-1)/2;
% เลือกระดับค่าฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพน้อยที่สุด
elseif error<=neg3 & errorrate<=z2
    & errorrate>n4
    xl = [0 1];                      memb1 = 1;
    yl = [dec4 dec3];                memb2 = polyval(p12, errorrate);
    pl = polyfit(xl, yl, 1);          memb = min(memb1, memb2);
    xln = [0: dT: 1];                xl = [0 1];
    yyl = polyval(pl, xln);           yl = [dec4 dec3];
    dec3a = polyval(pl, memb);         pl = polyfit(xl, yl, 1);
    output = (dec3a-1)/2;              xln = [0: dT: 1];
elseif error<=neg3 & errorrate<=n4
    & errorrate>=z1                  yyn = polyval(pl, xln);
    memb1 = 1;                       dec3a = polyval(pl, memb);
    memb_a = polyval(p11, errorrate); output = (dec3a-1)/2;
    memb_b = polyval(p12, errorrate); elseif error<=neg3 & errorrate<p1
    memb2 = min(memb1, memb_a);        & errorrate>z2
    memb3 = min(memb1, memb_b);        memb1 = 1;
    xl = [0 1];                      memb2 = polyval(p13, errorrate);
    yl = [dec4 dec3];                memb = min(memb1, memb2);
    pl = polyfit(xl, yl, 1);          xl = [0 1];
    xln = [0: dT: 1];                yl = [dec4 dec3];
    yyn = polyval(pl, xln);           pl = polyfit(xl, yl, 1);
    dec3a = polyval(pl, memb2);        xln = [0: dT: 1];
    xl = [0 1];                      yyn = polyval(pl, xln);
    yl = [dec4 dec3];                dec3a = polyval(pl, memb);
    pl = polyfit(xl, yl, 1);           output = (dec3a-1)/2;
    xln = [0: dT: 1];                elseif error<=neg3 & errorrate<=z3
    yyn = polyval(pl, xln);            & errorrate>=p1
    dec3b = polyval(pl, memb3);        memb1 = 1;
    memb_a = polyval(p13, errorrate);

```

```

memb_b= polyval(p14, errorrate);
memb2= min(memb1, memb_a);
memb3= min(memb1, memb_b);
xl    = [0 1];
yl    = [dec4 dec3];
pl    = polyfit(xl, yl, 1);
xln   = [0: dT: 1];
yyl   = polyval(pl, xln);
dec3a = polyval(pl, memb2);
xl    = [0 1];
yl    = [dec4 dec3];
pl    = polyfit(xl, yl, 1);
xln   = [0: dT: 1];
yyl   = polyval(pl, xln);
dec3b = polyval(pl, memb3);
dec   = min(dec3a, dec3b);
output = (dec-1)/2;
elseif error<=neg3 & errorrate<p2
    & errorrate>z3
    memb1 = 1;
    memb2= polyval(p14, errorrate);
    memb = min(memb1, memb2);
    xl    = [0 1];
    yl    = [dec4 dec3];
    pl    = polyfit(xl, yl, 1);
    xln   = [0: dT: 1];
    yyn   = polyval(pl, xln);
    dec3a = polyval(pl, memb);
    output = (dec3a-1)/2;
elseif error<=neg3 & errorrate>=p2
    output    = (dec3-1)/2;
    %%% เงื่อนไขที่ 2 (error>neg3 และ
    error<zero1)
elseif error>neg3 & error<zero1
    & errorrate<=n3
    memb1    = polyval(p3, error);
    memb2    = 1;
    memb     = min(memb1, memb2);
    xl       = [0 1];
    yl       = [dec4 dec3];
    pl       = polyfit(xl, yl, 1);
    xln      = [0: dT: 1];
    yyn      = polyval(pl, xln);
    dec3a    = polyval(pl, memb);
    output   = (dec3a-1)/2;
elseif error>neg3 & error<zero1
    & errorrate>n3 & errorrate<z1
    memb1    = polyval(p3, error);
    memb2    = polyval(p11, errorrate);
    memb     = min(memb1, memb2);
    xl       = [0 1];
    yl       = [dec4 dec3];
    pl       = polyfit(xl, yl, 1);
    xln      = [0: dT: 1];
    yyn      = polyval(pl, xln);
    dec3a    = polyval(pl, memb);
    output   = (dec3a-1)/2;
elseif error>neg3 & error<zero1
    & errorrate>=z1 & errorrate<=n4
    memb_c   = polyval(p3, error);

```

```

memb_a = polyval(p11, errorrate);
memb_b = polyval(p12, errorrate);
if memb_a & memb_c
    memb1 = min(memb_a, memb_c);
    xl = [0 1];
    yl = [dec4 dec3];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    xln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, xln);
    dec3a = polyval(pl, memb1);
end
if memb_b & memb_c
    memb2=min(memb_b,memb_c);
    xl = [0 1];
    yl = [dec4 dec3];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    xln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, xln);
    dec3b = polyval(pl, memb2);
end
if memb1>memb2
    output = (dec3a-1)/2;
else
    output = (dec3b-1)/2;
end
elseif error>neg3 & error<zero1
    & errorrate>n4 & errorrate<=z2
    memb1 = polyval(p3, error);
    memb2 = polyval(p12, errorrate);
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [dec4 dec3];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    xln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, xln);
    dec3a = polyval(pl, memb);
    output = (dec3a-1)/2;
elseif error>neg3 & error<zero1
    & errorrate>=p1 & errorrate<=z3
    memb_c = polyval(p3, error);
    memb_a = polyval(p13, errorrate);
    memb_b = polyval(p14, errorrate);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        xl = [0 1];
        yl = [dec4 dec3];
        pl = polyfit(xl, yl, 1);
        xln = [0: dT: 1];
        yyl = polyval(pl, xln);
        dec3a = polyval(pl, memb);
        output = (dec3a-1)/2;
    end
end

```

```

yyl      = polyval(pl, xln);
dec3a    = polyval(pl, memb1);
end
if memb_b & memb_c
    memb2= min(memb_b, memb_c);
    xl     = [0 1];
    yl     = [dec4 dec3];
    pl     = polyfit(xl, yl, 1);
    xln    = [0: dT: 1];
    yyn    = polyval(pl, xln);
    dec3b = polyval(pl, memb2);
end
if memb1>memb2
    output = (dec3a-1)/2;
else
    output = (dec3b-1)/2;
end
elseif error>neg3 & error<zero1
    & errorrate>z3 & errorrate<p2
    memb1= polyval(p3, error);
    memb2= polyval(p14, errorrate);
    memb = min(memb1, memb2);
    xl     = [0 1];
    yl     = [dec4 dec3];
    pl     = polyfit(xl, yl, 1);
    xln    = [0: dT: 1];
    yyn    = polyval(pl, xln);
    dec3a  = polyval(pl, memb);
    output = (dec3a-1)/2;
elseif error>neg3 & error<zero1
    & errorrate>=p2
    memb1  = polyval(p3, error);
    memb2  = 1;
    memb   = min(memb1, memb2);
    xl     = [0 1];
    yl     = [dec4 dec3];
    pl     = polyfit(xl, yl, 1);
    xln    = [0: dT: 1];
    yyn    = polyval(pl, xln);
    dec3a  = polyval(pl, memb);
    output = (dec3a-1)/2;
%%% เงื่อนไขที่ 3 (error>=zero1 และ
error<=neg4)
elseif error>=zero1 & error<=neg4
    & errorrate<=n3
    memb_c = 1;
    memb_a = polyval(p3, error);
    memb_b = polyval(p4, error);
    if memb_a & memb_c
        memb1=min(memb_a,memb_c);
        xl     = [0 1];
        yl     = [dec4 dec3];
        pl     = polyfit(xl, yl, 1);
        xln    = [0: dT: 1];
        yyn    = polyval(pl, xln);
        dec3a  = polyval(pl, memb1);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb2 = min(memb_b, memb_c);
        xl     = [0 1];

```



```

yl      = [dec4 dec3];
pl      = polyfit(xl, yl, 1);
xln     = [0: dT: 1];
yy1     = polyval(pl, xln);
dec3b   = polyval(pl, memb2);
end
if memb1>memb2
    output = (dec3a-1)/2;
else
    output = (dec3b-1)/2;
end
elseif error>=zero1 & error<=neg4
    & errorrate>n3 & errorrate<z1
    memb1 = polyval(p11, errorrate);
    memb_a = polyval(p3, error);
    memb_b = polyval(p4, error);
    memb_c = polyval(p11, errorrate);
    memb_d = polyval(p12, errorrate);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        xl     = [0 1];
        yl     = [dec4 dec3];
        pl     = polyfit(xl, yl, 1);
        xln    = [0: dT: 1];
        yy1    = polyval(pl, xln);
        dec3a  = polyval(pl, memb1);
    end
    if memb_a & memb_d
        memb2 = min(memb_a, memb_d);
        xl     = [0 1];
        yl     = [dec4 dec3];
        pl     = polyfit(xl, yl, 1);
        xln    = [0: dT: 1];
        yy1    = polyval(pl, xln);
        dec3b  = polyval(pl, memb2);
    end
end

```



```

yl      = [dec4 dec3];
pl      = polyfit(xl, yl, 1);
xln     = [0: dT: 1];
yy1     = polyval(pl, xln);
dec3a   = polyval(pl, memb3);
output  = (dec3c-1)/2;
else
    output = (cons2a+1)/2;
end
elseif error>=zero1 & error<=neg4
    & errorrate>n4 & errorrate<=z2
    memb_c = polyval(p12, errorrate);
    memb_a = polyval(p3, error);
    memb_b = polyval(p4, error);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        xl     = [0 1];
        yl     = [dec4 dec3];
        pl     = polyfit(xl, yl, 1);
        xln    = [0: dT: 1];
        yy1    = polyval(pl, xln);
        dec3a   = polyval(pl, memb1);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb2 = min(memb_b, memb_c);
        xl     = [0 1];
        yl     = [cons1 cons2];
        pl     = polyfit(xl, yl, 1);
        xln    = [0: dT: 1];
        yy1    = polyval(pl, xln);
        cons2a = polyval(pl, memb2);
        xla    = [0 1];
        yla    = [cons3 cons2];
        pla    = polyfit(xla, yla, 1);
        xlan   = [0: dT: 1];
        yy1a   = polyval(pla, xlan);
        cons2b = polyval(pla, memb2);
    end
    if memb1>memb2
        output = (dec3a-1)/2;
    else
        output = (cons2a+cons2b)/2;
    end
elseif error>=zero1 & error<=neg4 &
    errorrate<p1 & errorrate>z2
    memb_c = polyval(p13, errorrate);
    memb_a = polyval(p3, error);
    memb_b = polyval(p4, error);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        xl     = [0 1];
        yl     = [dec4 dec3];
        pl     = polyfit(xl, yl, 1);
        xln    = [0: dT: 1];
        yy1    = polyval(pl, xln);
        dec3a   = polyval(pl, memb1);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb2 = min(memb_b, memb_c);
        xl     = [0 1];

```

```

yl      = [cons1 cons2];
pl      = polyfit(xl, yl, 1);
xln     = [0: dT: 1];
yy1     = polyval(pl, xln);
cons2a  = polyval(pl, memb2);
xla     = [0 1];
yla     = [cons3 cons2];
pla     = polyfit(xla, yla, 1);
xlan    = [0: dT: 1];
yy1a    = polyval(pla, xlan);
cons2b  = polyval(pla, memb2);
end
if memb1>memb2
    output = (dec3a-1)/2;
else
    output = (cons2a+cons2b)/2;
end
elseif error>=zero1 & error<=neg4
    & errorrate<=z3 & errorrate>=p1
    memb_a = polyval(p3, error);
    memb_b = polyval(p4, error);
    memb_c = polyval(p13, errorrate);
    memb_d = polyval(p14, errorrate);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        x1     = [0 1];
        yl     = [dec4 dec3];
        pl     = polyfit(x1, yl, 1);
        xln    = [0: dT: 1];
        yy1    = polyval(pl, xln);
        dec3a  = polyval(pl, memb1);
    end
    if memb_b & memb_d
        memb2 = min(memb_b, memb_d);
        x1     = [0 1];
        yl     = [dec4 dec3];
        pl     = polyfit(x1, yl, 1);
        xln    = [0: dT: 1];
        yy1    = polyval(pl, xln);
        dec3b  = polyval(pl, memb2);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb3 = min(memb_b, memb_c);
        x1     = [0 1];
        yl     = [cons1 cons2];
        pl     = polyfit(x1, yl, 1);
        xln    = [0: dT: 1];
        yy1    = polyval(pl, xln);
        cons2a = polyval(pl, memb3);
        xla    = [0 1];
        yla    = [cons3 cons2];
        pla    = polyfit(xla, yla, 1);
        xlan   = [0: dT: 1];
        yy1a   = polyval(pla, xlan);
        cons2b = polyval(pla, memb3);
    end
    if memb_b & memb_d
        memb4 = min(memb_b, memb_d);
        xx1    = [0 1];
        yl     = [inc1 inc2];

```

```

pl      = polyfit(xl, yl, 1);
yln     = [0: dT: 1];
yy1     = polyval(pl, yln);
inc2a   = polyval(pl, memb4);
end
if memb4>memb3 & memb4>memb2
    & memb4>memb1
    xl    = [0 1];
    yl    = [inc1 inc2];
    pl    = polyfit(xl, yl, 1);
    yln   = [0: dT: 1];
    yy1   = polyval(pl, yln);
    inc2a = polyval(pl, memb4);
    output = (inc2a+1)/2;
elseif memb1>memb4 & memb1>memb3
    & memb1>memb2
    xl    = [0 1];
    yl    = [dec4 dec3];
    pl    = polyfit(xl, yl, 1);
    xln   = [0: dT: 1];
    yy1   = polyval(pl, xln);
    dec3a = polyval(pl, memb4);
    output = (dec3a-1)/2;
elseif memb2>memb1 & memb2>memb4
    & memb2>memb3
    xl    = [0 1];
    yl    = [dec4 dec3];
    pl    = polyfit(xl, yl, 1);
    xln   = [0: dT: 1];
    yy1   = polyval(pl, xln);
    dec3a = polyval(pl, memb2);
    output = (dec3a-1)/2;
elseif memb3>memb1 & memb3>memb4
    & memb3>memb2
    xl    = [0 1];
    yl    = [cons1 cons2];
    pl    = polyfit(xl, yl, 1);
    xln   = [0: dT: 1];
    yy1   = polyval(pl, xln);
    cons2a = polyval(pl, memb3);
    xla    = [0 1];
    yla    = [cons3 cons2];
    pla    = polyfit(xla, yla, 1);
    xlan   = [0: dT: 1];
    yy1a   = polyval(pla, xlan);
    cons2b = polyval(pla, memb3);
    output = (cons2a+cons2b)/2;
elseif memb4==memb3
    output = (1+cons2a)/2;
elseif memb4==memb1|memb4==memb2
    output = 0;
else
    output = (cons2b-1)/2;
end
elseif error>=zero1 & error<=neg4
    & errorrate<p2 & errorrate>z3
    memb_c = polyval(p14, errorrate);
    memb_a = polyval(p3, error);
    memb_b = polyval(p4, error);
    if memb_a & memb_c

```

```

memb1 = min(memb_a, memb_c);
xl     = [0 1];
yl     = [dec4 dec3];
pl     = polyfit(xl, yl, 1);
xln    = [0: dT: 1];
yyl    = polyval(pl, xln);
dec3a  = polyval(pl, memb1);
end
if memb_b & memb_c
    memb2 = min(memb_b, memb_c);
    xl     = [0 1];
    yl     = [inc1 inc2];
    pl     = polyfit(xl, yl, 1);
    yln    = [0: dT: 1];
    yyn    = polyval(pl, yln);
    inc2b  = polyval(pl, memb2);
end
if memb1>memb2
    output = (dec3a-1)/2;
else
    output = (inc2a+1)/2;
end
elseif error>=zero1 & error<=neg4
    & errorrate>=i2
    memb_c = 1;
    memb_a = polyval(p3, error);
    memb_b = polyval(p4, error);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        xl     = [0 1];
        yl     = [dec4 dec3];
        pl     = polyfit(xl, yl, 1);
        xln    = [0: dT: 1];
        yyn    = polyval(pl, xln);
        dec3a  = polyval(pl, memb1);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb2 = min(memb_b, memb_c);
        xl     = [0 1];
        yl     = [inc1 inc2];
        pl     = polyfit(xl, yl, 1);
        yln    = [0: dT: 1];
        yyn    = polyval(pl, yln);
        inc2b  = polyval(pl, memb2);
    end
    if memb1>memb2
        output = (dec3a-1)/2;
    else
        output = (inc2b+1)/2;
    end
    %%% เงื่อนไขที่ 4 (error>neg4 และ
    error<=zero2)
elseif error>neg4 & error<=zero2
    & errorrate<=n3
    memb1 = polyval(p4, error);
    memb2 = 1;
    memb  = min(memb1, memb2);
    xl     = [0 1];
    yl     = [dec4 dec3];
    pl     = polyfit(xl, yl, 1);

```

```

xln      = [0: dT: 1];
yy1      = polyval(pl, xln);
dec3a    = polyval(pl, memb);
output   = (dec3a-1)/2;
elseif error>neg4 & error<=zero2
    & errorrate<z1 & errorrate>n3
memb1    = polyval(p4, error);
memb2    = polyval(p11, errorrate);
memb     = min(memb1, memb2);
xl       = [0 1];
yl       = [dec4 dec3];
pl       = polyfit(xl, yl, 1);
xln      = [0: dT: 1];
yy1      = polyval(pl, xln);
dec3a    = polyval(pl, memb);
output   = (dec3a-1)/2;
elseif error>neg4 & error<=zero2
    & errorrate<=n4 & errorrate>=z1
memb_c   = polyval(p4, error);
memb_a   = polyval(p11, errorrate);
memb_b   = polyval(p12, errorrate);
if memb_a & memb_c
    memb1 = min(memb_a, memb_c);
xl       = [0 1];
yl       = [dec4 dec3];
pl       = polyfit(xl, yl, 1);
xln      = [0: dT: 1];
yy1      = polyval(pl, xln);
dec3a    = polyval(pl, memb1);
output   = (dec3a-1)/2;
end
if memb_b & memb_c
    memb2 = min(memb_b, memb_c);
xl       = [0 1];
yl       = [cons1 cons2];
pl       = polyfit(xl, yl, 1);
xln      = [0: dT: 1];
yy1      = polyval(pl, xln);
cons2a   = polyval(pl, memb2);
xla      = [0 1];
yla      = [cons3 cons2];
pla      = polyfit(xla, yla, 1);
xlan     = [0: dT: 1];
yy1a     = polyval(pla, xlan);
cons2b   = polyval(pla, memb2);
end
if memb1>memb2
    output = (dec3a-1)/2;
else
    output = (cons2a+cons2b)/2;
end
elseif error>neg4 & error<=zero2
    & errorrate<=z2& errorrate>n4
memb1    = polyval(p4, error);
memb2    = polyval(p12, errorrate);
memb     = min(memb1, memb2);
xl       = [0 1];
yl       = [cons1 cons2];
pl       = polyfit(xl, yl, 1);
xln      = [0: dT: 1];

```

```

yyl      = polyval(pl, xln);
cons2a   = polyval(pl, memb);
xla      = [0 1];
yla      = [cons3 cons2];
pla      = polyfit(xla, yla, 1);
xlan     = [0: dT: 1];
yylla    = polyval(pla, xlan);
cons2b   = polyval(pla, memb);
output   = (cons2a+cons2b)/2;
elseif error>neg4 & error<=zero2
    & errorrate<p1 & errorrate>z2
    memb1 = polyval(p4, error);
    memb2 = polyval(p13, errorrate);
    memb  = min(memb1, memb2);
    xl     = [0 1];
    yl     = [cons1 cons2];
    pl     = polyfit(xl, yl, 1);
    xln    = [0: dT: 1];
    yyll   = polyval(pl, xln);
    cons2a = polyval(pl, memb);
    xla    = [0 1];
    yla    = [cons3 cons2];
    pla    = polyfit(xla, yla, 1);
    xlan   = [0: dT: 1];
    yylla  = polyval(pla, xlan);
    cons2b = polyval(pla, memb);
end
if memb_b & memb_c
    memb2 = min(memb_b, memb_c);
    xl     = [0 1];
    yl     = [inc1 inc2];
    pl     = polyfit(xl, yl, 1);
    yln    = [0: dT: 1];
    yyll   = polyval(pl, yln);
    inc2   = polyval(pl, memb2);
end
if memb1>memb2
    output = (cons2a+cons2b)/2;
else
    output = (inc2+1)/2;

```



```

end
elseif error>neg4 & error<=zero2
    & errorrate<p2 & errorrate>z3
    memb1 = polyval(p4, error);
    memb2 = polyval(p14, errorrate);
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, yln);
    inc2 = polyval(pl, memb);
    output = (inc2+1)/2;
elseif error>neg4 & error<=zero2
    & errorrate>=p2
    memb1 = polyval(p4, error);
    memb2 = 1;
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, yln);
    inc2 = polyval(pl, memb);
    output = (inc2+1)/2;
%%%% เงื่อนไขที่ 5 (error>zero2 และ
error<pos1)
elseif error>zero2 & error<pos1
    & errorrate<=n3
    memb1 = polyval(p5, error);
    memb2 = 1;
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [dec4 dec3];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    xln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, xln);
    dec3a = polyval(pl, memb);
    output = (dec3a-1)/2;
elseif error>zero2 & error<pos1
    & errorrate<z1 & errorrate>n3
    memb1 = polyval(p5, error);
    memb2 = polyval(p11, errorrate);
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [dec4 dec3];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    xln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, xln);
    dec3a = polyval(pl, memb);
    output = (dec3a-1)/2;
elseif error>zero2 & error<pos1
    & errorrate<=n4 & errorrate>=z1
    memb_c = polyval(p5, error);
    memb_a = polyval(p11, errorrate);
    memb_b = polyval(p12, errorrate);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        xl = [0 1];
        yl = [dec4 dec3];
    end
end

```

```

pl      = polyfit(xl, yl, 1);
xln     = [0: dT: 1];
yyl     = polyval(pl, xln);
dec3a   = polyval(pl, memb);
end
if memb_b & memb_c
    memb2 = min(memb_b, memb_c);
    xl    = [0 1];
    yl    = [cons1 cons2];
    pl    = polyfit(xl, yl, 1);
    xln   = [0: dT: 1];
    yyn   = polyval(pl, xln);
    cons2a = polyval(pl, memb2);
    xla   = [0 1];
    yla   = [cons3 cons2];
    pla   = polyfit(xla, yla, 1);
    xlan  = [0: dT: 1];
    yya   = polyval(pla, xlan);
    cons2b = polyval(pla, memb);
    output = (cons2a+cons2b)/2;
elseif error>zero2 & error<pos1
    & errorrate<p1 & errorrate>z2
    memb1 = polyval(p5, error);
    memb2 = polyval(p13, errorrate);
    memb  = min(memb1, memb2);
    xl    = [0 1];
    yl    = [cons1 cons2];
    pl    = polyfit(xl, yl, 1);
    xln   = [0: dT: 1];
    yyn   = polyval(pl, xln);
    cons2a = polyval(pl, memb);
    xla   = [0 1];
    yla   = [cons3 cons2];
    pla   = polyfit(xla, yla, 1);
    xlan  = [0: dT: 1];
    yya   = polyval(pla, xlan);
    cons2b = polyval(pla, memb);
    pl    = polyfit(xl, yl, 1);
    xln   = [0: dT: 1];
    yyn   = polyval(pl, xln);
    dec3a = polyval(pl, memb);
end
if memb1>memb2
    output = (dec3a-1)/2;
else
    output = (cons2a+cons2b)/2;
end
elseif error>zero2 & error<pos1
    & errorrate<=z2 & errorrate>n4
    memb1 = polyval(p5, error);
    memb2 = polyval(p12, errorrate);
    memb  = min(memb1, memb2);

```

```

output = (cons2a+cons2b)/2;
elseif error>zero2 & error<pos1
    & errorrate<=z3 & errorrate>=p1
    memb_c = polyval(p5, error);
    memb_a = polyval(p13, errorrate);
    memb_b = polyval(p14, errorrate);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        xl = [0 1];
        yl = [cons1 cons2];
        pl = polyfit(xl, yl, 1);
        xln = [0: dT: 1];
        yyl = polyval(pl, xln);
        cons2a = polyval(pl, memb1);
        xla = [0 1];
        yla = [cons3 cons2];
        pla = polyfit(xla, yla, 1);
        xlan = [0: dT: 1];
        yyla = polyval(pla, xlan);
        cons2b = polyval(pla, memb1);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb2 = min(memb_b, memb_c);
        xl = [0 1];
        yl = [inc1 inc2];
        pl = polyfit(xl, yl, 1);
        yln = [0: dT: 1];
        yyl = polyval(pl, yln);
        inc2b = polyval(pl, memb2);
    end
end

if memb1>memb2
    output = (cons2a+cons2b)/2;
else
    output = (inc2b+1)/2;
end
elseif error>zero2 & error<pos1
    & errorrate<p2 & errorrate>z3
    memb1 = polyval(p5, error);
    memb2 = polyval(p14, errorrate);
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, yln);
    inc2 = polyval(pl, memb);
    output = (inc2+1)/2;
elseif error>zero2 & error<pos1
    & errorrate>=p2
    memb1 = polyval(p5, error);
    memb2 = 1;
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, yln);
    inc2 = polyval(pl, memb);
    output = (inc2+1)/2;

```

```

%% เงื่อนไขที่ 6 (error>=pos1 และ
error<=zero3)
elseif error>=pos1 & error<=zero3
    & errorrate<=n3
    memb_c = 1;
    memb_a = polyval(p5, error);
    memb_b = polyval(p6, error);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        xl = [0 1];
        yl = [dec4 dec3];
        pl = polyfit(xl, yl, 1);
        xln = [0: dT: 1];
        yyl = polyval(pl, xln);
        dec3a = polyval(pl, memb1);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb2 = min(memb_b, memb_c);
        xl = [0 1];
        yl = [inc1 inc2];
        pl = polyfit(xl, yl, 1);
        yln = [0: dT: 1];
        yyl = polyval(pl, yln);
        inc2a = polyval(pl, memb2);
    end
    if memb1>memb2
        output = (dec3a-1)/2;
    else
        output = (inc2a+1)/2;
    end
end

```

```

elseif error>=pos1 & error<=zero3
    & errorrate>n3 & errorrate<z1
    memb_c = polyval(p11, errorrate);
    memb_a = polyval(p5, error);
    memb_b = polyval(p6, error);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        xl = [0 1];
        yl = [dec4 dec3];
        pl = polyfit(xl, yl, 1);
        xln = [0: dT: 1];
        yyl = polyval(pl, xln);
        dec3a = polyval(pl, memb1);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb2 = min(memb_b, memb_c);
        xl = [0 1];
        yl = [inc1 inc2];
        pl = polyfit(xl, yl, 1);
        yln = [0: dT: 1];
        yyl = polyval(pl, yln);
        inc2a = polyval(pl, memb2);
    end
    if memb1>memb2
        output = (dec3a-1)/2;
    else
        output = (inc2a+1)/2;
    end
elseif error>=pos1 & error<=zero3
    & errorrate>=z1 & errorrate<=n4

```

```

memb_a = polyval(p5, error);
memb_b = polyval(p6, error);
memb_c = polyval(p11, errorrate);
memb_d = polyval(p12, errorrate);
if memb_a & memb_c
    memb1 = min(memb_a, memb_c);
    x1     = [0 1];
    y1     = [dec4 dec3];
    pl     = polyfit(x1, y1, 1);
    xln    = [0: dT: 1];
    yyn    = polyval(pl, xln);
    dec3a  = polyval(pl, memb1);
end
if memb_a & memb_d
    memb2 = min(memb_a, memb_d);
    x1     = [0 1];
    y1     = [cons1 cons2];
    pl     = polyfit(x1, y1, 1);
    xln    = [0: dT: 1];
    yyn    = polyval(pl, xln);
    cons2a = polyval(pl, memb2);
    xla    = [0 1];
    yla    = [cons3 cons2];
    pla    = polyfit(xla, yla, 1);
    xlan   = [0: dT: 1];
    yynla  = polyval(pla, xlan);
    cons2b = polyval(pla, memb2);
end
if memb_b & memb_c
    memb3 = min(memb_b, memb_c);
    x1     = [0 1];
    y1     = [inc1 inc2];
    pl     = polyfit(x1, y1, 1);
    yln    = [0: dT: 1];
    yyn    = polyval(pl, yln);
    inc2a  = polyval(pl, memb3);
end
if memb_b & memb_d
    memb4 = min(memb_b, memb_d);
    x1     = [0 1];
    y1     = [inc1 inc2];
    pl     = polyfit(x1, y1, 1);
    yln    = [0: dT: 1];
    yyn    = polyval(pl, yln);
    inc2b  = polyval(pl, memb4);
end
if memb4>memb3 & memb4>memb2
    & memb4>memb1
    x1     = [0 1];
    y1     = [inc1 inc2];
    pl     = polyfit(x1, y1, 1);
    yln    = [0: dT: 1];
    yyn    = polyval(pl, yln);
    inc2b  = polyval(pl, memb4);
    output = (inc2b+1)/2;
elseif memb1>memb4 & memb1>memb3
    & memb1>memb2
    x1     = [0 1];
    y1     = [dec4 dec3];
    pl     = polyfit(x1, y1, 1);

```

```

xln      = [0: dT: 1];
yy1      = polyval(pl, xln);
dec3a    = polyval(pl, memb1);
output   = (dec3a-1)/2;
elseif memb2>memb1 & memb2>memb4
    & memb2>memb3
    x1     = [0 1];
    y1     = [cons1 cons2];
    pl     = polyfit(x1, y1, 1);
    xln    = [0: dT: 1];
    yy1    = polyval(pl, xln);
    cons2a = polyval(pl, memb2);
    xla    = [0 1];
    yla    = [cons3 cons2];
    pla    = polyfit(xla, yla, 1);
    xlan   = [0: dT: 1];
    yy1a   = polyval(pla, xlan);
    cons2b = polyval(pla, memb2);
    output = (cons2a+cons2b)/2;
else
    x1     = [0 1];
    y1     = [inc1 inc2];
    pl     = polyfit(x1, y1, 1);
    yln    = [0: dT: 1];
    yy1    = polyval(pl, yln);
    inc2a  = polyval(pl, memb3);
    output = (inc2a+1)/2;
end
elseif error>=pos1 & error<=zero3
    & errorrate>n4 & errorrate<=z2
    memb_c = polyval(p12, errorrate);
    memb_a = polyval(p5, error);
    memb_b = polyval(p6, error);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        x1     = [0 1];
        y1     = [cons1 cons2];
        pl     = polyfit(x1, y1, 1);
        xln    = [0: dT: 1];
        yy1    = polyval(pl, xln);
        cons2a = polyval(pl, memb1);
        xla    = [0 1];
        yla    = [cons3 cons2];
        pla    = polyfit(xla, yla, 1);
        xlan   = [0: dT: 1];
        yy1a   = polyval(pla, xlan);
        cons2b = polyval(pla, memb1);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb2 = min(memb_b, memb_c);
        x1     = [0 1];
        y1     = [inc1 inc2];
        pl     = polyfit(x1, y1, 1);
        yln    = [0 :dT: 1];
        yy1    = polyval(pl, yln);
        inc2a  = polyval(pl, memb2);
    end
    if memb1>memb2
        output = (cons2a+cons2b)/2;
    else

```

```

        output = (inc2a+1)/2;
    end
elseif error>=pos1 & error<=zero3
    & errorrate<p1 & errorrate>z2
    memb_c = polyval(p13, errorrate);
    memb_a = polyval(p5, error);
    memb_b = polyval(p6, error);
    if memb_a & memb_c
        memb1= min(memb_a, memb_c);
        x1    = [0 1];
        y1    = [cons1 cons2];
        pl    = polyfit(x1, y1, 1);
        xln   = [0: dT: 1];
        yy1   = polyval(pl, xln);
        cons2a= polyval(pl, memb1);
        xla   = [0 1];
        yla   = [cons3 cons2];
        pla   = polyfit(xla, yla, 1);
        xlan  = [0: dT: 1];
        yy1a  = polyval(pla, xlan);
        cons2b= polyval(pla, memb1);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb2= min(memb_b, memb_c);
        x1    = [0 1];
        y1    = [inc1 inc2];
        pl    = polyfit(x1, y1, 1);
        yln   = [0: dT: 1];
        yy1   = polyval(pl, yln);
        inc2a = polyval(pl, memb2);
    end
end

    end
    if memb1>memb2
        output = (cons2a+cons2b)/2;
    else
        output = (inc2a+1)/2;
    end
elseif error>=pos1 & error<=zero3
    & errorrate<=z3 & errorrate>=p1
    memb_a = polyval(p5, error);
    memb_b = polyval(p6, error);
    memb_c = polyval(p13, errorrate);
    memb_d = polyval(p14, errorrate);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        x1    = [0 1];
        y1    = [cons1 cons2];
        pl    = polyfit(x1, y1, 1);
        xln   = [0: dT: 1];
        yy1   = polyval(pl, xln);
        cons2a = polyval(pl, memb1);
        xla   = [0 1];
        yla   = [cons3 cons2];
        pla   = polyfit(xla, yla, 1);
        xlan  = [0: dT: 1];
        yy1a  = polyval(pla, xlan);
        cons2b = polyval(pla, memb1);
    end
    if memb_a & memb_d
        memb2 = min(memb_a, memb_d);
        x1    = [0 1];

```

```

    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyn = polyval(pl, yln);
    inc2a= polyval(pl, memb2);
end
if memb_b & memb_c
    memb3= min(memb_b, memb_c);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyn = polyval(pl, yln);
    inc2b = polyval(pl, memb3);
end
if memb_b & memb_d
    memb4= min(memb_b, memb_d);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyn = polyval(pl, yln);
    inc2c = polyval(pl, memb4);
end
if memb4>memb3 & memb4>memb2
    & memb4>memb1
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyn = polyval(pl, yln);
    inc2a = polyval(pl, memb2);
    output = (inc2a+1)/2;
else
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    yyn = polyval(pl, yln);
    inc2c = polyval(pl, memb4);
    output = (inc2c+1)/2;
elseif memb1>memb4 & memb1>memb3
    & memb1>memb2
    xl = [0 1];
    yl = [cons1 cons2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    xln = [0: dT: 1];
    yyn = polyval(pl, xln);
    cons2a = polyval(pl, memb1);
    xla = [0 1];
    yla = [cons3 cons2];
    pla = polyfit(xla, yla, 1);
    xlan = [0: dT: 1];
    yyn = polyval(pla, xlan);
    cons2b = polyval(pla, memb1);
    output = (cons2a+cons2b)/2;
elseif memb2>memb1 & memb2>memb4
    & memb2>memb3
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyn = polyval(pl, yln);
    inc2a = polyval(pl, memb2);
    output = (inc2a+1)/2;
else
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    yyn = polyval(pl, yln);
    inc2c = polyval(pl, memb4);
    output = (inc2c+1)/2;
end

```



```

    pl    = polyfit(xl, yl, 1);
    yln   = [0: dT: 1];
    yyn   = polyval(pl, yln);
    inc2b = polyval(pl, memb3);
    output = (inc2b+1)/2;
end
elseif error>=pos1 & error<=zero3
    & errorrate<p2& errorrate>z3
    memb_c = polyval(p14, errorrate);
    memb_a = polyval(p5, error);
    memb_b = polyval(p6, error);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        xl    = [0 1];
        yl    = [inc1 inc2];
        pl    = polyfit(xl, yl, 1);
        yln   = [0: dT: 1];
        yyn   = polyval(pl, yln);
        inc2a = polyval(pl, memb1);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb2 = min(memb_b, memb_c);
        xl    = [0 1];
        yl    = [inc1 inc2];
        pl    = polyfit(xl, yl, 1);
        yln   = [0: dT: 1];
        yyn   = polyval(pl, yln);
        inc2b = polyval(pl, memb2);
    end
    if memb1>memb2
        output = (inc2a+1)/2;
    else
        output = (inc2b+1)/2;
    end
elseif error>=pos1 & error<=zero3
    & errorrate>=p2
    memb_c = 1;
    memb_a = polyval(p5, error);
    memb_b = polyval(p6, error);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        xl    = [0 1];
        yl    = [inc1 inc2];
        pl    = polyfit(xl, yl, 1);
        yln   = [0: dT: 1];
        yyn   = polyval(pl, yln);
        inc2a = polyval(pl, memb1);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb2 = min(memb_b, memb_c);
        xl    = [0 1];
        yl    = [inc1 inc2];
        pl    = polyfit(xl, yl, 1);
        yln   = [0: dT: 1];
        yyn   = polyval(pl, yln);
        inc2b = polyval(pl, memb2);
    end
    if memb1>memb2
        output = (inc2a+1)/2;
    else
        output = (inc2b+1)/2;
    end
end

```

```

        output    = (inc2b+1)/2;
    end
    %%% เงื่อนไขที่ 7 (error>zero3 และ
    error<pos2)
    elseif error>zero3 & error<pos2
        & errorrate<=n3
        memb1    = polyval(p6, error);
        memb2    = 1;
        memb     = min(memb1, memb2);
        xl       = [0 1];
        yl       = [inc1 inc2];
        pl       = polyfit(xl, yl, 1);
        yln      = [0: dT: 1];
        yyl      = polyval(pl, yln);
        inc2     = polyval(pl, memb);
        output    = (inc2+1)/2;
    elseif error>zero3 & error<pos2
        & errorrate<z1 & errorrate>n3
        memb1    = polyval(p6, error);
        memb2    = polyval(p11, errorrate);
        memb     = min(memb1, memb2);
        xl       = [0 1];
        yl       = [inc1 inc2];
        pl       = polyfit(xl, yl, 1);
        yln      = [0: dT: 1];
        yyl      = polyval(pl, yln);
        inc2     = polyval(pl, memb);
        output    = (inc2+1)/2;
    elseif error>zero3 & error<pos2
        & errorrate<=n4 & errorrate>=z1
        memb_c    = polyval(p6, error);
        memb_a    = polyval(p11, errorrate);
        memb_b    = polyval(p12, errorrate);
        if memb_a & memb_c
            memb1  = min(memb_a, memb_c);
            xl     = [0 1];
            yl     = [inc1 inc2];
            pl     = polyfit(xl, yl, 1);
            yln    = [0: dT: 1];
            yyl    = polyval(pl, yln);
            inc2   = polyval(pl, memb1);
        end
        if memb_b & memb_c
            memb2  = min(memb_b, memb_c);
            xl     = [0 1];
            yl     = [inc1 inc2];
            pl     = polyfit(xl, yl, 1);
            yln    = [0: dT: 1];
            yyl    = polyval(pl, yln);
            inc2a  = polyval(pl, memb2);
        end
        if memb1>memb2
            output = (inc2+1)/2;
        else
            output = (inc2a+1)/2;
        end
    elseif error>zero3 & error<pos2
        & errorrate<=z2 & errorrate>n4
        memb1    = polyval(p6, error);
        memb2    = polyval(p12, errorrate);

```

```

memb    = min(memb1, memb2);
xl      = [0 1];
yl      = [inc1 inc2];
pl      = polyfit(xl, yl, 1);
yln     = [0: dT: 1];
yyl     = polyval(pl, yln);
inc2    = polyval(pl, memb);
output  = (inc2+1)/2;
elseif error>zero3 & error<pos2
    & errorrate<p1 & errorrate>z2
    memb1 = polyval(p6, error);
    memb2 = polyval(p13, errorrate);
    memb  = min(memb1, memb2);
    xl    = [0 1];
    yl    = [inc1 inc2];
    pl    = polyfit(xl, yl, 1);
    yln   = [0: dT: 1];
    yyn   = polyval(pl, yln);
    inc2  = polyval(pl, memb);
    output = (inc2+1)/2;
elseif error>zero3 & error<pos2
    & errorrate<=z3 & errorrate>=p1
    memb_c = polyval(p6, error);
    memb_a = polyval(p13, errorrate);
    memb_b = polyval(p14, errorrate);
    if memb_a & memb_c
        memb1 = min(memb_a, memb_c);
        xl    = [0 1];
        yl    = [inc1 inc2];
        pl    = polyfit(xl, yl, 1);
        yln   = [0: dT: 1];
        yyn   = polyval(pl, yln);
        inc2  = polyval(pl, memb);
        output = (inc2+1)/2;
        yln   = [0: dT: 1];
        yyn   = polyval(pl, yln);
        inc2  = polyval(pl, memb1);
    end
    if memb_b & memb_c
        memb2 = min(memb_b, memb_c);
        xl    = [0 1];
        yl    = [inc1 inc2];
        pl    = polyfit(xl, yl, 1);
        yln   = [0: dT: 1];
        yyn   = polyval(pl, yln);
        inc2a = polyval(pl, memb2);
    end
    if memb1>memb2
        output = (inc2+1)/2;
    else
        output = (inc2a+1)/2;
    end
elseif error>zero3 & error<pos2
    & errorrate<p2 & errorrate>z3
    memb1 = polyval(p6, error);
    memb2 = polyval(p14, errorrate);
    memb  = min(memb1, memb2);
    xl    = [0 1];
    yl    = [inc1 inc2];
    pl    = polyfit(xl, yl, 1);
    yln   = [0: dT: 1];
    yyn   = polyval(pl, yln);
    inc2  = polyval(pl, memb);
    output = (inc2+1)/2;

```

```

elseif error>zero3 & error<pos2
    & errorrate>=p2
    memb1 = polyval(p6, error);
    memb2 = 1;
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, yln);
    inc2 = polyval(pl, memb);
    output = (inc2+1)/2;
%%% เงื่อนไขที่ 8 (error>=pos2)
elseif error>=pos2 & errorrate<=n3
    output = (inc2+1)/2;
elseif error>=pos2 & errorrate<z1
    & errorrate>n3
    memb1 = 1;
    memb2 = polyval(p11, errorrate);
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, yln);
    inc2 = polyval(pl, memb);
    output = (inc2+1)/2;
elseif error>=pos2 & errorrate<=n4
    & errorrate>=z1
    memb1 = 1;
    memb2 = polyval(p12, errorrate);
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, yln);
    inc2 = polyval(pl, memb);
    output = (inc2+1)/2;
    memb_a = polyval(p11,errorrate);
    memb_b = polyval(p12, errorrate);
    memb2 = min(memb1, memb_a);
    memb3 = min(memb1, memb_b);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, yln);
    inc2a = polyval(pl, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, yln);
    inc2b = polyval(pl, memb3);
    inc2 = max(inc2a, inc2b);
    output = (inc2+1)/2;
elseif error>=pos2 & errorrate<=z2
    & errorrate>n4
    memb1 = 1;
    memb2 = polyval(p12, errorrate);
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyl = polyval(pl, yln);
    inc2 = polyval(pl, memb);
    output = (inc2+1)/2;

```

```

elseif error>=pos2 & errorrate<p1
    & errorrate>z2
    memb1 = 1;
    memb2 = polyval(p13, errorrate);
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyn = polyval(pl, yln);
    inc2 = polyval(pl, memb);
    output = (inc2+1)/2;
elseif error>=pos2 & errorrate<=z3
    & errorrate>=p1
    memb1 = 1;
    memb_a = polyval(p13, errorrate);
    memb_b = polyval(p14, errorrate);
    memb2 = min(memb1, memb_a);
    memb3 = min(memb1, memb_b);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyn = polyval(pl, yln);
    inc2a = polyval(pl, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyn = polyval(pl, yln);
    inc2b = polyval(pl, memb3);
    inc2 = max(inc2a, inc2b);
    output = (inc2+1)/2;
elseif error>=pos2 & errorrate<p2
    & errorrate>z3
    memb1 = 1;
    memb2 = polyval(p14, errorrate);
    memb = min(memb1, memb2);
    xl = [0 1];
    yl = [inc1 inc2];
    pl = polyfit(xl, yl, 1);
    yln = [0: dT: 1];
    yyn = polyval(pl, yln);
    inc2 = polyval(pl, memb);
    output = (inc2+1)/2;
else
    output = (inc2+1)/2;
end
% จบโปรแกรม

```

ภาคผนวก ข

โปรแกรมการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมกระแสดเซย
ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว

```

*****
โปรแกรมการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว
*****

โปรแกรม ATS.m

N = 21; % N คือ จำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหา
xlimit = [-0.3 0 -0.18 0.1 0.38 0.28 1 -0.6 -0.1 -0.4 0.1 0.4 0.2 1 -0.5 0 -0.2 0.1 0.6 0.4 1;
          -1 -0.18 -0.3 0 0.28 0.1 0.38 -1 -0.4 -0.6 -0.1 0.2 0.1 0.4 -1 -0.2 -0.5 0 0.4 0.1 0.6];
% แถวที่ 1 ของ xlimit คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
% แถวที่ 2 ของ xlimit คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์

for r = 1:5
S(r,:) = ((xlimit(1, :)-xlimit(2, :)).*rand(1, N))+xlimit(2, :);
end % สุ่มค่าตอบเริ่มต้นภายในขอบเขตของการค้นหา
% พารามิเตอร์แต่ละตัวจำนวน 5 ชุด

for k = 1: size(S,1)
W = design(S(k,1),S(k,2),S(k,3),S(k,4),S(k,5),S(k,6),S(k,7),S(k,8),S(k,9),S(k,10),
S(k,11),S(k,12),S(k,13),S(k,14),S(k,15),S(k,16),S(k,17),S(k,18),S(k,19),S(k,20),S(k,21));
costvalue(k, 1) = W;
end % ประเมินค่าตอบเริ่มต้นด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
[best_error, index] = min(costvalue); % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดใน costvalue
% และเก็บไว้ใน best_error
S0 = S(index, :); % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
% น้อยที่สุดไว้ใน S0

max_count = 30; % กำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหา
best_neighbor = S0; % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
% มีค่าน้อยที่สุด

neighbor_list = zeros(23, N); % รีเซตค่าใน neighbor_list
radius = 0.5; % กำหนดรัศมีการค้นหาเริ่มต้น
Number_neighb = 20; % กำหนดการสุ่มค่าใกล้เคียง
overall_best_error = best_error; % ปรับค่า overall_best_error = best_error
overall_neighbor = best_neighbor; % ปรับค่า overall_neighbor = best_neighbor

```

```

n = 0; % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการซ้ำของคำตอบ
t = 0; % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt = 0; % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
ttt = 0; % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
count = 0; % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนรอบการค้นหาคำตอบ
n_backtracking = 0; % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการเรียกใช้กลไกการ
% เดินย้อนรอย

tic; % เริ่มต้นคำนวณเวลาในการค้นหา
% เริ่มโปรแกรม ATS

t = t+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt = tt+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
ttt = ttt+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
local(t,1) = count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2:22) = best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22
% ของ local
local(t,23) = best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ local
tabu_list(tt,1) = count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ tabu_list
tabu_list(tt,2:22) = best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22
% ของ tabu_list
tabu_list(tt,23) = best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ tabu_list
best_error_list(ttt,1) = count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ best_error_list
best_error_list(ttt,2:22) = best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22
% ของ best_error_list
best_error_list(ttt,23) = best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ
% best_error_list

for count = 1: max_count
    S1 = random_neigh(Number_neighb, radius, xlimit, S0);
    % เรียกใช้โปรแกรม random_neigh เพื่อสุ่มค่าใกล้เคียง
    % รอบคำตอบ S0 ภายในปริภูมิการค้นหาปัจจุบัน
    % อินพุตของโปรแกรมนี้คือ Number_neighb, radius,

```



```

xlimit และ S0
% เอาต์พุต คือ ค่าใกล้เคียง (S1) เท่ากับจำนวน
Number_neighb
[best_error1, best_neighbor1, best_error, best_neighbor] = objective1(S1, best_error, S0);
% เรียกใช้โปรแกรม objective1 เพื่อประเมินค่า
ใกล้เคียงที่สุ่มได้
% อินพุตของโปรแกรมนี้คือ S1, best_error และ S0
% เอาต์พุตคือ best_error1, best_neighbor1, best_error
และ best_neighbor
neighbor_list(k,1:size(S0,2)) = [best_neighbor1];
% เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มี
ค่าน้อยที่สุดภายในปริภูมิการค้นหาล่าสุดไว้ใน
คอลัมน์ที่ 1 และ 2 ของ neighbor_list
neighbor_list(k,size(S0,2)+1) = best_error1;
% เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุด
% ภายในปริภูมิการค้นหาล่าสุดไว้ในคอลัมน์ที่ 3
ของ neighbor_list
if (count>1)
    if (tabu_list(count,23)>best_error)
        n = n+1;
    else
        n = 0;
    end
end
% ตรวจสอบการซ้ำของคำตอบโดยการเปรียบเทียบ
ระหว่าง best_error1 และ best_error ถ้ามีการซ้ำของ
คำตอบ ให้ปรับเพิ่มค่า n
tt = tt+1;
% ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
tabu_list(tt,1) = count;
% เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ tabu_list
tabu_list(tt,2:22) = best_neighbor1; % เก็บค่า best_neighbor1 ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22
ของ tabu_list

```

```

tabu_list(tt,23) = best_error1;      % เก็บค่า best_error1 ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ tabu_list
ttt = ttt+1;                        % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
best_error_list(ttt,1) = count;     % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ best_error_list
best_error_list(ttt,2:22) = best_neighbor;
                                     % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22
                                     ของ best_error_list
best_error_list(ttt,23) = best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ
                                     best_error_list
disp([count tabu_list(count,23) best_error n n_backtracking ])
                                     % แสดงค่า count, tabu_list(count,23), best_error, n
                                     และ n_backtracking
% เริ่มกลไกการปรับลดรัศมี
if best_error<=0.5 && radius>1e-3
radius = radius/1.3;
end                                 % เงื่อนไขที่ 1) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.5
                                   ให้ทำการปรับลดรัศมี
if best_error<=0.05 && radius>1e-3
radius = radius/1.3;
end                                 % เงื่อนไขที่ 2) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.05
                                   ให้ทำการปรับลดรัศมี
if best_error<=0.01&& radius>1e-3
radius = radius/1.3;
end                                 % เงื่อนไขที่ 3) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.01
                                   ให้ทำการปรับลดรัศมี
if best_error<=0.008&& radius>1e-3
radius = radius/1.3;
end                                 % เงื่อนไขที่ 4) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.008
                                   ให้ทำการปรับลดรัศมี
if (best_error<0.014)              % ตรวจสอบเกณฑ์ยุติการค้นหา
เมื่อ best_error < 0.014

```

```

t = t+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt = tt+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list

disp([count best_error overall_best_error])

% แสดงค่า count, best_error และ overall_best_error

local(t,1) = count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2) = tabu_list(count,2); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 2 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 2 ของ local
local(t,3) = tabu_list(count,3); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 3 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 3 ของ local
local(t,4) = tabu_list(count,4); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 4 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 4 ของ local
local(t,5) = tabu_list(count,5); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 5 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 5 ของ local
local(t,6) = tabu_list(count,6); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 6 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 6 ของ local
local(t,7) = tabu_list(count,7); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 7 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 7 ของ local
local(t,8) = tabu_list(count,8); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 8 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 8 ของ local
local(t,9) = tabu_list(count,9); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 9 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 9 ของ local
local(t,10) = tabu_list(count,10); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 10 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 10 ของ local
local(t,11) = tabu_list(count,11); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 11 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 11 ของ local
local(t,12) = tabu_list(count,12); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 12 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 12 ของ local
local(t,13) = tabu_list(count,13); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 13 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 13 ของ local
local(t,14) = tabu_list(count,14); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 14 ของcount ไว้ใน

```

```

                                คอลัมน์ที่ 14 ของ local
local(t,15) = tabu_list(count,15); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 15 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 15 ของ local
local(t,16) = tabu_list(count,16); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 16 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 16 ของ local
local(t,17) = tabu_list(count,17); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 17 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 17 ของ local
local(t,18) = tabu_list(count,18); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 18 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 18 ของ local
local(t,19) = tabu_list(count,19); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 19 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 19 ของ local
local(t,20) = tabu_list(count,20); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 20 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 20 ของ local
local(t,21) = tabu_list(count,21); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 21 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 21 ของ local
local(t,22) = tabu_list(count,22); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 22 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 22 ของ local
local(t,23) = tabu_list(count,23); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 23 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 23 ของ local

break;                        % ยุติการค้นหา
end
% เริ่มกลไกการเดินย้อนรอย
if n>=100                     % ถ้าจำนวนการซ้ำของคำตอบเท่ากับ 100
    n_backtracking = n_backtracking+1;% เพิ่มค่า n_backtracking
    TEMP = tabu_list(count-3:count+1,:);
                                % จัดลำดับ rank ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ
                                ค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนมีการเรียกใช้กลไกย้อน
                                รอยการค้นหา
                                % TEMP จะเก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ
                                ค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนทำการจัดลำดับ

```

[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,23));	% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(5,:) = TEMP(INDEX,:);	% จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 5 ใน RANK
TEMP(INDEX,23) = 0;	% แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP ด้วยศูนย์
	% ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียง 4 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,23));	% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(4,:) = TEMP(INDEX,:);	% จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 4 ใน RANK
TEMP(INDEX,23) = 0;	% แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP ด้วยศูนย์
	% ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียง 3 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,23));	% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(3,:) = TEMP(INDEX,:);	% จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 3 ใน RANK
TEMP(INDEX,23) = 0;	% แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP ด้วยศูนย์
	% ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียง 2 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,23));	% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด

```

RANK(2,:) = TEMP(INDEX,:); % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                             พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 2 ใน RANK

TEMP(INDEX,23) = 0; % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                    ด้วยศูนย์
                    % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                    เพียง 1 ค่า

[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,23)); % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด

RANK(1,:) = TEMP(INDEX,:); % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                             พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 1 ใน RANK

TEMP(INDEX,23) = 0; % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                    ด้วยศูนย์
                    % ขณะนี้ใน TEMP จะไม่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้
                    ทำการจัดลำดับอีกต่อไป

neighbor = RANK(5,2:22); % แทนค่า neighbor ด้วยค่าพารามิเตอร์ลำดับที่ 5 ใน
                           RANK ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชัน
                           วัตถุประสงค์แตกต่างจากค่าตอบที่ซ้ำมากที่สุดเมื่อเทียบ
                           กับอีก 4 ลำดับที่เหลือใน RANK

S0 = neighbor; % ปรับค่า S0 = neighbor

if best_error < overall_best_error
    overall_best_error = best_error;
    overall_best_neighbor = best_neighbor;

    % ถ้า best_error < overall_best_error ให้ปรับค่า
    overall_best_error โดยแทนค่า overall_best_error ด้วย
    best_error และแทนค่าพารามิเตอร์
    overall_best_neighbor ด้วย best_neighbor

t = t+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local

local(t,1) = count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local

```

```

        local(t,2:22) = best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22
                                       % ของ local
        local(t,23) = best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ local
    end
    best_error = RANK(5,23); % แทนค่า best_error ด้วยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                           % ลำดับที่ 5 ใน RANK
    n = 0; % ปรับค่า n = 0
    else % ไม่เช่นนั้นแล้ว
        S0 = best_neighbor; % แทนค่า S0 ด้วย best_neighbor
        best_error = best_error; % แทนค่า best_error ด้วย best_error
    end
end
if overall_best_error < best_error
    best_error = overall_best_error;
    best_neighbor = overall_best_neighbor;
    % ถ้า overall_best_error < best_error
    % ให้ปรับค่า best_error
    % โดยแทนค่า best_error ด้วย overall_best_error
    % และแทนค่าพารามิเตอร์ best_neighbor
    % ด้วย overall_best_neighbor
end
time = toc; % ยุติการคำนวณเวลาการค้นหา
count % แสดงจำนวนรอบการค้นหา
best_error % แสดงค่า best_error
neg3 = best_neighbor(1) % แสดงค่า neg3
neg4 = best_neighbor(2) % แสดงค่า neg4
zero1 = best_neighbor(3) % แสดงค่า zero1
zero2 = best_neighbor(4) % แสดงค่า zero2
zero3 = best_neighbor(5) % แสดงค่า zero3
pos1 = best_neighbor(6) % แสดงค่า pos1

```

```

pos2 = best_neighbor(7)           % แสดงค่า pos2
n3 = best_neighbor(8)           % แสดงค่า n3
n4 = best_neighbor(9)           % แสดงค่า n4
z1 = best_neighbor(10)          % แสดงค่า z1
z2 = best_neighbor(11)          % แสดงค่า z2
z3 = best_neighbor(12)          % แสดงค่า z3
p1 = best_neighbor(13)          % แสดงค่า p1
p2 = best_neighbor(14)          % แสดงค่า p2
dec3 = best_neighbor(15)         % แสดงค่า dec3
dec4 = best_neighbor(16)         % แสดงค่า dec4
cons1 = best_neighbor(17)        % แสดงค่า cons1
cons2 = best_neighbor(18)        % แสดงค่า cons2
cons3 = best_neighbor(19)        % แสดงค่า cons3
inc1 = best_neighbor(20)         % แสดงค่า inc1
inc2 = best_neighbor(21)         % แสดงค่า inc2
plot([0:1:count], best_error_list(:,23)) % พล็อตกราฟระหว่าง count กับ best_error_list
xlabel('number of cycle')        % แสดงชื่อแกน x เป็น number of cycle
ylabel('W')                     % แสดงชื่อแกน y เป็น W

```


โปรแกรม *random_neigh.m*

```
function S1 = random_neigh(Number_neighb, radius, xlimit, S0)

    % โปรแกรม random_neigh เป็นโปรแกรมสุ่มค่า
    % ใกล้เคียงรอบคำตอบ S0
    % อินพุตของโปรแกรม คือ Number_neighb, radius,
    % xlimit และ S0
    % เอาต์พุต คือ ค่าใกล้เคียง S1 จำนวนเท่ากับ
    % Number_neighb

    for u = 1: Number_neighb
        for k = 1: size(xlimit,2)
            S1(u,k) = S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));

            % ทำการสุ่มค่าใกล้เคียงโดยเรียกใช้โปรแกรม rand1
            % โดยให้ทำการสุ่มค่าในช่วง -1 ถึง 1

            while ( S1(u,k)>xlimit(1,k) | S1(u,k)<xlimit(2,k) )
                % ค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้จะต้องอยู่ภายในขอบเขตบนและ
                % ขอบเขตล่างของค่าพารามิเตอร์ ถ้าค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้
                % มีค่าเกินขอบเขตบนและขอบเขตล่างที่กำหนดให้ทำการ
                % สุ่มค่าใกล้เคียงใหม่

                S1(u,k) = S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));
            end
        end
    end

    return

    % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

โปรแกรม *rand1.m*

function x = rand1(a,b)

% โปรแกรม rand1 เป็นโปรแกรมสุ่มค่าพารามิเตอร์
ในช่วงที่กำหนด

% อินพุตของโปรแกรม คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
a และขอบเขตล่างของพารามิเตอร์ b

% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ ผลของการสุ่ม
ค่าพารามิเตอร์ในช่วง a ถึง b

x = a+rand*(b-a);

% สุ่มค่าพารามิเตอร์โดยอาศัยความสัมพันธ์ a rand b

return

% กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน

โปรแกรม objective1.m

```
function [best_error1, best_neighbor1, best_error, best_neighbor]=objective1(S1, best_error, S0)

    % โปรแกรม objective1 เป็นโปรแกรมประเมินค่า
    % ใกล้เคียงที่หุ้มได้รอบ S0
    % อินพุตของโปรแกรม คือ S1, best_error และ S0
    % เอาต์พุตคือ best_error1, best_neighbor1, best_error,
    % และ best_neighbor

error = [];
    % ตัวแปร error สำหรับรองรับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
    % ของค่าใกล้เคียงที่ได้จากการหุ้ม

for k = 1: size(S1,1)

    W = design(S1(k,1),S1(k,2),S1(k,3),S1(k,4),S1(k,5),S1(k,6),S1(k,7),S1(k,8),S1(k,9),
        S1(k,10),S1(k,11),S1(k,12),S1(k,13),S1(k,14),S1(k,15),S1(k,16),S1(k,17),S1(k,18),S1(k,19),
        S1(k,20),S1(k,21));

    % ประเมินค่าใกล้เคียงใน S1 ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
    % ในโปรแกรม design

    error(k,1) = W;
    % เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าใกล้เคียงทั้งหมด

end

[best_error1, index] = min(error);
    % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดในบรรดาค่า
    % ใกล้เคียง และเก็บไว้ใน best_error1

best_neighbor1 = S1(index,:);
    % เก็บค่าพารามิเตอร์ของค่าใกล้เคียงที่ทำให้ค่าฟังก์ชัน
    % วัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุดไว้ใน best_neighbor1

if best_error1 < best_error
    best_error=best_error1;

    % ปรับค่า best_error ถ้า best_error1 < best_error
    % โดยแทนค่า best_error ด้วย best_error1

    best_neighbor=S1(index,:);
    % แทนค่าพารามิเตอร์ best_neighbor ด้วย S1(index,:)
else
    % ไม่เช่นนั้นแล้ว

    best_neighbor = S0;
    % แทนค่า best_neighbor ด้วย S0

end

return
    % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

โปรแกรม design.m

```
function W = design(var1, var2, var3, var4, var5, var6, var7, var8, var9, var10, var11, var12,
    var13, var14, var15, var16, var17, var18, var19, var20, var21);

    % โปรแกรมรับอินพุต 21 ค่า คือ ฟังก์ชันแสดงสมาชิก
    % ของตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิก
    % เอาต์พุตของโปรแกรม คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของ
    % กระแสชดเชย

    % กำหนดตัวแปรเริ่มต้นของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ
    neg3a = var1;
    neg4a = var2;
    zero1a = var3;
    zero2a = var4;
    zero3a = var5;
    pos1a = var6;
    pos2a = var7;
    n3a = var8;
    n4a = var9;
    z1a = var10;
    z2a = var11;
    z3a = var12;
    p1a = var13;
    p2a = var14;
    dec3a = var15;
    dec4a = var16;
    cons1a = var17;
    cons2a = var18;
    cons3a = var19;
    incla = var20;
    inc2a = var21;
```

```

% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม
load ic_data.mat;           % ดึงค่าตัวแปรทุก ๆ ตัวจาก ic_data.mat
load vpcc_data.mat;         % ดึงค่าตัวแปรทุก ๆ ตัวจาก vpcc_data.mat
Vdc = 750;                  % กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าตรงของวงจรรอกำลัง
                             % แยกทีฟ เท่ากับ 750 V
Lf = 0.0039;                % กำหนดค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอกำลังแยกทีฟ
                             % เท่ากับ 0.0039 H
dT = 1e-5;                  % ช่วงเวลาชักตัวอย่าง (วินาที)
% กำหนดค่าเริ่มต้นในการจำลองสถานการณ์
ica_ref = ic_data(8000:12000); % กำหนดให้ ica_ref เท่ากับ ข้อมูลของ ic_data
                             % จุดที่ 8000 ถึง 12000
vpcc = vpcc_data(8000:12000); % กำหนดให้ vpcc เท่ากับ ข้อมูลของ vpcc_data
                             % จุดที่ 8000 ถึง 12000
ica = [];                   % กำหนดตัวแปร ica สำหรับรองรับค่ากระแสชดเชย
ica(1) = 0;                 % กำหนดค่าเริ่มต้นของ ica เท่ากับ 0
output = [];                % กำหนดตัวแปร output สำหรับรองรับค่าเอาต์พุตของ
                             % ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก
v_out = [];                 % กำหนดตัวแปร v_out สำหรับรองรับค่าแรงดันของ
                             % วงจรรอกำลังแยกทีฟ
error_a = [];               % กำหนดตัวแปร error_a สำหรับรองรับค่าความ
                             % ผิดพลาดเฟส a
errorrate_a = [];           % กำหนดตัวแปร errorrate_a สำหรับรองรับค่าอัตรา
                             % การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดเฟส a
error_a(1) = 0;             % กำหนดค่าเริ่มต้นของ error_a เท่ากับ 0
error = [];                 % กำหนดตัวแปร error สำหรับรองรับค่าความผิดพลาด
                             % ของกระแสชดเชย
error1 = [];                % กำหนดตัวแปร error1 สำหรับรองรับการคำนวณค่า
                             % กำลังสองของ error
% การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก
for k = 1:1:4000

```

```

if k == 1                                % เงื่อนไขที่ 1 ถ้า k = 1
    v_out(1) = +Vdc;                      % กำหนดให้ค่า v_out เริ่มต้น เท่ากับ +Vdc
end
if k > 1                                  % เงื่อนไขที่ 2 ถ้า k > 1
    error_a(k) = (ica_ref(k)-ica(k))*10;
                                           % คำนวณค่า error_a ที่เกิดจากความผิดพลาดในการคิด
                                           กระแสขดเซย
    errorrate_a(k) = (error_a(k)-error_a(k-1))/10000;
                                           % คำนวณค่า errorrate_a จากค่า error_a
    output(k) = fuzzy(error_a(k), errorrate_a(k), neg3a, neg4a, zero1a, zero2a, zero3a, pos1a,
        pos2a, n3a, n4a, z1a, z2a, z3a, p1a, p2a, dec3a, dec4a, cons1a, cons2a,
        cons3a, inc1a, inc2a);
                                           % เรียกใช้โปรแกรม fuzzy เพื่อหาค่า output
    if output(k) >= 0.5                    % ถ้า output >= 0.5
        v_out(k) = +Vdc;                  % กำหนดให้ v_out เท่ากับ +Vdc
    elseif output(k) < 0.5                 % ถ้า output < 0.5
        v_out(k) = -Vdc;                  % กำหนดให้ v_out เท่ากับ -Vdc
    else                                  % ไม่เช่นนั้นแล้ว
        v_out(k) = v_out(k-1);            % กำหนดให้ v_out เท่ากับ v_out(k-1);
    end
end
ica(k+1) = ((v_out(k)-vpcc(k))/Lf)*dT + ica(k);
                                           % สมการการคำนวณค่ากระแสขดเซยจริง ica
end
error = ica_ref - ica';                  % คำนวณค่า error ของค่ากระแสอ้างอิง (ica_ref) กับ
                                           ค่ากระแสขดเซยจริง (ica)
for j = 1:1:4000
    error1(j) = error(j)^2;               % กำหนดให้ค่า error1 เท่ากับ ค่า error แต่ละตำแหน่ง
                                           กำลังสอง
    j = j+1;                              % ปรับเพิ่มค่า j
end

```

```
end
W = sum(error1)/4000;           % หาค่าเฉลี่ยของค่า error1
return                          % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

ภาคผนวก ค

โปรแกรมการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรง
ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว


```

*****
โปรแกรมการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอดเชิง
ปรับตัว
*****

โปรแกรม ATS.m

N = 14; % N คือ จำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหา
xlimit = [-0.09 -0.0001 -0.007 0.005 0.09 0.03 0.35 -0.65 0.03 -0.1 0.16 0.7 0.29 1.28; -0.26
          -0.007 -0.09 -0.0001 0.03 0.005 0.09 -1.0 -0.1 -0.65 0.03 0.29 0.16 0.7];
% แถวที่ 1 ของ xlimit คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
% แถวที่ 2 ของ xlimit คือ ขอบเขตล่างของพารามิเตอร์

for r = 1:5
S(r,:) = ((xlimit(1, :)-xlimit(2, :)).*rand(1, N))+xlimit(2, :);
end % สุ่มค่าตอบเริ่มต้นภายในขอบเขตของการค้นหาของ
พารามิเตอร์แต่ละตัวจำนวน 5 ชุด

for k = 1: size(S,1)
    W = design(S(k,1),S(k,2),S(k,3),S(k,4),S(k,5),S(k,6),S(k,7),S(k,8),S(k,9),S(k,10),S(k,11),
    S(k,12),S(k,13),S(k,14));
    costvalue(k, 1) = W;
end % ประเมินค่าตอบเริ่มต้นด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
[best_error, index] = min(costvalue); % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดใน costvalue
และเก็บไว้ใน best_error
S0 = S(index, :); % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อย
ที่สุดไว้ใน S0
max_count = 30; % กำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหา
best_neighbor = S0; % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่า
น้อยที่สุด
neighbor_list = zeros(16, N); % รีเซตค่าใน neighbor_list
radius = 0.5; % กำหนดรัศมีการค้นหาเริ่มต้น
Number_neighb = 20; % กำหนดการสุ่มค่าใกล้เคียง
overall_best_error = best_error; % ปรับค่า overall_best_error = best_error

```

```

overall_neighbor = best_neighbor;    % ปรับค่า overall_neighbor = best_neighbor
n = 0;                               % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการซ้ำของคำตอบ
t = 0;                               % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt = 0;                             % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
ttt = 0;                            % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
count = 0;                          % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนรอบการค้นหา
n_backtracking = 0;                 % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการเรียกใช้กลไกการเดิน
                                   % ย้อนรอย
tic;                                % เริ่มต้นคำนวณเวลาในการค้นหา
% เริ่ม โปรแกรม ATS
t = t+1;                            % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt = tt+1;                          % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
ttt = ttt+1;                        % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
local(t,1) = count;                 % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2:15) = best_neighbor;      % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 15
                                   % ของ local
local(t,16) = best_error;           % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 16 ของ local
tabu_list(tt,1) = count;            % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ tabu_list
tabu_list(tt,2:15) = best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 15
                                   % ของ tabu_list
tabu_list(tt,16) = best_error;       % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 16 ของ tabu_list
best_error_list(ttt,1) = count;      % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ best_error_list
best_error_list(ttt,2:15) = best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 15
                                   % ของ best_error_list
best_error_list(ttt,16) = best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 16 ของ
                                   % best_error_list

for count = 1: max_count
    S1 = random_neigh(Number_neighb, radius, xlimit, S0);
                                   % เรียกใช้โปรแกรม random_neigh เพื่อสุ่มค่าใกล้เคียง
                                   % รอบคำตอบ S0 ภายในปริภูมิการค้นหาปัจจุบัน

```

```

% อินพุตของโปรแกรมนี้คือ Number_neighb, radius,
% xlimit และ S0
% เอาต์พุต คือ ค่าใกล้เคียง (S1) เท่ากับจำนวน
% Number_neighb

[best_error1, best_neighbor1, best_error, best_neighbor] = objective1(S1, best_error, S0);
% เรียกใช้โปรแกรม objective1 เพื่อประเมินค่าใกล้เคียง
% ที่สุ่มได้
% อินพุตของโปรแกรมนี้คือ S1, best_error และ S0
% เอาต์พุตคือ best_error1, best_neighbor1, best_error
% และ best_neighbor

neighbor_list(k,1:size(S0,2)) = [best_neighbor1];
% เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่า
% น้อยที่สุดภายในปริภูมิการค้นหาล่าสุดไว้ใน
% คอลัมน์ที่ 1 และ 2 ของ neighbor_list

neighbor_list(k,size(S0,2)+1) = best_error1;
% เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุด
% ภายในปริภูมิการค้นหาล่าสุดไว้ในคอลัมน์ที่ 3 ของ
% neighbor_list

if (count>1)
    if (tabu_list(count,16)>best_error)
        n = n+1;
    else
        n = 0;
    end
end

% ตรวจสอบการซ้ำของคำตอบโดยการเปรียบเทียบ
% ระหว่าง best_error1 และ best_error ถ้ามีการซ้ำของ
% คำตอบ ให้ปรับเพิ่มค่า n

tt = tt+1;
% ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list

tabu_list(tt,1) = count;
% เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ tabu_list

tabu_list(tt,2:15) = best_neighbor1; % เก็บค่า best_neighbor1 ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 15

```

```

                                ของ tabu_list
tabu_list(tt,16) = best_error1;    % เก็บค่า best_error1 ไว้ในคอลัมน์ที่ 16 ของ tabu_list
ttt = ttt+1;                      % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
best_error_list(ttt,1) = count;    % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ best_error_list
best_error_list(ttt,2:15) = best_neighbor;
                                % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 15

                                ของ best_error_list
best_error_list(ttt,16) = best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 16 ของ
                                best_error_list

disp([count tabu_list(count,16) best_error n n_backtracking ])
                                % แสดงค่า count, tabu_list(count,23), best_error, n
                                และ n_backtracking

% เริ่มกลไกการปรับลดรัศมี
if best_error<=40 && radius>1e-3
radius = radius/1.3;
end                                % เงื่อนไขที่ 1) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 40
                                ให้ทำการปรับลดรัศมี

if best_error<=20 && radius>1e-3
radius = radius/1.3;
end                                % เงื่อนไขที่ 2) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 20
                                ให้ทำการปรับลดรัศมี

if best_error<=10 && radius>1e-3
radius = radius/1.3;
end                                % เงื่อนไขที่ 3) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 10
                                ให้ทำการปรับลดรัศมี

if best_error<=5 && radius>1e-3
radius = radius/1.3;
end                                % เงื่อนไขที่ 4) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 5
                                ให้ทำการปรับลดรัศมี

if (best_error<0.01)              % ตรวจสอบเกณฑ์ยุติการค้นหา เมื่อ best_error < 0.01

```

```

t = t+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt = tt+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list

disp([count best_error overall_best_error])

% แสดงค่า count, best_error และ overall_best_error

local(t,1) = count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2) = tabu_list(count,2); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 2 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 2 ของ local
local(t,3) = tabu_list(count,3); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 3 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 3 ของ local
local(t,4) = tabu_list(count,4); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 4 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 4 ของ local
local(t,5) = tabu_list(count,5); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 5 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 5 ของ local
local(t,6) = tabu_list(count,6); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 6 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 6 ของ local
local(t,7) = tabu_list(count,7); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 7 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 7 ของ local
local(t,8) = tabu_list(count,8); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 8 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 8 ของ local
local(t,9) = tabu_list(count,9); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 9 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 9 ของ local
local(t,10) = tabu_list(count,10); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 10 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 10 ของ local
local(t,11) = tabu_list(count,11); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 11 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 11 ของ local
local(t,12) = tabu_list(count,12); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 12 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 12 ของ local
local(t,13) = tabu_list(count,13); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 13 ของcount ไว้ใน
                                % คอลัมน์ที่ 13 ของ local
local(t,14) = tabu_list(count,14); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 14 ของcount ไว้ใน

```

```

local(t,15) = tabu_list(count,15); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 15 ของcount ไว้ใน
                                   % คอลัมน์ที่ 15 ของ local
local(t,16) = tabu_list(count,16); % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 16 ของcount ไว้ใน
                                   % คอลัมน์ที่ 16 ของ local
break; % ยุติการค้นหา
end
% เริ่มกลไกการเดินย้อนรอย
if n>=100 % ถ้าจำนวนการซ้ำของคำตอบเท่ากับ 100
n_backtracking = n_backtracking+1;% เพิ่มค่า n_backtracking
TEMP = tabu_list(count-3:count+1,:);
% จัดลำดับ rank ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ
% ค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนมีการเรียกใช้กลไกย้อน
% รอยการค้นหา
% TEMP จะเก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ
% ค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนทำการจัดลำดับ
[ MAX,INDEX] = max(TEMP(:,16));
% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
% ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(5,:) = TEMP(INDEX,:); % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และ
% ค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 5 ใน RANK
TEMP(INDEX,16) = 0; % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
% ด้วยศูนย์
% ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
% เพียง 4 ค่า
[ MAX,INDEX] = max(TEMP(:,16));
% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
% ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(4,:) = TEMP(INDEX,:); % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
% พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 4 ใน RANK

```

```

TEMP(INDEX,16) = 0;          % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                             % ด้วยศูนย์
                             % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                             % เพียง 3 ค่า

[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,16));

                             % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                             % ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด

RANK(3,:) = TEMP(INDEX,:);   % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                             % พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 3 ใน RANK

TEMP(INDEX,16) = 0;          % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                             % ด้วยศูนย์
                             % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                             % เพียง 2 ค่า

[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,16));

                             % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                             % ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด

RANK(2,:) = TEMP(INDEX,:);   % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                             % พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 2 ใน RANK

TEMP(INDEX,16) = 0;          % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                             % ด้วยศูนย์
                             % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                             % เพียง 1 ค่า

[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,16));

                             % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                             % ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด

RANK(1,:) = TEMP(INDEX,:);   % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                             % พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 1 ใน RANK

TEMP(INDEX,16) = 0;          % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                             % ด้วยศูนย์
                             % ขณะนี้ใน TEMP จะไม่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้

```

	ทำการจัดลำดับอีกต่อไป
neighbor = RANK(5,2:15);	% แทนค่า neighbor ด้วยค่าพารามิเตอร์ลำดับที่ 5 ใน RANK ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แตกต่างจากคำตอบที่ซ้ำมากที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 4 ลำดับที่เหลือใน RANK
S0 = neighbor;	% ปรับค่า S0 = neighbor
if best_error < overall_best_error	
overall_best_error = best_error;	
overall_best_neighbor = best_neighbor;	
	% ถ้า best_error < overall_best_error ให้ปรับค่า overall_best_error โดยแทนค่า overall_best_error ด้วย best_error และแทนค่าพารามิเตอร์ overall_best_neighbor ด้วย best_neighbor
t = t+1;	% ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
local(t,1) = count;	% เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2:15) = best_neighbor;	% เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 15 ของ local
local	
local(t,16) = best_error;	% เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 16 ของ local
end	
best_error = RANK(5,16);	% แทนค่า best_error ด้วยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลำดับที่ 5 ใน RANK
n = 0;	% ปรับค่า n = 0
else	% ไม่เช่นนั้นแล้ว
S0 = best_neighbor;	% แทนค่า S0 ด้วย best_neighbor
best_error = best_error;	% แทนค่า best_error ด้วย best_error
end	
end	
if overall_best_error < best_error	
best_error = overall_best_error;	
best_neighbor = overall_best_neighbor;	


```

                                % ถ้า overall_best_error < best_error ให้ปรับค่า
                                best_error โดยแทนค่า best_error ด้วย overall_best_error
                                และแทนค่าพารามิเตอร์ best_neighbor
                                ด้วย overall_best_neighbor
end
time = toc;                                % ยุติการคำนวณเวลาการค้นหา
count                                % แสดงจำนวนรอบการค้นหา
best_error                                % แสดงค่า best_error
neg3 = best_neighbor(1)                % แสดงค่า neg3
neg4 = best_neighbor(2)                % แสดงค่า neg4
zero1 = best_neighbor(3)               % แสดงค่า zero1
zero2 = best_neighbor(4)               % แสดงค่า zero2
zero3 = best_neighbor(5)               % แสดงค่า zero3
pos1 = best_neighbor(6)                % แสดงค่า pos1
pos2 = best_neighbor(7)                % แสดงค่า pos2
dec3 = best_neighbor(8)                % แสดงค่า dec3
dec4 = best_neighbor(9)                % แสดงค่า dec4
cons1 = best_neighbor(10)              % แสดงค่า cons1
cons2 = best_neighbor(11)              % แสดงค่า cons2
cons3 = best_neighbor(12)              % แสดงค่า cons3
inc1 = best_neighbor(13)               % แสดงค่า inc1
inc2 = best_neighbor(14)               % แสดงค่า inc2
plot([0:1:count], best_error_list(:,16)) % พล็อตกราฟระหว่าง count กับ best_error_list
xlabel('number of cycle')              % แสดงชื่อแกน x เป็น number of cycle
ylabel('W')                            % แสดงชื่อแกน y เป็น W

```

โปรแกรม *random_neigh.m*

```
function S1 = random_neigh(Number_neighb, radius, xlimit, S0)

    % โปรแกรม random_neigh เป็นโปรแกรมสุ่มค่า
    % ใกล้เคียงรอบคำตอบ S0
    % อินพุตของโปรแกรม คือ Number_neighb, radius,
    % xlimit และ S0
    % เอาต์พุต คือ ค่าใกล้เคียง S1 จำนวนเท่ากับ
    % Number_neighb

    for u = 1: Number_neighb
        for k = 1: size(xlimit,2)
            S1(u,k) = S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));
            % ทำการสุ่มค่าใกล้เคียงโดยเรียกใช้โปรแกรม rand1
            % โดยให้ทำการสุ่มค่าในช่วง -1 ถึง 1

            while ( S1(u,k)>xlimit(1,k) | S1(u,k)<xlimit(2,k) )
                % ค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้จะต้องอยู่ภายในขอบเขตบนและ
                % ขอบเขตล่างของค่าพารามิเตอร์ ถ้าค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้
                % มีค่าเกินขอบเขตบนและขอบเขตล่างที่กำหนด ให้ทำการ
                % สุ่มค่าใกล้เคียงใหม่

                S1(u,k) = S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));
            end
        end
    end

    return % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

โปรแกรม *rand1.m*

function x = rand1(a,b)

% โปรแกรม rand1 เป็น โปรแกรมสุ่มค่าพารามิเตอร์
ในช่วงที่กำหนด

% อินพุตของโปรแกรม คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
a และขอบเขตล่างของพารามิเตอร์ b

% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ ผลของการสุ่ม
ค่าพารามิเตอร์ในช่วง a ถึง b

x = a+rand*(b-a);

% สุ่มค่าพารามิเตอร์โดยอาศัยความสัมพันธ์ a rand b

return

% กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน

โปรแกรม *objective1.m*

```
function [best_error1, best_neighbor1, best_error, best_neighbor] = objective1(S1,
                                best_error, S0)
    % โปรแกรม objective1 เป็นโปรแกรมประเมินค่า
    % โกล์เคียงที่ล้อมได้รอบ S0
    % อินพุตของโปรแกรม คือ S1, best_error และ S0
    % เอาต์พุตคือ best_error1, best_neighbor1, best_error,
    % และ best_neighbor
    error = [];
    % ตัวแปร error สำหรับรองรับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
    % ของค่าโกล์เคียงที่ได้จากการล้อม
    for k = 1: size(S1,1)
        W = design(S1(k,1),S1(k,2),S1(k,3),S1(k,4),S1(k,5),S1(k,6),S1(k,7),S1(k,8),S1(k,9),
                    S1(k,10),S1(k,11),S1(k,12),S1(k,13),S1(k,14));
        % ประเมินค่าโกล์เคียงใน S1 ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
        % ในโปรแกรม design
        error(k,1) = W;
        % เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าโกล์เคียงทั้งหมด
    end
    [best_error1,index] = min(error);
    % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดในบรรดาค่า
    % โกล์เคียง และเก็บไว้ใน best_error1
    best_neighbor1 = S1(index,:);
    % เก็บค่าพารามิเตอร์ของค่าโกล์เคียงที่ทำให้ค่าฟังก์ชัน
    % วัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุดไว้ใน best_neighbor1
    if best_error1 < best_error
        best_error = best_error1;
        % ปรับค่า best_error ถ้า best_error1 < best_error
        % โดยแทนค่า best_error ด้วย best_error1
        best_neighbor = S1(index,:);
        % แทนค่าพารามิเตอร์ best_neighbor ด้วย S1(index,:)
    else
        % ไม่เช่นนั้นแล้ว
        best_neighbor = S0;
        % แทนค่า best_neighbor ด้วย S0
    end
    return
    % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

โปรแกรม design.m

```
function W = design(var1, var2, var3, var4, var5, var6, var7, var8, var9, var10, var11, var12,
    var13, var14);
```

% โปรแกรมรับอินพุต 14 ค่า คือ ฟังก์ชันแสดงสมาชิก

ภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของ
แรงดันบัลไฟตรง

% กำหนดตัวแปรเริ่มต้นของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

```
neg3a = var1;
```

```
neg4a = var2;
```

```
zero1a = var3;
```

```
zero2a = var4;
```

```
zero3a = var5;
```

```
pos1a = var6;
```

```
pos2a = var7;
```

```
dec3a = var8;
```

```
dec4a = var9;
```

```
cons1a = var10;
```

```
cons2a = var11;
```

```
cons3a = var12;
```

```
incl1a = var13;
```

```
inc2a = var14;
```

% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม

```
vdc = 562500;
```

% กำหนดค่าแรงดัน vdc เท่ากับ 562500

```
vdcref_2 = vdc(ones(4001,1));
```

% กำหนดค่า vdcref_2 เท่ากับ เมตริกซ์ 4001×1 ของ vdc

```
cdc = 150e-6;
```

% กำหนดค่าตัวเก็บประจุ cdc เท่ากับ 150 μF

```
dT = 1e-5;
```

% ช่วงเวลาชักตัวอย่าง (วินาที)

```
vdc_2(1) = 562460;
```

% กำหนดค่าเริ่มต้นของ vdc_2 เท่ากับ 562460

% กำหนดค่าเริ่มต้นในการจำลองสถานการณ์

```

vdc_2 = []; % กำหนดตัวแปร vdc_2 สำหรับรองรับค่าแรงดันบัสไฟตรงจริง

output = []; % กำหนดตัวแปร output สำหรับรองรับค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

error_a = []; % กำหนดตัวแปร error_a สำหรับรองรับค่าความผิดพลาดเฟส a

error_a(1) = 0; % กำหนดค่าเริ่มต้นของ error_a เท่ากับ 0

error = []; % กำหนดตัวแปร error สำหรับรองรับค่าความผิดพลาดของแรงดันบัสไฟตรง

error1 = []; % กำหนดตัวแปร error1 สำหรับรองรับการคำนวณค่ากำลังสองของ error

% การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก
for k = 1:1:4000
    if k == 1 % เงื่อนไขที่ 1 ถ้า k = 1
        output(1) = 0; % กำหนดให้ค่า output เริ่มต้น เท่ากับ 0
    end
    if k > 1 % เงื่อนไขที่ 2 ถ้า k > 1
        error_a(k) = (vdcref_2(k)-vdc_2(k))/10000;
        % คำนวณค่า error_a ที่เกิดจากความผิดพลาดในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

        output(k) = fuzzy(error_a(k), neg3a, neg4a, zero1a, zero2a, zero3a, pos1a, pos2a, dec3a,
            dec4a, cons1a, cons2a, cons3a, inc1a, inc2a);
        % เรียกใช้โปรแกรม fuzzy เพื่อหาค่า output
    end
    vdc_2(k+1) = ((2/cdc)*(output(k)*dT))+vdc_2(k);
    % สมการการคำนวณค่าแรงดันบัสไฟตรงจริง
end
error = vdcref_2-vdc_2'; % คำนวณค่า error ของค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (vdcref_2) กับ ค่าแรงดันบัสไฟตรงจริง (vdc_2)

```

```
for j = 1:1:4000
    error1(j) = error(j)^2;    % กำหนดให้ค่า error1 เท่ากับ ค่า error แต่ละตำแหน่ง
                               % กำลังสอง
    j = j+1;                  % ปรับเพิ่มค่า j
end
W = sum(error1)/4000;        % หาค่าเฉลี่ยของค่า error1
return                       % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Prasomsak, P., Areerak, K-L., Areerak, K-N., and Srikaew, A. (2010). **Control of Shunt Active Power Filters using Fuzzy Logic Controller**. IASTED Technology and Management Conference on Modelling, Identification, and Control (AsiaMIC 2010). Phuket, Thailand, November 24-26: 107-113.

CONTROL OF SHUNT ACTIVE POWER FILTERS USING FUZZY LOGIC CONTROLLER

Prajaree Prasomsak, Kongpol Areerak, Kongpan Areerak and Arthit Srikaew
Power Quality Research Unit, School of Electrical Engineering
Suranaree University of Technology (SUT)
Nakhon Ratchasima, Thailand
E-mail: kongpol@sut.ac.th

ABSTRACT

The paper deals with the concept of the compensating current control using the fuzzy logic controller. In this paper, the voltage source inverter is used as the shunt active power filter and the instantaneous power theory is used for harmonic detection method. The Mamdani max-min and the mean of maximum approach are used for the fuzzy inference and the defuzzification method, respectively. Three groups of the input and output membership function for the fuzzy logic controller are considered for the comparison of harmonic elimination performance. The simulation results show that the fuzzy logic controller can control the compensating currents to achieve the %THD of the source currents under an acceptable range following on the IEEE Std. 519-1992.

KEY WORDS

Harmonic elimination, shunt active power filter, fuzzy logic controller, and instantaneous power theory

1. Introduction

Presently, nonlinear loads are widely used in industries in which these loads mainly generate the harmonics into the power system. These harmonics cause a lot of disadvantages into the power system such as loss in transmission lines and electric devices, protective device failures, and short-life electronic equipments in the system [1]. Therefore, it is very important to reduce or eliminate the harmonics in the system. The harmonic elimination via a shunt active power filter (SAPF) [2] is depicted in Fig.1. There are three main parts for using the shunt active power filter. The first is the harmonic detection method to identify harmonic quantity in the system. In this paper the instantaneous power theory (PQ method) is used as the harmonic detection. The second part is the active power filter structure. The voltage source inverter (VSI) with six IGBTs is used as the shunt active power filter. The last one is the control technique to control the compensating current. In this paper, the fuzzy logic controller is selected to control this current.

The shunt active power filter provides higher efficiency and more flexible compared with a passive power filter. In Fig.1, the three-phase bridge rectifier feeding resistive and inductive loads ($R = 130 \Omega$ and $L = 4 \text{ H}$) behaves as a nonlinear load into the power systems. Presently, there are many techniques to control the compensating current using the shunt active power filter such as the hysteresis control [3], deadbeat control [4], linear current control [5], sliding mode control [6] and fuzzy logic control. In the paper, the fuzzy logic control is selected to control the compensating current of the shunt active power filter. This is because it does not need the mathematical model of the system. However, the design of the fuzzy logic controller necessarily needs the experience of the designer.

The paper is structured as follows. The review of the instantaneous power theory is addressed in section 2. The concept of the compensating current control using the fuzzy logic controller is described in section 3. The simulation results and discussions of the harmonic elimination with the fuzzy logic controller are presented in section 4. Finally, section 5 is the conclusion of this paper.

2. Review of Instantaneous Power Theory

The harmonic detection method for the shunt active power filter in the paper is the instantaneous power theory (PQ) as shown in Fig. 1. In Fig. 1., the three-phase reference currents ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) can be calculated from the PQ harmonic detection block. There are six steps to calculate these reference currents using the PQ harmonic detection method as follows:

Step 1: Transform the three-phase source voltages (v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}) to $\alpha\beta$ frame ($v_{s\alpha}, v_{s\beta}$) by:

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

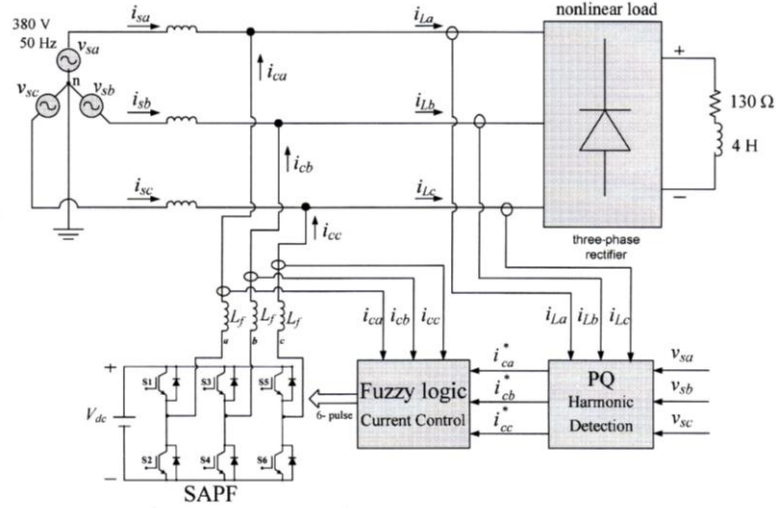


Fig. 1. The power system with shunt active power filter

Step 2: Transform the three-phase load currents (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) to $\alpha\beta$ frame ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) by:

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Step 3: Calculate the instantaneous active power (p_L) and reactive power (q_L) using the voltages and currents on $\alpha\beta$ frame by:

$$\begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

The p_L and q_L from equation (3) consist of two terms, the fundamental and harmonic terms as given by:

$$\begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p}_L + \tilde{p}_L \\ \bar{q}_L + \tilde{q}_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

when $\bar{p}_L$, $\bar{q}_L$ and $\tilde{p}_L$, $\tilde{q}_L$ are the DC component (fundamental component) and AC component (harmonic component) of the instantaneous power, respectively.

Step 4: From Step 3, it is shown that the instantaneous active power consists of two terms. For this step, the high-pass filter (HPF) is used to separate the harmonic component ($\tilde{p}_L$) from the instantaneous active power (p_L) as shown in Fig. 2. The second order butterworth filter with 10 Hz cutoff frequency is selected for HPF in the paper.

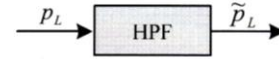


Fig. 2. Separation of harmonic component for instantaneous active power

Step 5: Calculate the reference currents on $\alpha\beta$ frame ($i_{c\alpha}^*, i_{c\beta}^*$) by:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p}_L \\ \tilde{q}_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

In equation (5), $\tilde{p}_L$ and $\tilde{q}_L$ are equal to $\tilde{p}_L$ and $\tilde{q}_L$, respectively for both harmonic elimination and reactive power compensation.

Step 6: Calculate the three-phase reference currents ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) for the shunt active power filter by:

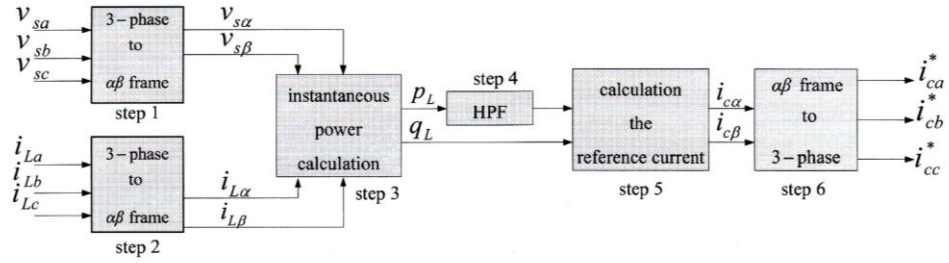


Fig. 3. The block diagram of PQ harmonic detection method

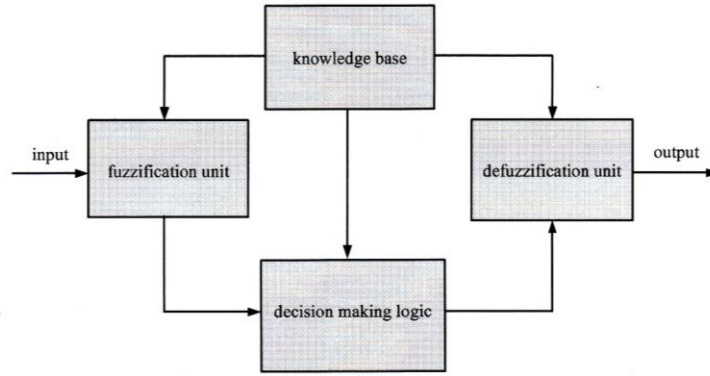


Fig. 4. The basic structure of fuzzy logic controller

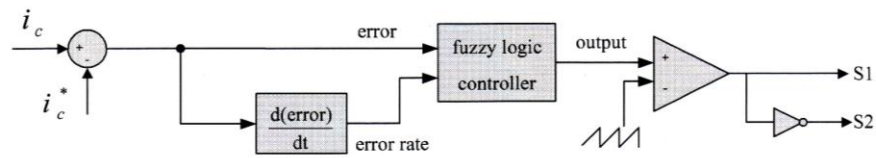


Fig. 5. The compensating control using fuzzy logic controller

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

The PQ harmonic detection method can be reasonably summarized as a block diagram as shown in Fig. 3.

3. Current Control using Fuzzy Logic Controller

The structure of fuzzy logic controller is shown in Fig. 4. There are four main parts for fuzzy logic approach. The first part is 'fuzzification unit' to convert the input variable to the linguistic variable or fuzzy variable. The second part is 'knowledge base' to keep the necessary data for setting the control method by the expert engineer. The 'decision making logic' or the inference engine is the third part to imitate the human decision using rule bases and data bases from the second part. The final part is

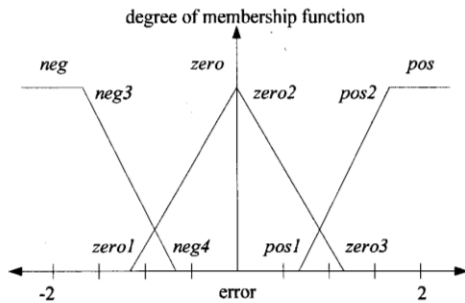
'defuzzification unit' to convert the fuzzy variable to easy understanding variable.

The block diagram of the compensating current control for shunt active power filter using fuzzy logic controller is shown in Fig. 5. The linguistic rules are used to set the rules for the fuzzy logic controller by the expert engineer without the mathematical model of the system. In Fig. 5., i_c and i_c^* are the actual compensating current and the reference current, respectively. The inputs of the fuzzy logic controller are the error and the error rate that can be calculated by:

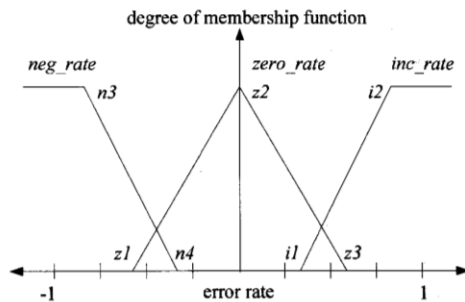
$$\text{error} = i_c - i_c^* \quad (7)$$

$$\text{error rate} = \frac{d(\text{error})}{dt} \quad (8)$$

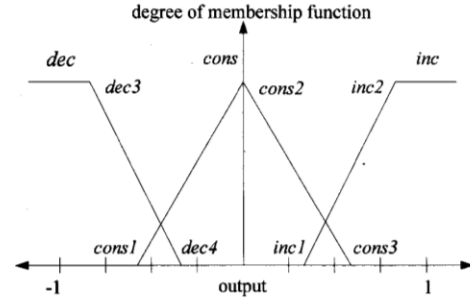
In Fig. 5., the output of the fuzzy logic controller is compared with the sawtooth signal to generate the switching signals of the shunt active power filter. The shape of the output signal from the fuzzy logic controller is the pulse waveform that can be adjusted. The linguistic variables of input and output for the fuzzy logic controller to control the compensating currents in the paper are shown in Table 1.



a) Error input



b) Error rate



c) Output

Fig. 6. The membership function of input and output

Table 1
The input and output linguistic variables of the fuzzy logic controller

Variable name	Variable value	Meaning
Input of the fuzzy logic controller		
error	neg	The error is negative. ($i_c < i_c^*$)
	zero	The error is zero. ($i_c = i_c^*$)
	pos	The error is positive. ($i_c > i_c^*$)
error rate	dec_rate	The error rate decreases.
	zero_rate	The error rate is zero.
	inc_rate	The error rate increases.
Output of the fuzzy logic controller		
output	dec	To decrease the pulse width.
	cons	No change the pulse width.
	inc	To increase the pulse width.

Table 2
The rules of the fuzzy logic controller

rule number	Detail
1	if error = neg and error rate = dec_rate then output = inc
2	if error = neg and error rate = zero_rate then output = inc
3	if error = neg and error rate = inc_rate then output = inc
4	if error = zero and error rate = dec_rate then output = inc
5	if error = zero and error rate = zero_rate then output = cons
6	if error = zero and error rate = inc_rate then output = dec
7	if error = pos and error rate = dec_rate then output = dec
8	if error = pos and error rate = zero_rate then output = dec
9	if error = pos and error rate = inc_rate then output = dec

The linguistic variables defined in Table 1 are used to set the rules for the fuzzy logic controller. There are nine

Table 3
The parameter values of the input and output membership function

Groups of parameters	The parameter values						
	error						
	neg		zero			pos	
	neg3	neg4	zero1	zero2	zero3	pos1	pos2
A	-1.850	-1.476	-1.700	-0.217	1.593	1.381	1.760
B	-1.670	-1.243	-1.410	-0.344	1.690	0.905	1.847
C	-1.670	-0.746	-0.873	0.101	1.030	0.904	1.430
	error rate						
	neg rate		zero rate			inc rate	
	n3	n4	z1	z2	z3	i1	i2
A	-0.616	-0.151	-0.198	-0.024	0.209	0.151	0.516
B	-0.839	-0.150	-0.606	-0.039	0.548	0.150	0.759
C	-0.622	-0.209	-0.389	-0.037	0.346	0.172	0.543
	output						
	dec		cons			inc	
	dec3	dec4	cons1	cons2	cons3	inc1	inc2
A	-0.770	-0.309	-0.458	-0.029	0.442	0.315	0.611
B	-0.495	-0.071	-0.235	-0.024	0.135	0.045	0.532
C	-0.616	-0.071	-0.378	-0.045	0.352	0.045	0.712

Table 4
The simulation results

Groups of parameters	Phase			%THD _{after,av}	%THD _{before,av}
	a	b	c		
A	2.24	2.26	2.21	2.24	24.40
B	1.86	1.86	1.87	1.86	
C	1.48	1.46	1.48	1.47	

rules for the fuzzy logic controller to control the compensating current with pulse width adjustment. The detail of these rules is addressed in Table 2. From Table 1 and 2, the membership function of the input and output are shown in Fig. 6. In Fig. 6, it can be seen that there are twenty one parameters for the fuzzy logic controller design by expert engineer such as *neg3*, *neg4*, *zero1*, *zero2*, *zero3*, *pos1*, *pos2*, *n3*, *n4*, *z1*, *z2*, *z3*, *i1*, *i2*, *dec3*, *dec4*, *cons1*, *cons2*, *cons3*, *inc1* and *inc2*.

The fuzzy logic controller performance depends on the membership function parameters. Therefore, the designer should carefully design these parameters. The parameters of the membership function used in the paper are illustrated in Table 3. From Table 3, there are three groups of parameters (group A, B and C). The simulation results for harmonic elimination using the shunt active power filter with the fuzzy logic controller are presented in section 4.

4. Simulation Results and Discussions

The fuzzy logic controller is used to control the compensating current of the shunt active power filter as shown in Fig. 1. In Fig. 1, the three-phase rectifier

feeding the series *RL* loads ($R = 130 \, \Omega$ and $L = 4 \, \text{H}$) behaves as a nonlinear load to the power system. The L_f and V_{dc} of the shunt active power filter are equal to 0.039 H and 750 V, respectively. In the paper, the Mamdani max-min approach [7] is used for fuzzy inference, while the mean of maximum approach is used for the defuzzification method. The simulation results for each group of the membership function parameters (see Table 3) are given in Table 4. The %THD_{av} before and after compensation in Table 4 can be calculated by:

$$\%THD_{av} = \sqrt{\frac{\sum_{k=a,b,c} \%THD_k^2}{3}} \quad (9)$$

It can be seen in Table 4 that the parameters group C can provide the best result in term of %THD. The %THD_{av} of the source currents before compensation (%THD_{before,av}) is equal to 24.40%. This value is extremely greater than the IEEE Std.519-1992. The %THD_{av} after compensation (%THD_{after,av}) using the parameters group A, B and C are equal to 2.24, 1.86 and 1.47, respectively. All of these %THD values after compensation are followed the IEEE Std.519-1992. The current waveforms before and after

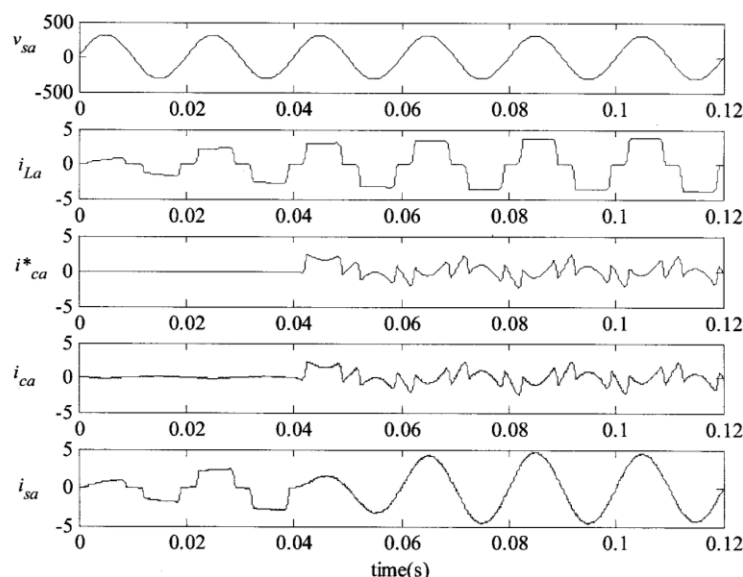


Fig. 7. The simulation results of the harmonic elimination with the fuzzy logic controller

compensation of phase a with the parameters group C are shown in Fig. 7. From Fig. 7., the compensating current (i_{ca}) directly injects via the shunt active power filter with the fuzzy logic controller at $t = 0.04$ s. As a result, the compensating current can track the reference current (i_{ca}^*) calculated from the PQ harmonic detection method. In addition, the source current (i_{sa}) before compensation is equal the load current (i_{La}) and it is not sinusoidal waveform ($t < 0.04$ s.). After compensation ($t \geq 0.04$ s.), this current becomes sinusoidal waveform as shown in Fig. 7.

5. Conclusion

The paper presents the application of the fuzzy logic controller to control the compensating current. The shunt active power filter with the instantaneous power theory harmonic detection is used in the system for harmonic elimination. The Mamdani max-min and the mean of maximum approach are used for the fuzzy inference and the defuzzification method, respectively. The input and output membership function design of the fuzzy logic controller is the important for the system performance. Three groups of the membership function from the author experiences are used for the comparison study. The study shows that group C provides the minimum %THD of the source currents and this value is under the IEEE Std. 519-

1992. In the future, the authors will use the artificial intelligence (AI) technique to tune the membership function instead of their experience. The uses of AI technique can provide the optimum %THD compared with the design from the experience.

Acknowledgements

The authors would like to thank Suranaree University of Technology for financial support.

References

- [1] IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended practices and requirement for harmonic control in electrical power system, 1993.
- [2] F. Zhuo, J. Yang, J. Hu, & Z. Wang, Study on Active Power Filter used in Three-Phase Four Wire System, *IEEE Conf. Power Electronics and Motion Control*, 2000, 1037-1040.
- [3] A. Chaoui, J.-P. Gaubert, F. Krim, & L. Rambault, Direct power control of shunt active filter, *Power Electronics and Applications*, 2007, 1-11.
- [4] K. Nishida, M. Rukonuzzman, & M. Nakaoka, Advanced current control implementation with robust deadbeat algorithm for shunt single-phase voltage-source type active power, *IEEE Conf. on Electric Power Applications*, 3(151), 2004, 283-288.
- [5] W. Lenwari, & M. Odavic, A comparative study of two high performance current control techniques for

three-phase shunt active power filters, *Power Electronics and Drive Systems*, 2009, 962-966.

[6] V. Cardenas, N. Vazquez, & C. Herndndez, Sliding mode control applied to a 3Φ shunt active power filter using compensation with instantaneous reactive power theory, *29th IEEE Conf. on Power Electronics Specialists*, 1998, 236-241.

[7] T. Ross, *Fuzzy Logic with engineering applications* (New York, McGraw-Hill, 1995).

ประวัติผู้เขียน

นางสาวปราจิри ประสมศักดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดราชบุรี เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่ 1-6 ที่โรงเรียนคูสิตวิทยา ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนนาวิรุติ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันการศึกษาเดิม

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท ได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม (2) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 (3) ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ และ (4) ปฏิบัติการระบบควบคุม โดยมีความสนใจในด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การควบคุมอัตโนมัติ และปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจากการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจ ทางด้านการกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเป็นอย่างดี และมีผลงานตีพิมพ์ปรากฏดัง ภาศผนวก ง. จำนวน 1 ฉบับ