

การประยุกต์ใช้ระบบอนุমানนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ในการควบคุมแรงดันและ
กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในระบบจำหน่ายไฟฟ้า



นายบดี กอวัฒนา

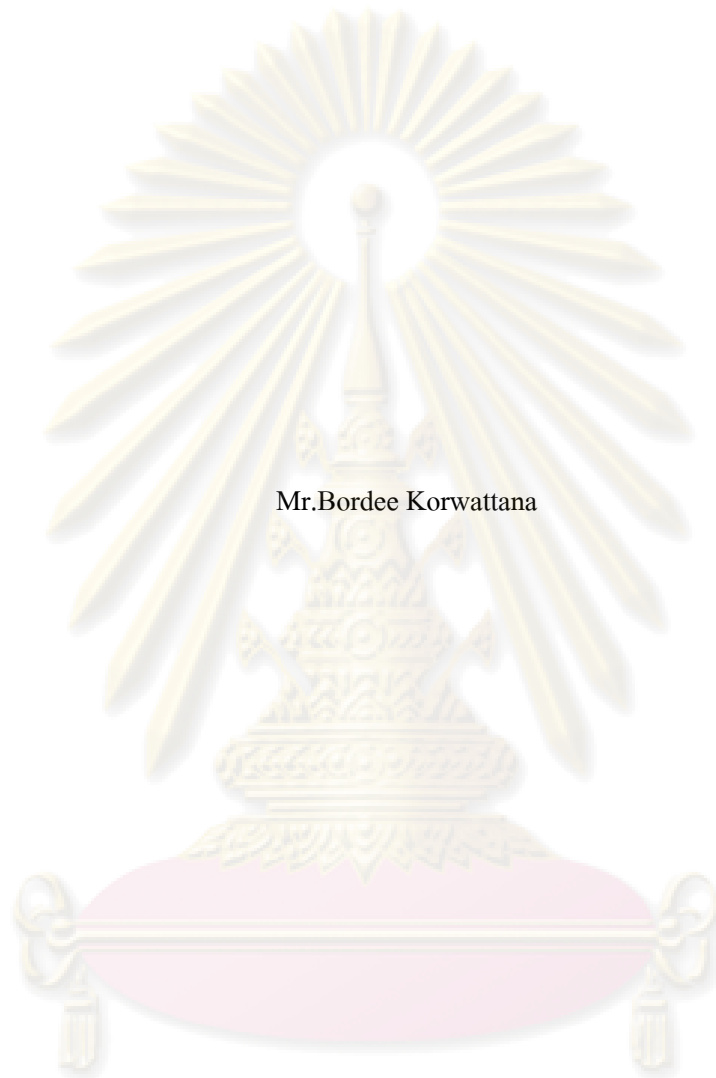
ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF AN ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM TO
VOLTAGE AND REACTIVE POWER CONTROL IN A DISTRIBUTION SYSTEM



Mr.Bordee Korwattana

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

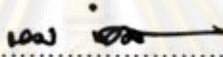
Chulalongkorn University

Academic year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

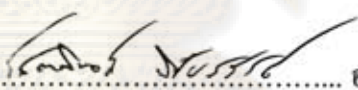
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้ระบบอนุমানนิวโรฟิชซีแบบปรับตัวได้ในการควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
โดย นายบดี กอวัฒนา
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสคติพงษ์ พิชัยสวัสดิ์

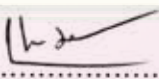
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

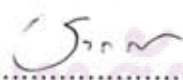

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศhirัตวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออากรณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสคติพงษ์ พิชัยสวัสดิ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

ศูนย์วิจัยทางการแพทย์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บดี กอวัฒนา : การประยุกต์ใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ในการควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายไฟฟ้า. (APPLICATION OF AN ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM TO VOLTAGE AND REACTIVE POWER CONTROL IN A DISTRIBUTION SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :ผศ. ดร. โสติพงษ์ พิชัยสวัสดิ์, 127 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอรูปแบบขาเข้าของระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (ANFIS) เพื่อการคำนวณสถานะการทำงานการปรับแก้หม้อแปลงและการสวิตซ์ดึงเก็บประจุในระบบจำหน่าย ในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบให้เหมาะสมตามเส้นโค้งโหลดรายชั่วโมง (hourly load curve) โดยพิจารณาปัจจัยและตัวแปรต่าง ๆ ในระบบจำหน่าย เพื่อกำหนดข้อมูลที่เหมาะสมเป็นขาเข้าของ ANFIS รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอจะนำไปทดสอบกับระบบจำหน่ายทดสอบ จากสถานีไฟฟ้าย่อย นวนคร 3 ขนาดแรงดัน 22 kV โดยข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลตรวจสอบจะถูกสร้างโดยการแบ่งระดับโหลดขึ้นเป็นข้อมูลฝึกสอน แล้วคำนวณค่าแก้หม้อแปลงและสวิตซ์ดึงเก็บประจุ จากการทำให้โหลดโพล์และทำการหาค่าเฉลี่ยของสถานะการทำงานแบบถ่วงน้ำหนักจากฟัซซีเซต จากนั้นจึงฝึกสอน ANFIS แล้วตรวจสอบด้วยข้อมูลตรวจสอบ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการกำหนดขาเข้ารูปแบบต่าง ๆ เพื่อนำรูปแบบที่เหมาะสมไปใช้งาน

หลังจากกำหนดรูปแบบที่เหมาะสมเป็นขาเข้าของ ANFIS รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอจะนำไปประยุกต์เพื่ออนุมานสถานะการทำงานการปรับแก้หม้อแปลงและการสวิตซ์ดึงเก็บประจุในระบบจำหน่าย ก่อนหาคำตอบจากเทคนิค dynamic programming ต่อไป ทดสอบเปรียบเทียบคำตอบที่ได้กับวิธีหาคำตอบโดยการทำ dynamic programming เพียงอย่างเดียว

ผลการทดสอบพบว่า การกำหนดขาเข้าตามรูปแบบที่นำเสนอสามารถทำให้ ANFIS อนุมานสถานะการทำงานการปรับแก้หม้อแปลงและการสวิตซ์ดึงเก็บประจุในระบบจำหน่ายได้ใกล้เคียงกับคำตอบ และวิธีดังกล่าวยังใช้เวลาในการคำนวณลดลงจากวิธี dynamic programming ที่เคยมีการนำเสนอก่อนหน้านี้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อ นิสิต.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4870354521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : FUZZY DYNAMIC PROGRAMMING/ ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM

BORDEE KORWATTANA : APPLICATION OF AN ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM TO VOLTAGE AND REACTIVE POWER CONTROL IN A DISTRIBUTION SYSTEM. ADVISOR : ASST.PROF.SOTDHIPONG PHICHAISAWAT,Ph.D., 127 pp.

This thesis proposes an input format of an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for calculating status of transformer tap and capacitors in a distribution system. According to controlling voltage and reactive power in a distribution system, it must consider related factors and variables in the distribution system for identifying suitable data as inputs of ANFIS. The proposed input format is tested with the distribution test system, which is the distribution system of Navanakorn substation 3 at 22kV. The training data formed by divides load levels and audited data are formed by means of possible working status after that ANFIS is trained by training data then checked with checking data and compared ANFIS from other forms to find suitable working model.

In addition to identify suitable data as inputs of ANFIS, this inputs will lead to apply to predicting the status of transformer tap and capacitors in a distribution system before finding from fuzzy dynamic programming which is compared with the fuzzy dynamic programming method.

It is found from the test results that the proposed input format can make ANFIS predict the status of transformer tap and capacitors in a distribution system. This similar to the result so it can reduce time to find out the result, compared with the fuzzy dynamic programming method proposed before.

Department : Electrical Engineering
Field of Study : Electrical Engineering
Academic Year : 2008

Student's Signature
Advisor's Signature
Co-Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสทธิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาให้ คำแนะนำต่าง ๆ ทำให้ผู้วิจัยเกิดแนวคิดในการนำเสนอหัวข้อวิจัยในครั้งนี้ และได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ ดร.เนบบุญ หุนเจริญ และ อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำเพิ่มเติมจนวิทยานิพนธ์ สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณพี่สถาพร ลิ้มปัทมปาณี ที่ให้คำแนะนำด้านเทคนิคและแนวคิด ซึ่งเป็น ประโยชน์ต่อการวิจัยเป็นอย่างมาก ตลอดจนขอบคุณรุ่นพี่และรุ่นน้องในห้องปฏิบัติการทุกคนที่ให้ กำลังใจและให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณ คุณดวงกมล กิติโสภากุล ที่ได้ช่วยตรวจสอบและแนะนำรูปแบบการ จัดเรียงเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้กำลังใจและให้คำปรึกษา ซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญจนทำ ให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และ คุณแม่ ที่อบรมเลี้ยงดู และ ปลุกฝังให้ผู้วิจัยเห็นความสำคัญของการศึกษาตลอดมา จนสำเร็จการศึกษาและมีหน้าที่การงาน จนถึงทุกวันนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ

บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
1.5 เนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	4
2. แบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	6
2.1 แบบจำลองส่วนต่าง ๆ ในระบบจำหน่าย.....	6
2.1.1 รูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	6
2.1.2 แบบจำลองโหลด.....	7
2.1.3 แบบจำลองสายป้อน.....	7
2.1.4 แบบจำลองตัวเก็บประจุ.....	9
2.1.5 แบบจำลองการปรับแก้ป้อนแปลง.....	10
2.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีของนิวตัน – ราฟสัน.....	11
2.2 สรุป.....	14
3. ทฤษฎีฟัซซีเซต.....	16
3.1 แนวคิดและลักษณะเบื้องต้นของฟัซซีเซต.....	16
3.2 ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy set theory).....	16
3.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและค่าตัวแปรต่าง ๆ.....	18
3.3.1 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular MF).....	19
3.3.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoid MF).....	19

บทที่	หน้า
3.3.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน (Gaussian MF).....	20
3.3.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูประฆัง (Generalized bell MF).....	20
3.4 ตรรกศาสตร์แบบฟัซซี (Fuzzy Logic).....	21
3.4.1 การอนุมานแบบฟัซซี (Fuzzy Inference system).....	21
3.4.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์โดยใช้การอนุมานแบบฟัซซี.....	22
3.5 สรุป.....	25
4. ระบบอนุมานนิเวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้.....	26
4.1 โครงสร้างของระบบอนุมานนิเวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้.....	26
4.2 การฝึกสอน ANFIS.....	30
4.2.1 การเรียนรู้แบบไฮบริด (Hybrid Learning Algorithm).....	30
4.2.1.1 การประมาณค่าโดยวิธีลีสท์สแควร์ (Least-Squares Estimator)	31
4.2.1.2 การประมาณค่าโดยวิธีแบคพรอพพาเกชัน (Backpropagation Method)	33
4.3 สรุป.....	35
5. การประยุกต์ใช้ระบบอนุมานนิเวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย.....	36
5.1 การอนุมานสถานะทำงานของอุปกรณ์จาก ANFIS.....	36
5.2 การคำนวณสถานะทำงานของอุปกรณ์ในขั้นตอนสุดท้ายจากเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming.....	37
5.3 สรุป.....	40
6. การนำเสนอหาเข้าของ ANFIS ในการอนุมานสถานะการทำงานของอุปกรณ์.....	41
6.1 สมมติฐาน.....	41
6.2 แนวคิดในการกำหนดหาเข้าให้ ANFIS ในการอนุมานสถานะการทำงานของอุปกรณ์.....	43
6.3 การตัดสินใจหาสถานะการทำงานของอุปกรณ์จากค่าขาออกของ ANFIS.....	46
6.4 สรุป.....	48
7. การทดสอบการประยุกต์ใช้ ANFIS ควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย.....	49
7.1 การทดสอบรูปแบบการกำหนดหาเข้าของ ANFIS ที่แตกต่างกัน.....	49

7.1.1	ระบบจำหน่ายที่ใช้ทดสอบและการสร้างข้อมูลตัวอย่าง.....	50
7.1.2	การสร้าง ANFIS สำหรับการทดสอบ.....	51
7.1.3	รูปแบบขาเข้าในการทดสอบ.....	53
7.1.4	ผลการทดสอบ.....	57
7.1.5	วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	69
7.1.6	สรุปผลการทดสอบ.....	69
7.2	การทดสอบชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่แตกต่างกันในการคำนวณ สถานการณ์ทำงานของอุปกรณ์.....	70
7.2.1	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้ในการทดสอบ.....	70
7.2.2	การสร้าง ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบ.....	70
7.2.3	ผลการทดสอบ.....	72
7.2.4	วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	80
7.2.5	สรุปผลการทดสอบ.....	81
7.3	การทดสอบกับระบบจำหน่ายของประเทศไทย โดยเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีการ ที่นำเสนอโดยประยุกต์ใช้ ANFIS ช่วยคำนวณกับวิธีการตามแนวคิดเดิม.....	81
7.3.1	วิธีการหาคำตอบจากเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming.....	81
7.3.2	วิธีการหาคำตอบจากเทคนิค Partial Dynamic Programming.....	86
7.3.3	วิธีการหาคำตอบจากเทคนิคที่นำเสนอ.....	86
7.3.4	ผลการทดสอบ.....	88
7.3.5	วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	108
7.3.6	สรุปผลการทดสอบ.....	109
7.4	สรุป.....	109
8.	ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ	110
8.1	ข้อสรุป.....	110
8.1.1	หลักการ.....	110
8.1.2	สิ่งที่นำเสนอ	110
8.1.3	การทดสอบ	111
8.1.4	อุปสรรค	111
8.2	ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยในขั้นต่อไป.....	112

บทที่	หน้า
รายการอ้างอิง.....	113
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก.....	118
ภาคผนวก ข.....	120
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	127



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	วิธีการเรียนรู้แบบไฮบริด..... 30
6.1	จำนวนพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบต่าง ๆ..... 41
6.2	เปรียบเทียบจำนวนพารามิเตอร์ของระบบที่มีจำนวนขาเข้าแตกต่างกัน..... 42
7.1	ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบหัวข้อที่ 7.1..... 55
7.2	ค่า RMSE ของตำแหน่งเท้าปมื่อแปลงจากการฝึกสอนแต่ละรอบ..... 56
7.3	ค่า RMSE ของค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีจากการฝึกสอนแต่ละรอบ..... 56
7.4	ค่า RMSE ของค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ที่สายป้อนจากการฝึกสอน แต่ละรอบ..... 56
7.5	ค่า RMSE ของค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ที่สายป้อนจากการฝึกสอน แต่ละรอบ..... 56
7.6	ค่า RMSE ของค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ที่สายป้อนจากการฝึกสอน แต่ละรอบ..... 57
7.7	ผลการทดสอบการคำนวณสถานะตำแหน่งเท้าปมื่อแปลง..... 68
7.8	ผลการทดสอบการคำนวณค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานี..... 68
7.9	ผลการทดสอบการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ที่สายป้อน..... 68
7.10	ผลการทดสอบการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ที่สายป้อน..... 68
7.11	ผลการทดสอบการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ที่สายป้อน..... 68
7.12	ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบหัวข้อที่ 7.2..... 70
7.13	ค่า RMSE ของตำแหน่งเท้าปมื่อแปลงจากการฝึกสอนแต่ละรอบ..... 71
7.14	ค่า RMSE ของค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีจากการฝึกสอนแต่ละรอบ..... 71
7.15	ค่า RMSE ของค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ที่สายป้อนจากการฝึกสอน แต่ละรอบ..... 71
7.16	ค่า RMSE ของค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ที่สายป้อนจากการฝึกสอน แต่ละรอบ..... 71
7.17	ค่า RMSE ของค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ที่สายป้อนจากการฝึกสอน แต่ละรอบ..... 71
7.18	ผลการทดสอบการคำนวณสถานะตำแหน่งเท้าปมื่อแปลง..... 79
7.19	ผลการทดสอบการคำนวณค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานี..... 79
7.20	ผลการทดสอบการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ที่สายป้อน..... 80

ตารางที่	หน้า
7.21 ผลการทดสอบการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ที่สายป้อน.....	80
7.22 ผลการทดสอบการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ที่สายป้อน.....	80
7.23 ผลจากวิธี Fuzzy Dynamic Programming จากโหนด วันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551.....	88
7.24 ผลจากวิธี Partial Dynamic Programming จากโหนด วันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551.....	89
7.25 ผลจากวิธี ที่นำเสนอ จากโหนดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551.....	90
7.26 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี Fuzzy Dynamic Programming จากโหนดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551.....	91
7.27 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี Partial Dynamic Programming จากโหนดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551.....	92
7.28 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี ที่นำเสนอ จากโหนด วันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551.....	93
7.29 เปรียบเทียบผลการทดสอบในวิธีการแบบต่าง ๆ จากโหนด วันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551.....	94
7.30 ผลจากวิธี Fuzzy Dynamic Programming จากโหนด วันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551.....	95
7.31 ผลจากวิธี Partial Dynamic Programming จากโหนด วันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551.....	96
7.32 ผลจากวิธี ที่นำเสนอ จากโหนดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551.....	97
7.33 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี Fuzzy Dynamic Programming จากโหนดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551.....	98
7.34 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี Partial Dynamic Programming จากโหนดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551.....	99
7.35 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี ที่นำเสนอ จากโหนด วันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551.....	100
7.36 เปรียบเทียบผลการทดสอบในวิธีการแบบต่าง ๆ จากโหนด วันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551.....	101

7.37 ผลจากวิธี Fuzzy Dynamic Programming จากโหนด วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551.....	102
7.38 ผลจากวิธี Partial Dynamic Programming จากโหนด วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551.....	103
7.39 ผลจากวิธี ที่นำเสนอ จากโหนดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551.....	104
7.40 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี Fuzzy Dynamic Programming จากโหนดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551.....	105
7.41 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี Partial Dynamic Programming จากโหนดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551.....	106
7.42 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี ที่นำเสนอ จากโหนด วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551.....	107
7.43 เปรียบเทียบผลการทดสอบในวิธีการแบบต่าง ๆ จากโหนด วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551.....	108
ก.1 ข้อมูลบัสในระบบ	118
ก.2 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าในระบบ	118
ข.1 ข้อมูลอัตราส่วนแรงดันตามตำแหน่งเท็ปของหม้อแปลง TP1 ในระบบ	120
ข.2 ข้อมูลโหนดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551	121
ข.3 ข้อมูลโหนดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551	122
ข.4 ข้อมูลโหนดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551	123
ข.5 ข้อมูลแรงดันที่สถานีแต่ละวัน	124
ข.6 ขนาดหม้อแปลงจำหน่ายที่บัสในระบบ	125
ข.7 ตัวอย่างการเฉลี่ยโหนดตามขนาดหม้อแปลงเพื่อใช้เป็นข้อมูลผู้ใช้ไฟ	125
ข.8 ข้อมูลโหนดสูงสุด ต่ำสุด ที่ใช้สร้างข้อมูลฝึกสอน	126

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1	แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล.....	7
2.2	ลักษณะเส้นโค้งช่วงเวลาโหลด.....	7
2.3	วงจรมูลของสายส่งระยะสั้น.....	8
2.4	วงจรมูลของสายส่งระยะปานกลาง.....	8
2.5	ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีหม้อแปลงที่มีการปรับแท็ปได้ติดตั้งอยู่.....	10
2.6	วงจรรระบบไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงปรับแท็ปได้ติดตั้งอยู่จาก (2.7).....	11
2.7	ตัวอย่างบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	12
3.1	การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะของเซตแบบคั้งเคิม (crisp set) และฟัซซีเซต.....	17
3.2	ลักษณะของเซตแบบคั้งเคิม (crisp set) และฟัซซีเซตตามตัวอย่างที่ 3.1.....	18
3.3	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบต่าง ๆ	21
3.4	โครงสร้างการทำงานของระบบอนุมานแบบฟัซซี.....	22
3.5	ผลประกอบการ Max-Min ในระบบอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani.....	23
3.6	ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno.....	25
4.1	ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno ที่มีจำนวนกฎ 2 กฎ.....	26
4.2	ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (ANFIS).....	27
4.3	โครงสร้างนิวรัล.....	33
5.1	การควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย โดยการประยุกต์ใช้ ANFIS ร่วมกับ Fuzzy Dynamic Programming.....	36
5.2	ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่นำมาใช้สร้างฟังก์ชันเป้าหมาย.....	37
6.1	แสดงลักษณะแบบจำลองของระบบจำหน่ายที่ใช้ศึกษา.....	43
6.2	รูปแบบที่ 1 ของ ANFIS ที่ใช้ทดสอบระบบจำหน่าย.....	44
6.3	รูปแบบที่ 2 ของ ANFIS ที่ใช้ทดสอบระบบจำหน่าย.....	44
6.4	รูปแบบที่ 3 ของ ANFIS ที่ใช้ทดสอบระบบจำหน่าย.....	45
6.5	รูปแบบที่ 4 ของ ANFIS ที่ใช้ทดสอบระบบจำหน่าย.....	45
6.6	การพิจารณาการทำงานของตำแหน่งแท็ปหม้อแปลง.....	47
7.1	ระบบจำหน่ายทดสอบของสถานีไฟฟ้านวนคร 3	50
7.2	ระบบจำหน่ายทดสอบที่ได้จากการยุบระบบลง	51
7.3	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าฟัซซีใน (7.1)	52

7.37 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS1 เทียบกับค่าขาเข้า ตรวจสอบ.....	76
7.38 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS2 เทียบกับค่าขาเข้า ตรวจสอบ.....	77
7.39 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS3 เทียบกับค่าขาเข้า ตรวจสอบ.....	77
7.40 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS1 เทียบกับค่าขาเข้า ตรวจสอบ.....	78
7.41 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS2 เทียบกับค่าขาเข้า ตรวจสอบ.....	78
7.42 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS3 เทียบกับค่าขาเข้า ตรวจสอบ.....	79
7.43 ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนไป จากค่าของระบบ	81
7.44 ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ.....	82
7.45 ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวประกอบกำลังในระบบ	83
7.46 ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนครั้งการเปลี่ยนสถานะของ อุปกรณ์.....	83
7.47 ขั้นตอนการหาคำตอบจากเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming.....	85
7.48 ขั้นตอนการหาคำตอบจากเทคนิค Partial Dynamic Programming.....	86
7.49 ขั้นตอนการหาคำตอบจากวิธีการที่นำเสนอ	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ เนื่องจากมนุษย์ใช้ไฟฟ้าในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ มากมาย โดยไฟฟ้าจะจ่ายผ่านระบบจำหน่ายไปยังผู้ใช้ในพื้นที่ต่าง ๆ ซึ่งความต้องการไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลามีปริมาณมากน้อยแตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าแต่ละช่วงเวลาให้มีคุณภาพที่ดีอยู่เสมอ เพื่อให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ

ด้วยเหตุผลข้างต้น ทำให้มีการศึกษาหาแนวทางการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาถึงปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายเป็นสำคัญ โดยที่การดำเนินการต่าง ๆ ในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายในแต่ละวันนั้นถือเป็นสิ่งสำคัญมากต่อระบบจำหน่าย โดยถ้ามีการควบคุมได้อย่างเหมาะสมจะทำให้คุณภาพของแรงดันไฟฟ้าดีและลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบ รวมทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตอีกด้วย ซึ่งปกติแล้วการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายนั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยทั่วไปแล้วจะทำการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงควบคู่กับการสวิตชิงตัวเก็บประจุ (Capacitors Bank) หรือติดตั้งอุปกรณ์ FACTS เพิ่มเติมในระบบ ซึ่งจะสามารถควบคุมปริมาณแรงดันและลดปริมาณกำลังไฟฟารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายตามระดับโหลดต่าง ๆ ได้ ทำให้ระบบไฟฟ้ามีค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้น และยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของแรงดันไฟฟ้าให้ดีขึ้นอีกด้วย

จากการศึกษาการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟารีแอกทีฟในระบบไฟฟ้ากำลังจากผลงานวิจัยในอดีต ได้มีการศึกษาหาแนวทางในการควบคุมควบคุมอย่างหลากหลายแนวทาง โดยการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟารีแอกทีฟในสายส่งและระบบสายส่งย่อย โดยทั่วไปจะแก้ปัญหาโดยใช้การทำ Optimal Power Flow [1-6] โดยที่ในระบบจะมีตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ เช่น ระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, การเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลง หรือการสวิตชิงตัวเก็บประจุ เป็นต้น โดยการดำเนินการของอุปกรณ์ดังกล่าวจะต้องทำการศึกษาวิธีการควบคุมให้มีความเหมาะสมเพื่อให้ระบบมีคุณภาพไฟฟ้าที่ดี โดยการออปติไมซ์เพื่อทำการลดขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนจากค่าแรงดันของระบบ และลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ในส่วนการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่สายป้อนของระบบ

จำหน่ายโดยศึกษาถึงผลของตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายนั้น จะพิจารณาถึงขนาดและตำแหน่ง การติดตั้ง รวมถึงการควบคุมการทำงานที่เวลาต่าง ๆ ให้เหมาะสมนั้น ได้มีการศึกษาอยู่หลาย แนวทางโดยใช้เทคนิคที่แตกต่างกันไป [7-16] ซึ่งได้มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้ การวางแผนและควบคุมตัวเก็บประจุ ในระบบจำหน่าย

ในส่วนของการศึกษาการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบส่ง (transmission systems) และสายป้อน (distribution feeders) จะมีผลงานวิจัยอยู่บ้างพอสมควร [17-22] โดยทั่วไปเป้าหมายของการศึกษาการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟใน สถานีไฟฟ้าย่อย (distribution substation) [17-20] ก็คือ ควบคุมปริมาณแรงดันที่บัสด้านแรงต่ำ ของหม้อแปลงจำหน่ายในสถานีไฟฟ้าย่อยให้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี ควบคู่ไปกับการลดปริมาณมาก กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลสู่หม้อแปลงจำหน่ายด้วย เพื่อให้บรรลุเป้าหมายในการศึกษานั้นจะต้อง มีการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงจำหน่ายและทำการสวิตซ์ตัวเก็บประจุบ่อยครั้งในแต่ละช่วงเวลา โดย จะทำการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อควบคุมให้แรงดันที่บัสทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลง จำหน่ายอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ส่วนตัวเก็บประจุจะมีการสวิตซ์ตามแต่ระดับโหลด [17] หรือ ตามปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย [18] ซึ่งวิธีการในลักษณะนี้จะเห็นว่าการ เปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงจำหน่ายกับการสวิตซ์ตัวเก็บประจุนั้นเป็นอิสระต่อกัน โดยถ้ามีการสวิตซ์ ตัวเก็บประจุเกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อปริมาณแรงดันในระบบด้วย ซึ่งจะส่งผลให้มีการดำเนินการ เปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงบ่อยครั้งเป็นผลให้ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหม้อแปลง ด้วย เหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาถึงการควบคุมโดยใช้การประสานกันระหว่างการ เปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงและการสวิตซ์ตัวเก็บประจุให้เหมาะสม วิธีหนึ่งที่มีการนำเสนอขึ้นมาก็คือ การใช้เทคนิค Dynamic Programming [18,19] โดยมีการกำหนดเงื่อนไขจำนวนการดำเนินการ เปลี่ยนแท็ปและการสวิตซ์ตัวเก็บประจุเอาไว้ และยังต้องมีข้อมูลโหลดประกอบกันเพื่อใช้ศึกษา โดยใช้การทำนายโหลดในอีก 24 ชั่วโมงข้างหน้าจากการศึกษาข้อมูลเก่าที่ได้มีการบันทึกเอาไว้ ออกมาเป็นเส้นโค้งโหลดรายชั่วโมง (hourly load curve) จากนั้นจึงใช้เทคนิค Dynamic Programming หาคำตอบ โดยภายหลังได้มีการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมช่วย วิเคราะห์ (Artificial Neural Network) ประมาณคำตอบก่อนทำ Dynamic Programming [20] ซึ่งวิธีนี้ช่วยลดจำนวนเส้นทางเดินของคำตอบเป็นผลให้สามารถลดระยะเวลาในการหาคำตอบและ ลดการใช้หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ในการหาคำตอบได้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการการศึกษาการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย โดยจะพิจารณาลงไปในแต่ละสายป้อน (distribution feeders) ในระบบ จำหน่ายด้วย โดยจะนำเสนอวิธีการใหม่ที่ได้จากการเลียนแบบการเรียนรู้ระบบโครงข่ายประสาท เทียม (Artificial Neural Network) รวมเข้ากับการใช้เหตุและผลของระบบอนุมานฟัซซี่ (Fuzzy Inference System)

เรียกว่าระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่ หรือ ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) มาใช้ประมาณค่าคำตอบในแต่ละ State ก่อนหาคำตอบสุดท้ายจากการทำ dynamic programming โดยที่ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่จะทำการประมาณค่าข้อมูลขาออกจากการเรียนรู้จากชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกสอน และระบบดังกล่าวไม่จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีเป็นจำนวนมากในการแก้ปัญหา อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องสร้างฟังก์ชันขึ้นมาเพื่อทำออปติไมซ์หาคำตอบ จึงเชื่อได้ว่าระบบดังกล่าวจะมีความรวดเร็วในการหาคำตอบอยู่พอสมควร ซึ่งระบบจะสามารถสร้างแบบจำลองเฉพาะจากชุดข้อมูลที่มี โดยจะมีจำนวนของระดับชั้นในโครงสร้างที่คงที่ไม่ซับซ้อนเหมือนระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) โดยค่าขาออกของระบบจะมีความถูกต้องตามจำนวนชุดข้อมูลที่นำมาใช้ฝึกสอนระบบและจำนวนกฎที่ใช้ ซึ่งระบบดังกล่าวนี้อาจมีความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้งานกับระบบต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายให้มีค่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนด และลดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลสู่มือแปลงจำหน่าย รวมทั้งลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย ให้มีความเหมาะสมที่สุดตามแต่ละวัน โดยการใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (ANFIS) เพื่อให้ผลการคำนวณเหมาะสมกับสถานะของโหลดแต่ละช่วงเวลา
- 2) ทดสอบวิธีการที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ข้อมูลระบบในประเทศไทย เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย
- 2) ในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงและการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ (Capacitors Bank) เท่านั้น
- 3) ทำการศึกษาในลักษณะการวางแผนเพื่อควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบ จากการทำนายลักษณะโหลดล่วงหน้า 24 ชั่วโมง เป็นเส้นโค้งรายชั่วโมง โดยใช้ข้อมูลในอดีตมาทำการศึกษา ซึ่งจะไม่ได้ทำการลักษณะโหลดล่วงหน้าจริง โดยการเก็บข้อมูลโหลดที่สถานีไฟฟ้าและเฉลี่ยโหลดตามขนาดมือแปลง ซึ่งสมมติให้เป็นโหลดของผู้ใช้ไฟ

- 4) ใช้การอนุมานสถานะการทำงานของอุปกรณ์จาก ANFIS โดยทำการกำหนดจำนวนและชนิดของขาเข้าที่เหมาะสมโดยดูจากค่าความคลาดเคลื่อนของ ANFIS ที่ได้
- 5) ทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีที่ได้จากการควบคุม จากวิธีที่นำเสนอกับวิธีดั้งเดิม จากข้อมูลในอดีตเพื่อใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายต่อไป

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาหาวิธีการในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้
- 2) ศึกษาและวิเคราะห์ผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 3) ศึกษาและวิเคราะห์ผลจากการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงต่อตัวแปรในระบบจำหน่าย
- 4) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีฟัซซีและระบบอนุมานนิเวโรฟฟัซซี
- 5) ศึกษาถึงปัจจัยการกำหนดขาเข้าของ ANFIS ในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย
- 6) ออกแบบ ปรับปรุง และพัฒนาโปรแกรมที่ใช้งาน
- 7) รวบรวมข้อมูลระบบจำหน่ายในประเทศไทยที่จะนำมาทดสอบ
- 8) ทดสอบวิธีการที่นำเสนอ
- 9) สรุปผลงานวิจัย

1.5 เนื้อหาวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้ ANFIS ร่วมกับเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming มาใช้ในการดำเนินการควบคุมการสวิตชิง Capacitors ร่วมกับการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงเพื่อทำการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย โดยเนื้อหาภายในจะกล่าวถึงหลักการที่เกี่ยวข้องในการคำนวณปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย จากนั้นจะกล่าวถึงหลักการของ ANFIS ซึ่งนำไปสู่การนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming เพื่อทำการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และมีการนำเสนอดังวิธีการกำหนดตัวแปรขาเข้าให้กับ ANFIS เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป โดยเนื้อหาวิทยานิพนธ์แบ่งเป็นบทดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงแบบจำลองไฟฟ้าในระบบจำหน่าย และวิธีการคำนวณบนพื้นฐานของการทำโหลดโพลว์

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของทฤษฎีฟัซซีเซตซึ่งจะกล่าวถึงบ่งบอกลักษณะจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรวมถึงการอนุมานแบบฟัซซี โดยรวบรวมหลักการเท่าที่จำเป็นเพื่อนำไปสู่ความเข้าใจเกี่ยวกับ ANFIS ต่อไป

บทที่ 4 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของ ANFIS โดยอธิบายเกี่ยวกับระบบอนุมานภายใน ANFIS และหลักการในการฝึกสอน ANFIS ด้วยข้อมูลตัวอย่าง

บทที่ 5 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ ANFIS ร่วมกับเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming มาใช้ในการดำเนินการควบคุมการสวิตซ์ Capacitor ร่วมกับการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลง

บทที่ 6 กล่าวถึงการนำเสนอรูปแบบขาเข้าของ ANFIS เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการดำเนินการควบคุมการสวิตซ์ Capacitor ร่วมกับการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลง

บทที่ 7 แสดงการทดสอบการนำเสนอรูปแบบขาเข้าของ ANFIS ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้ประยุกต์ในการศึกษา และทดสอบการประยุกต์ใช้ ANFIS ที่ได้ ร่วมกับเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming ในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายจากการควบคุมการสวิตซ์ Capacitor ร่วมกับการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลง เปรียบเทียบกับการใช้รูปแบบที่เคยมีการนำเสนอมาก่อน โดยทดสอบด้วยระบบจำหน่ายทดสอบของประเทศไทย

บทที่ 8 เป็นข้อสรุปและข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์ โดยกล่าวถึงภาพรวมของวิทยานิพนธ์ทั้งหมด ตลอดจนอุปสรรคที่เกิดขึ้นในการทดสอบและข้อเสนอแนะ



คุรุณย์วิทยุฑยทรุฑยกร
จุฬาลงกรณัฒหาวุฑยาลัย

บทที่ 2

แบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่นิยมใช้มาก คือ การใช้ตัวเก็บประจุ ต่อขนานเข้ากับระบบ [23] เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ แทนการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ จากโรงไฟฟ้าหรือต้นสายป้อน ซึ่งการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น จะช่วยปรับปรุงระดับแรงดันของระบบให้สูงขึ้น ทำให้กระแสไฟฟ้ที่ไหลในสายป้อนลดลงและ กำลังไฟฟ้สูญเสียลดลงด้วย สำหรับการวิเคราะห์การดำเนินการในการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่ติดตั้งอยู่นั้น ควรพิจารณาเลือกสถานะการทำงานให้เหมาะสมกับระดับโหลดและปริมาณทางไฟฟ้ ในระบบจำหน่ายเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

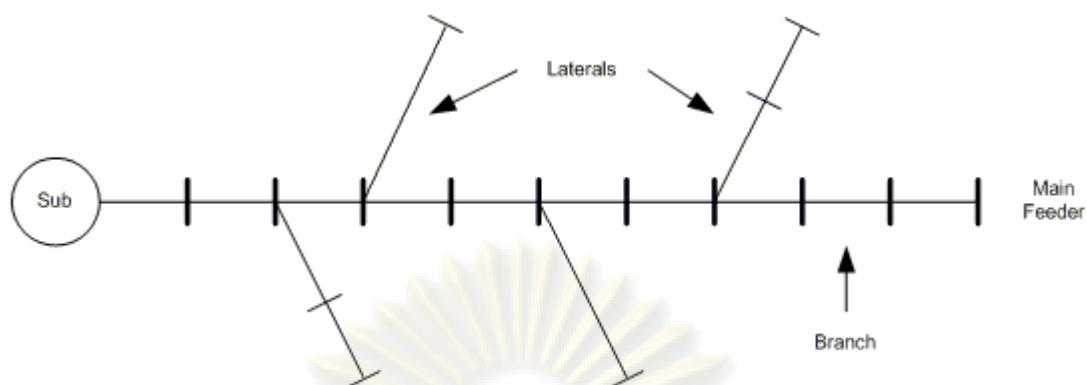
บทนี้จะอธิบายถึงแบบจำลองต่าง ๆ ในระบบจำหน่าย การวิเคราะห์การไหลของ กำลังไฟฟ้ ซึ่งจะนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้วิเคราะห์ปัญหาการดำเนินการของ ตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงและตัวเก็บประจุในระบบจำหน่าย สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้ที่ใช้ใน วิทยพนธ์ฉบับนี้จะเน้นไปที่ระบบจำหน่ายระดับแรงดัน 22 kV ซึ่งอยู่ในความดูแลของการไฟฟ้ ส่วนภูมิภาคและมีลักษณะเป็นเรเดียล

2.1 แบบจำลองส่วนต่าง ๆ ในระบบจำหน่าย

แบบจำลองของระบบจำหน่ายที่ใช้วิเคราะห์หาสถานะการทำงานของตำแหน่งแท็ป หม้อแปลงและตัวเก็บประจุ ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

2.1.1 รูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้

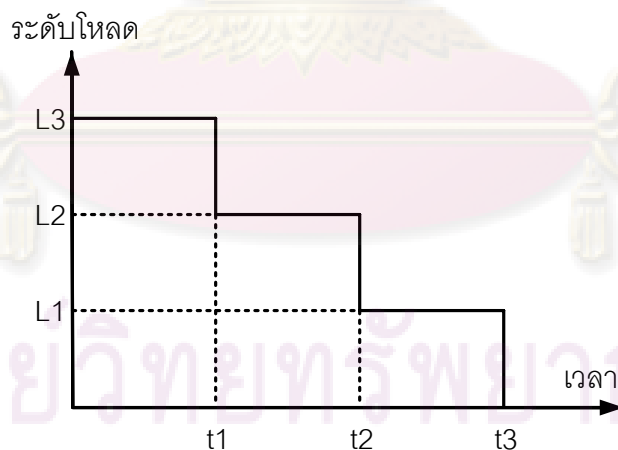
แบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้ที่ใช้วิเคราะห์เป็นแบบปกคิจะมีลักษณะเป็นสายป้อน แบบเรเดียล ประกอบด้วยสายป้อนป้อนหลัก (main feeder) และสายป้อนย่อยที่แยกออกจากสาย ป้อนหลัก (lateral) ซึ่งแต่ละส่วนจะประกอบด้วยกิ่งเป็นจำนวนมาก (branch) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

2.1.2 แบบจำลองโหลด

ลักษณะโหลดที่ใช้โดยทั่วไปนั้นจะเป็นแบบเส้นโค้งโหลดรายชั่วโมง (hourly load curve) หรือเส้นโค้งโหลดรายวัน (daily load curve) แต่ในการปฏิบัติงานในการวางแผนการดำเนินการของตำแหน่งแท่งหม้อแปลงและตัวเก็บประจุในระบบในแต่ละวัน จำเป็นจะต้องทราบถึงลักษณะโหลดเป็นรายชั่วโมง โดยทำการตัดแปลงเส้นโค้งช่วงเวลาโหลด (load duration curve) ให้ง่ายขึ้นเพื่อใช้เป็นแบบจำลองโหลดดังรูปที่ 2.2

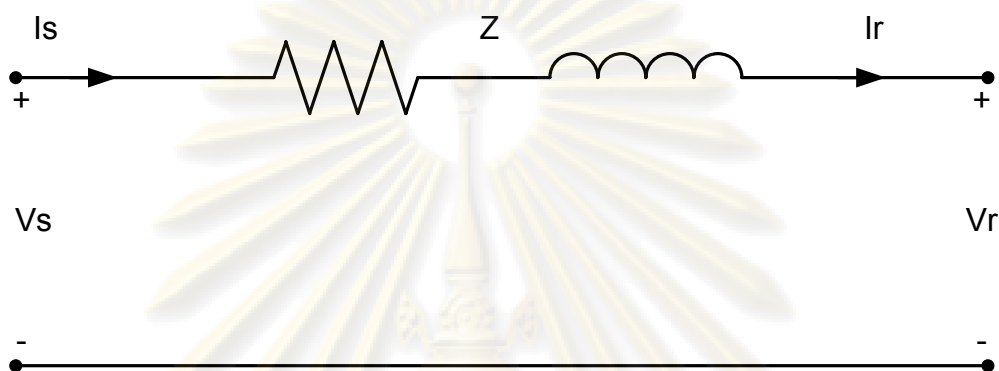


รูปที่ 2.2 ลักษณะเส้นโค้งช่วงเวลาโหลด

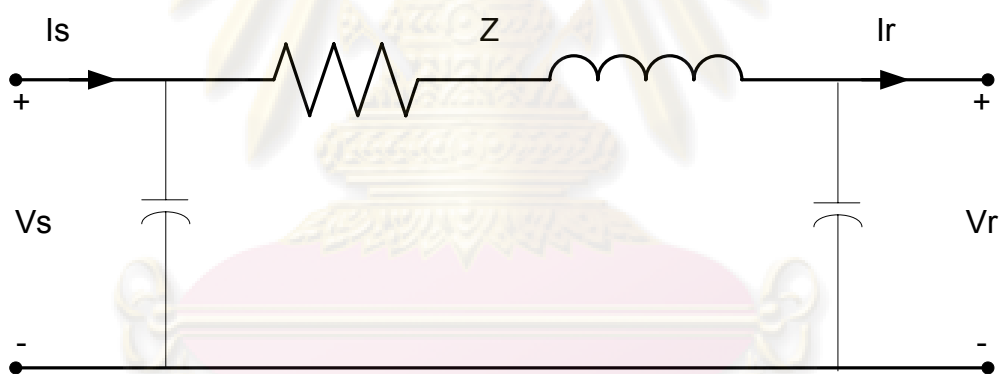
2.1.3 แบบจำลองสายป้อน

เนื่องจากสายป้อนของระบบจำหน่ายมักมีความยาวไม่เกิน 80 – 100 กิโลเมตร ดังนั้นแบบจำลองของสายป้อนจึงจุดอยู่ในประเภทของสายส่งระยะสั้น และในบางกรณีถ้าสายส่งมีความ

ยาวมากก็อาจจัดอยู่ในประเภทของสายส่งระยะปานกลางได้ คุณสมบัติของสายส่งระยะสั้นคือ ไม่มีการนำเอาค่าความจุไฟฟ้าที่มีอยู่ในสายส่งมาคิด เนื่องจากมีค่าน้อยมาก จะนำเอาค่าอิมพีแดนซ์มาคิดเท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงวงจรสมมูล ได้ดังรูป 2.3 สำหรับสายส่งระยะปานกลางจะมีการคำนึงถึงผลของความจุไฟฟ้าต่อขนานด้วย เพื่อความถูกต้อง โดยจะทำการแบ่งครึ่งความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมดของสายส่ง จากนั้นคิดเสมือนต่อความจุไฟฟ้าไว้ที่ปลายแต่ละด้านของสายส่ง วงจรลักษณะนี้เรียกว่า วงจรแบบ π ดังแสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้น



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของสายส่งระยะปานกลาง

โดยที่ $Z = R + j\omega L$ หมายถึง อิมพีแดนซ์อนุกรมทั้งหมด

$Y = G + j\omega C$ หมายถึง อิมพีแดนซ์ต่อขนานทั้งหมด

V_S หมายถึง แรงดันไฟฟ้าด้านต้นสาย

I_S หมายถึง กระแสไฟฟ้าด้านต้นสาย

V_R หมายถึง แรงดันไฟฟ้าด้านปลายสาย

I_R หมายถึง กระแสไฟฟ้าด้านปลายสาย

2.1.4 แบบจำลองตัวเก็บประจุ

ในการวิเคราะห์การทำงานของตัวเก็บประจุนั้น ผลที่ได้จากการคำนวณจะมีความแม่นยำมากขึ้นเพียงใดขึ้นอยู่กับแบบจำลองของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการคำนวณ เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อขนาดแรงดันที่บัสต่าง ๆ และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ทั้งนี้ค่าต่าง ๆ เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขของระบบ

สำหรับงานวิจัยในอดีต ได้ทำการจำลองตัวเก็บประจุเป็นแบบค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ คือเมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าไปที่บัสใดแล้ว ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดที่บัสนั้นจะลดลงในปริมาณที่เท่ากับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตัวเก็บประจุทำการชดเชยให้ ข้อดีของวิธีนี้คือ การวิเคราะห์หาคำตอบทำได้ง่าย แต่ข้อเสียที่สำคัญคือผลที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงไปบ้าง เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จะจ่ายเข้าระบบของตัวเก็บประจุจะแปรผันตามขนาดแรงดันของบัสที่ติดตั้งยกกำลังสอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองของตัวเก็บประจุเป็นแบบค่าแอดมิตแตนซ์คงที่ ซึ่งเมื่อทำการสวิตซ์ตัวเก็บประจุเข้าในระบบแล้ว จะคิดผลของตัวเก็บประจุโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าแอดมิตแตนซ์บัสของระบบ

$$Y_{ii}^{new} = Y_{ii}^{old} + Y_{shunt} \quad (2.1)$$

ซึ่งค่า Y_{shunt} สามารถหาได้จาก

$$Y_{shunt} = (Q_C / S_{Base}) \times j \quad (2.2)$$

โดยที่ $Y_{ii}^{new}, Y_{ii}^{old}$ คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์บัส i ที่ติดตั้งตัวเก็บประจุก่อนและหลังทำการสวิตซ์

Y_{shunt} คือ แอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

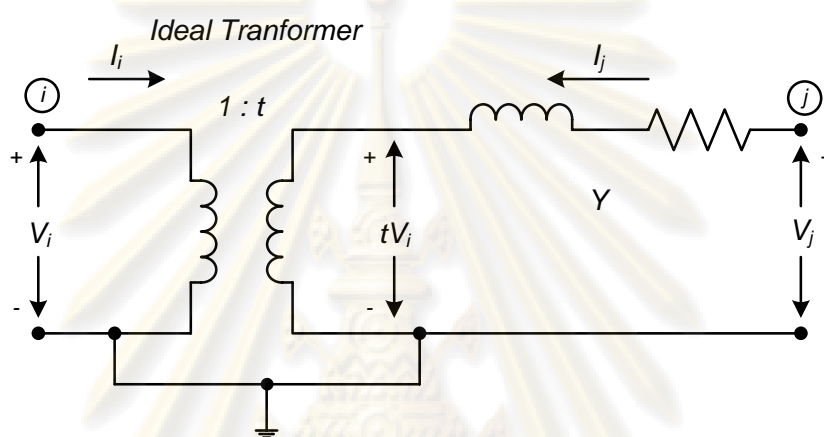
Q_C คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ

S_{Base} คือ กำลังไฟฟ้าฐานของระบบ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.5 แบบจำลองการปรับแก้หม้อแปลง

การปรับแก้หม้อแปลงสามารถใช้ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบไฟฟ้ากำลังใด ๆ ดังนั้นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจึงต้องทำการพิจารณาผลของตัวแปรจากหม้อแปลงรวมเข้าไปด้วย และทำการปรับปรุงค่า Bus Admittance หรือ Y-Bus ใหม่



รูปที่ 2.5 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีหม้อแปลงที่มีการปรับแก้ได้ติดตั้งอยู่

จากรูป 2.5 แสดงถึงวงจรของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีหม้อแปลงที่มีการปรับแก้ได้ติดตั้งอยู่ระหว่าง Node i และ Node j ซึ่งค่า Y-Bus ใหม่ ที่ทำการปรับปรุงใหม่จะอ้างอิงทางฝั่ง Node j ซึ่งเป็นฝั่งที่ทำการเปลี่ยนแก้หม้อแปลงในอัตราส่วน $1:t$ โดยจะพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่หม้อแปลงใน (2.3)

$$S_i = V_i I_i^* \quad S_j = t V_i I_j^* \quad (2.3)$$

สมมติให้หม้อแปลงเป็นหม้อแปลงในอุดมคติ กำลังไฟฟ้าขาเข้าจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าขาออก ดังนั้นจาก (2.3) ทำการสรุปสมการใหม่ได้

$$I_i = -t^* I_j \quad (2.4)$$

และได้ค่า I_j ดัง (2.5)

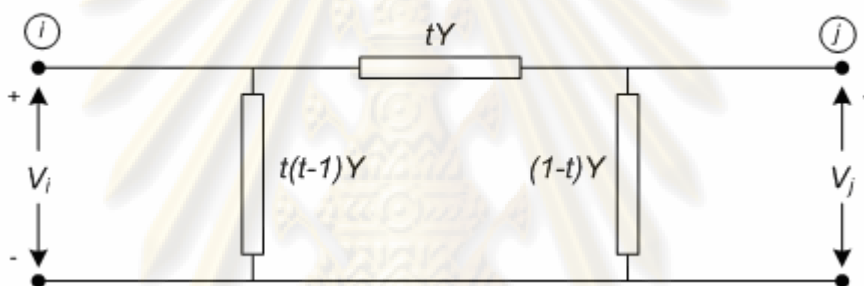
$$I_j = (V_j - tV_i)Y = -tYV_i + YV_j \quad (2.5)$$

ทำการคูณ (2.5) ด้วย $-t^*$ และแทนค่า I_i ลงใน $-t^*I_j$ จะได้

$$I_i = tt^*YV_i - t^*YV_j \quad (2.6)$$

กำหนดให้ $tt^* = |t|^2$ และจัดรูป (2.5) และ (2.6) ใหม่จะได้รูปแบบของ Y-Bus ดัง (2.7)

$$\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |t|^2 Y & -t^* Y \\ -t Y & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.6 วงจรระบบไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงปรับแก้ที่ได้ติดตั้งอยู่จาก (2.7)

จาก (2.7) จะเห็นว่า Bus Admittance ของระบบจะไม่สมมาตรกัน ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุของการเลื่อนเฟสจากหม้อแปลง

2.2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีของนิวตัน – ราฟสัน

การศึกษากการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นเป็นหัวใจของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง การคำนวณค่าตัวแปรจากปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นประกอบด้วย การหาค่าตอบของขนาดและมุมเฟสของแรงดันประจำบัสต่าง ๆ และ กำลังไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละสาย ในการเริ่มต้นวิเคราะห์ปัญหานั้นจะพิจารณาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น ข้อมูลประจำสายส่งในแต่ละเส้น ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ค่าพิกัดของตัวเก็บประจุต่อขนาน และการตั้งค่าแก้ของหม้อแปลง เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จะนำมาคำนวณค่าสมาชิกต่าง ๆ ของ Bus Admittance Matrix ซึ่งสามารถเขียนค่าสมาชิกเหล่านี้ในรูปแบบทั่วไปได้ดัง (2.8)

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} \quad (2.8)$$

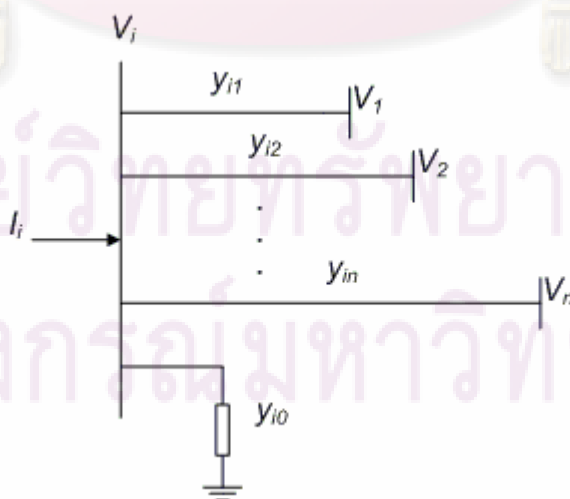
และสามารถเขียนค่าแรงดันที่บัส i ใด ๆ ในรูปพิกัดเชิงขั้วได้ดัง (2.9)

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| \cos \delta_i + j |V_i| \sin \delta_i \quad (2.9)$$

สมการในรูปพิกัดเชิงขั้วนี้จะใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับบัสที่ i ใด ๆ จะให้ความสนใจกับตัวแปรที่สำคัญ 4 ค่า คือ กำลังไฟฟ้าจริง (P_i), กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q_i), มุมของแรงดันไฟฟ้า (δ_i) และขนาดของแรงดันไฟฟ้า ($|V_i|$) ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้านั้นจะจำแนกบัสออกเป็น 3 ประเภท คือ

- 1.) Slack bus หรือบัสอ้างอิง ถูกนำมาใช้เป็นบัสอ้างอิง โดยจะต้องมีการกำหนดขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า
- 2.) Load bus มักเป็นบัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ บัสเหล่านี้จะมีการกำหนดค่า P และ Q ทำให้บางครั้งอาจเรียกเป็น $P-Q$ บัส
- 3.) Voltage control bus บัสประเภทนี้มักมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่และทำการควบคุมแรงดันบัสให้คงที่ บัสเหล่านี้จะบอกค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าและค่ากำลังจริงที่จะจ่ายเข้าสู่ระบบ

ลองพิจารณาบัสต่าง ๆ ของระบบดังรูปที่ 2.7 โดยแทนสายส่งด้วยวงจรแบบ π ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายได้ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปค่าแอดมิตแตนซ์ในหน่วยเปอร์ยูนิต



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับลักษณะบัสทั่วไปในระบบไฟฟ้ากำลังดังแสดงในรูปที่ 2.7 นั้นสามารถจัดได้ในรูปของเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ได้ดังนี้

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.10)$$

หากเขียนสมการดังกล่าวในพิกัดเชิงขั้วจะได้

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.11)$$

กำลังเชิงซ้อนที่บัส i คือ

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.12)$$

เมื่อแทน (2.11) ใน (2.12) จะได้

$$P_i - jQ_i = (|V_i| \angle -\delta_i) \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.13)$$

เมื่อทำการแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพจะได้ว่า

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.14)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.15)$$

หากทำการเขียน (2.14) และ (2.15) ใหม่โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์รอบ ๆ ค่าเริ่มต้นและ
 เลขพจน์ที่อันดับสูงกว่าสองจะได้ชุดสมการเชิงเส้นใหม่ดังนี้

ศูนย์วิทยุโทรพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

ทั้งนี้ชุดสมการข้างสมการข้างต้นสมมติให้บัส 1 เป็นบัสอ้างอิง ค่าสมาชิกต่างๆ ในเมตริกซ์จาโคเบียนต่างเป็นอนุพันธ์บางส่วนของ (2.14) และ (2.15) ที่ประมาณค่า ณ $\Delta \delta_i^{(k)}$ และ $\Delta |V_i^{(k)}|$ ตามลำดับ สำหรับบัสควบคุมแรงดันนั้นเราทราบค่าขนาดของแรงดัน ดังนั้น หากมีบัสควบคุมแรงดันอยู่จำนวน m บัส จะพบว่ามีสมการที่เกี่ยวข้องกับ ΔQ_i และ $\Delta |V_i|$ จำนวน N_g สมการประจำแถวและคอลัมน์ที่สัมพันธ์กันในเมตริกซ์จาโคเบียนถูกตัดออกจากการพิจารณา ดังนั้นจึงมีสมการทั้งหมดที่ประกอบด้วย สมการกำลังไฟฟ้าจริง $N-1$ และสมการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ $N-1-N_g$ ดังนั้นจาโคเบียนเมตริกซ์จึงมีขนาด $(2N-2-N_g) \times (2N-2-N_g)$

พจน์ $\Delta P_i^{(k)}$ และ $\Delta Q_i^{(k)}$ ในเมตริกซ์นั้น คือค่าผลต่างระหว่างค่ากำหนด (Scheduled) และค่าที่คำนวณ (Calculate) ได้จาก (2.17) และ (2.18)

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2.17)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2.18)$$

โดยที่ P_i^{sch} และ Q_i^{sch} คือค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสโหลด i ใด ๆ ในตอนเริ่มต้น ส่วนค่ามุมและขนาดแรงดันใหม่ในการคำนวณแต่ละรอบคือ

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.19)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + |\Delta V_i^{(k)}| \quad (2.20)$$

2.3 สรุป

จากแบบจำลองส่วนต่าง ๆ ในระบบจำหน่ายจะเห็นว่ารูปแบบการจ่ายไฟจะมีลักษณะเป็นสายป้อนแบบเรเดียล โดยใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองสายป้อน

ตามแต่ความเหมาะสมของระยะทางของสายส่ง โดยทั่วไปแล้วในระบบจำหน่ายจะใช้วงจรสมมูลของสายส่งระยะปานกลางมาทำการวิเคราะห์ โดยผลของการสวิตชิงตัวเก็บประจุที่ใช้ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟนั้นจะวิเคราะห์ในแบบค่าแอดมิตแตนซ์คงที่ ซึ่งในการศึกษาในการวิเคราะห์หาสถานะการทำงานของตำแหน่งที่ป้อนมือแปลงและตัวเก็บประจุเพื่อใช้ในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายนี้ จะใช้การวิเคราะห์จากระดับโหลดในลักษณะเส้นโค้งช่วงเวลาโหลด (load duration curve)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีฟัซซีเซต

3.1 แนวคิดและลักษณะเบื้องต้นของฟัซซีเซต

แนวคิดเกี่ยวกับทฤษฎีฟัซซีเซตได้รับการเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในปี 1965 โดย “Zadeh” [25] คุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นของทฤษฎีฟัซซีเซต คือใช้เป็นแนวทางอธิบายถึงความคลุมเคลือ คำอธิบายในเชิงภาษา หรือความไม่ชัดเจนของข้อมูล โดยแสดงออกมาในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ โดยที่หลักการพื้นฐานของทฤษฎีฟัซซีเซตจะเป็นรูปแบบหนึ่งของความไม่แน่นอน เป็นความคลุมเคลือที่พบในคำจำกัดความของแนวคิดหรือความหมายของคำพูด ซึ่งจะแสดงในรูปของค่าความเป็นสมาชิก (membership) ที่แสดงถึงความคล้ายกันของวัตถุต่าง ๆ ที่ไม่สามารถระบุคุณสมบัติได้อย่างชัดเจน โดยค่าความเป็นสมาชิกนั้นจะได้อาจมาจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) ที่กำหนดขึ้น

3.2 ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy set theory)

เซตตามความหมายดั้งเดิม (classical crisp set) คือการจัดการกลุ่มของวัตถุ (object) ที่มีลักษณะเหมือนกันหรือสอดคล้องกันตามความนิยามของเซตนั้นนำมาไว้รวมเป็นกลุ่มเดียวกัน การกำหนดนิยามของเซตจะเป็นไปในแนวทางเพื่อแยกกลุ่มวัตถุต่าง ๆ ในขอบเขตทั้งหมดที่เราสนใจ หรือเอกภพสัมพัทธ์ (universe of discourse) ออกเป็นสองกลุ่ม คือ เป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิก ลักษณะของเซตในการแบ่งแยกการเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิกของเซตจะถูกกำหนดไว้อย่างแน่นอน (crisp) และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทันที ณ ตรงเส้นแบ่งขอบเขตนั้น

เราสามารถนิยามเซตตามความหมายดั้งเดิม (crisp set) โดยการกำหนดฟังก์ชันที่ระบุถึงคุณสมบัติหรือลักษณะเฉพาะของเซตนั้น (characteristic function) ถ้ากำหนดให้ U คือขอบเขตทั้งหมดที่เราสนใจหรือเอกภพสัมพัทธ์ ฟังก์ชันคุณสมบัติของเซต A (Crisp set) ใน U ($\mu_A(x)$) จะมีค่าเป็น 0 หรือ 1 นั่นคือ

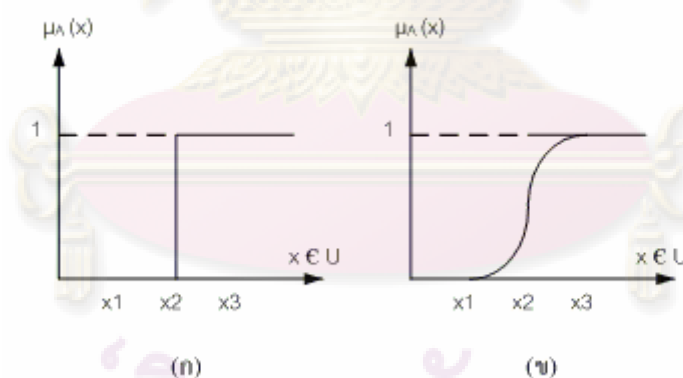
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & , x \in A \\ 0 & , x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

สังเกตว่าตรงจุดขอบเขตของเซต A จะมีลักษณะคมและแบ่งแยกกลุ่มของ x ออกเป็นสองกลุ่มอย่างเห็นได้ชัด นั่นคือ $x \in A$ หรือ $x \notin A$

ฟัซซีเซต (Fuzzy Set) จะมีลักษณะต่างจากเซตดั้งเดิมตรงที่ได้ขยายหลักการพื้นฐานของเซตดั้งเดิมออกไป และแสดงออกในรูปแบบทั่วไปยิ่งขึ้น (generalization) โดยฟัซซีเซตจะแสดงลักษณะของความคลุมเครือไม่ชัดเจน โดยการกำจัดขอบเขตในการแบ่งความเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิกอย่างชัดเจนตามหลักการของเซตดั้งเดิมออกไป และกำหนดค่าของความเป็นสมาชิกค่อย ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นจากความไม่เป็นสมาชิกเลยไปถึงระดับที่มีความเป็นสมาชิกเต็มที่ หรือในทางกลับกัน ค่าค่อย ๆ ลดลงจากระดับที่มีความเป็นสมาชิกเต็มที่ไปจนถึงระดับที่ไม่มีความเป็นสมาชิกเลย ซึ่งโดยปกติทั่วไปจะกำหนดให้ค่าของความเป็นสมาชิกมีค่าจาก 0 ถึง 1

ฟัซซีเซต \tilde{A} (ใช้สัญลักษณ์ \sim แสดงถึงฟัซซีเซต) ในเอกภพสัมพัทธ์ U สามารถแสดงได้ในลักษณะของเซตของคู่อันดับ คือ

$$\tilde{A} = \left\{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in U \right\} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.1 การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะของเซตแบบดั้งเดิม (crisp set) และฟัซซีเซต

ตัวอย่างที่ 3.1 กำหนดให้ U เป็นเอกภพสัมพัทธ์บนเส้นจำนวนจริง R และเซต (crisp) A เป็นเซตของ “จำนวนจริงที่มากกว่าหรือเท่ากับ 5” จะได้ว่า

$$A = \left\{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in U \right\}$$

ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก)

ถ้าให้ฟัซซีเซต \tilde{A} เป็นเซตของ “จำนวนที่ใกล้เคียง 5” ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก) ถ้าให้ฟัซซีเซต \tilde{A} เป็นเซตของ “จำนวนที่ใกล้เคียง 5” จะได้ว่า

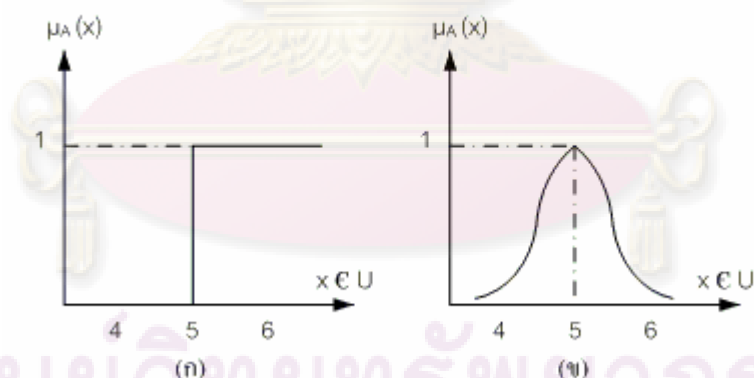
$$\tilde{A} = \left\{ \left(x, \mu_{\tilde{A}}(x) \right) \mid x \in U \right\}$$

โดยในกรณีนี้กำหนดให้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function, MF) คือ

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{1}{1 + 10(x - 5)^2}$$

ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข) ซึ่งการกำหนดลักษณะของฟังก์ชันที่เป็นสมาชิกของ \tilde{A} สามารถเลือกใช้หรือกำหนดฟังก์ชันได้หลายรูปแบบ โดยขึ้นอยู่กับตัวผู้กำหนดเอง (subjective)ว่าจะกำหนดให้มีลักษณะเป็นแบบใด

ในการกำหนดลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนั้น จะขึ้นอยู่กับการพิจารณาว่าลักษณะของฟังก์ชันใดที่จะเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้อธิบายและจัดลำดับองค์ประกอบหรือวัตถุต่าง ๆ (x) ใน \tilde{A} เพื่อให้สอดคล้องกับคำนิยามของฟัซซีเซต \tilde{A} นั้น ๆ



รูปที่ 3.2 ลักษณะของเซตแบบดั้งเดิม (crisp set) และฟัซซีเซตตามตัวอย่างที่ 3.1

3.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและค่าตัวแปรต่าง ๆ

จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่าฟัซซีเซตจะถูกกำหนดลักษณะจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเพื่อความสะดวกในการประยุกต์ใช้งานฟัซซี จึงนิยมแสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในรูปแบบสูตร

ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะกำหนดโดยค่าตัวแปรต่าง ๆ โดยมีตัวอย่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีดังนี้

3.3.1 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular MF)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมจะถูกกำหนดลักษณะโดยพารามิเตอร์ $\{a, b, c\}$ ดัง (3.3)

$$\text{Triangle}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c - x}{c - b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (3.3)$$

โดยที่ $a < b < c$

3.3.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoid MF)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมูจะถูกกำหนดลักษณะโดยพารามิเตอร์ $\{a, b, c, d\}$ ดัง (3.4)

$$\text{Trapezoid}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d - x}{d - c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (3.4)$$

โดยที่ $a < b < c < d$

จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมูจะลดรูปเป็นแบบสามเหลี่ยมได้ในกรณีที่ b เท่ากับ c

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทั้งสองแบบที่กล่าวมา จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงต่อเป็นส่วน ๆ ซึ่งมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ในส่วนถัดไปจะนำเสนอตัวอย่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบไม่ป็นเชิงเส้น ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งราบเรียบ และใช้บ่งบอกระดับที่มีความเป็นสมาชิกได้ดียิ่งขึ้นในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังต่อไปนี้

3.3.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน (Gaussian MF)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียนจะถูกกำหนดลักษณะโดยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ $\{c, \sigma\}$ โดยมีลักษณะฟังก์ชันดัง (3.5)

$$Gaussian(x; c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (3.5)$$

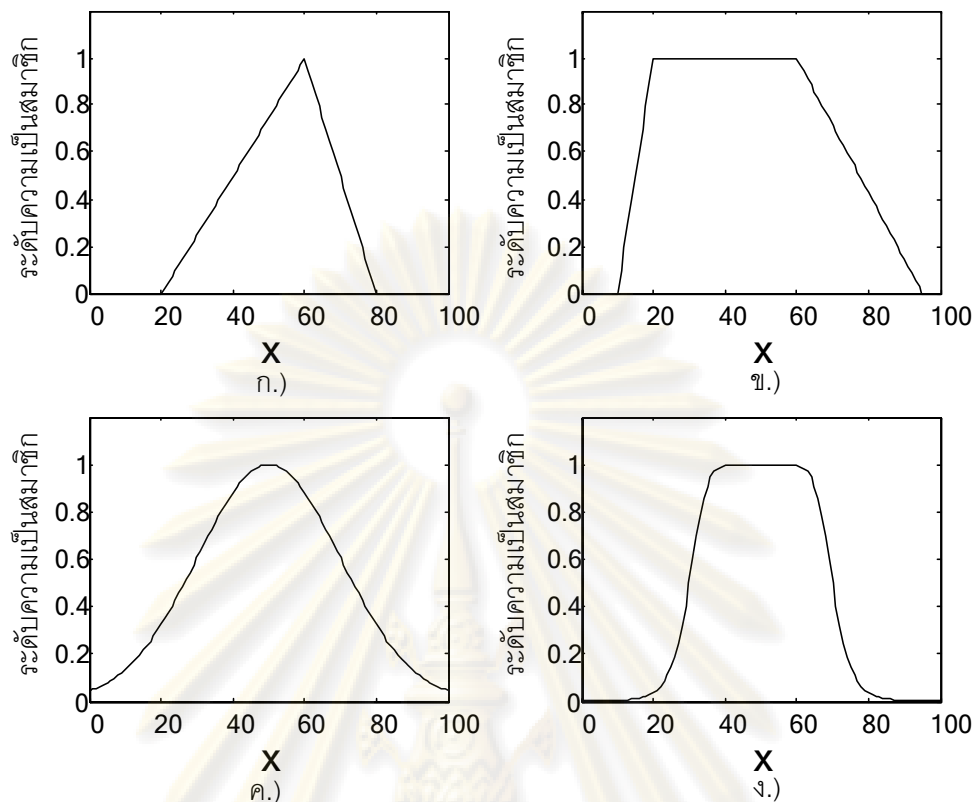
3.3.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูประฆัง (Generalized bell MF)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูประฆังจะถูกกำหนดลักษณะโดยพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ $\{a, b, c\}$ โดยมีลักษณะฟังก์ชันดัง (3.6)

$$Bell(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (3.6)$$

จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแต่ละแบบก็จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งการกำหนดลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในการศึกษาในแต่ละกรณีนั้น จะขึ้นอยู่กับ การพิจารณาว่าลักษณะของฟังก์ชันใดที่จะเหมาะสมที่สุด ซึ่งฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้จะถูกนำมา ไปใช้ในการสร้างระบบอนุมานฟัซซีที่จะใช้กล่าวในบทต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบต่างๆ

3.4 ตรรกศาสตร์แบบฟัซซี (Fuzzy Logic)

ตรรกศาสตร์เป็นการศึกษากระบวนการหลักหารโดยใช้เหตุผล โดยตรรกศาสตร์แบบดั้งเดิมนั้นจะแบ่งนิพจน์ออกเป็นสองลักษณะ คือ จริง จะมีค่าความจริงเป็น 1 หรือ เท็จ จะมีค่าความจริงเป็น 0 เท่านั้น แต่ตรรกศาสตร์แบบฟัซซีนั้นจะมีการพิจารณาค่าความจริงระหว่าง 0 หรือ 1 ด้วย ดังนั้นการพิจารณาค่าความจริงแบบฟัซซีนั้นจะมีความซับซ้อนกว่าตรรกศาสตร์แบบดั้งเดิมจึงต้องอาศัยการประมาณหรือการอนุมานด้วยเหตุผลแบบฟัซซี (Fuzzy Inference System) ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

3.4.1 การอนุมานแบบฟัซซี (Fuzzy Inference system)

ในการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ทางด้านไฟฟ้ากำลังนั้น มีหลายวิธีที่แสดงกระบวนการใช้เหตุผลของมนุษย์ วิธีที่ง่ายที่สุดคือแสดงให้อยู่ในรูปของตัวแปรทางภาษา (Linguistic Variables) [26] เช่น

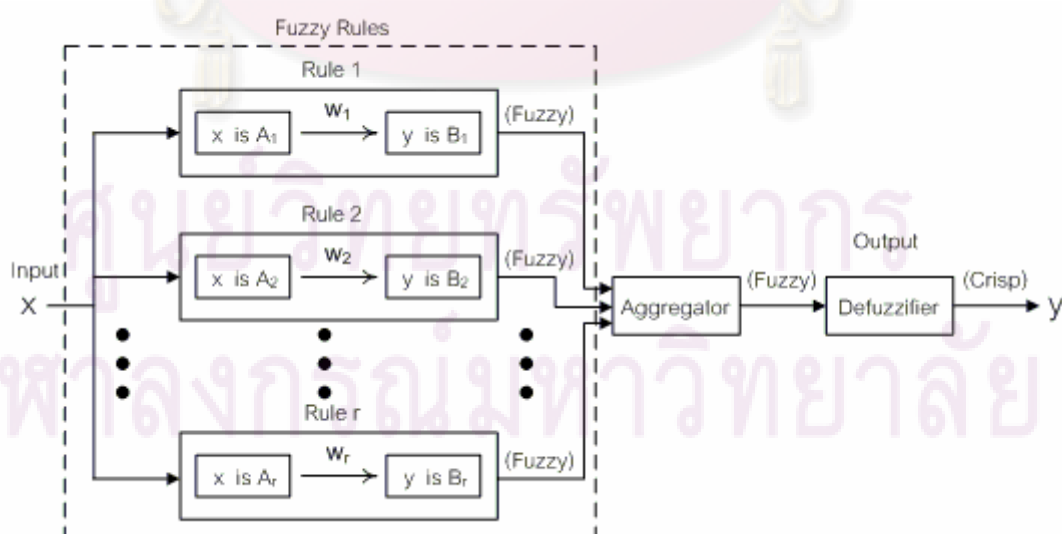
If (ส่วนเงื่อนไข) *Then* (ส่วนผล)

ข้อความที่แสดงนั้นคือรูปแบบของกระบวนการ ถ้า...แล้ว... (If-Then) คือ ถ้ารู้ข้อมูลหรือข้อเท็จจริงบางอย่างแล้วจะสามารถสรุปผลได้ เป็นการพิจารณาเหตุผลโดยใช้การอนุมานแบบฟัซซี ซึ่งการอนุมานฟัซซีจะมีประโยชน์อย่างมากในการจำลองระบบที่เกี่ยวกับการสังเกตของมนุษย์ เนื่องจากว่าความรู้พื้นฐานจากการสังเกตของมนุษย์นั้นจะอยู่ในรูปของสัญลักษณ์ทางภาษา และตัวแปรทางภาษานี้สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของฟัซซีเซตและตรรกศาสตร์แบบฟัซซีได้ โดยส่วนใหญ่การอนุมานฟัซซีจะมีกฎเกณฑ์ (rule) มากกว่าหนึ่งกฎเกณฑ์ทำให้อาจต้องมีการรวมแต่ละกฎเข้าด้วยกัน ซึ่งแต่ละกฎของฟัซซีเป็นการหาข้อสรุปโดยส่งขาเข้าซึ่งเป็นตัวแปรภาษาผ่านตรรกะเหตุผลซึ่งอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\text{if } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B, \quad (3.7)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าภาษา (Linguistic Value) ซึ่งอยู่ในฟัซซีเซตที่มียูนิเวิร์ส X และ Y ตามลำดับ โดยเรียกประโยค “ x is A ” ว่าพรีมิส (premise) และเรียกประโยค “ y is B ” ว่าคอนซีควนท์ (consequent) โดยส่วนใหญ่การอนุมานฟัซซีจะมีกฎเกณฑ์ (rule) มากกว่าหนึ่งกฎเกณฑ์ทำให้อาจต้องมีการรวมแต่ละกฎเข้าด้วยกัน ดังนั้นกระบวนการพิจารณาหาผลสรุปโดยรวมจะพิจารณาจากผลสรุป (consequent) จากแต่ละกฎที่สร้างขึ้น

3.4.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์โดยใช้การอนุมานแบบฟัซซี

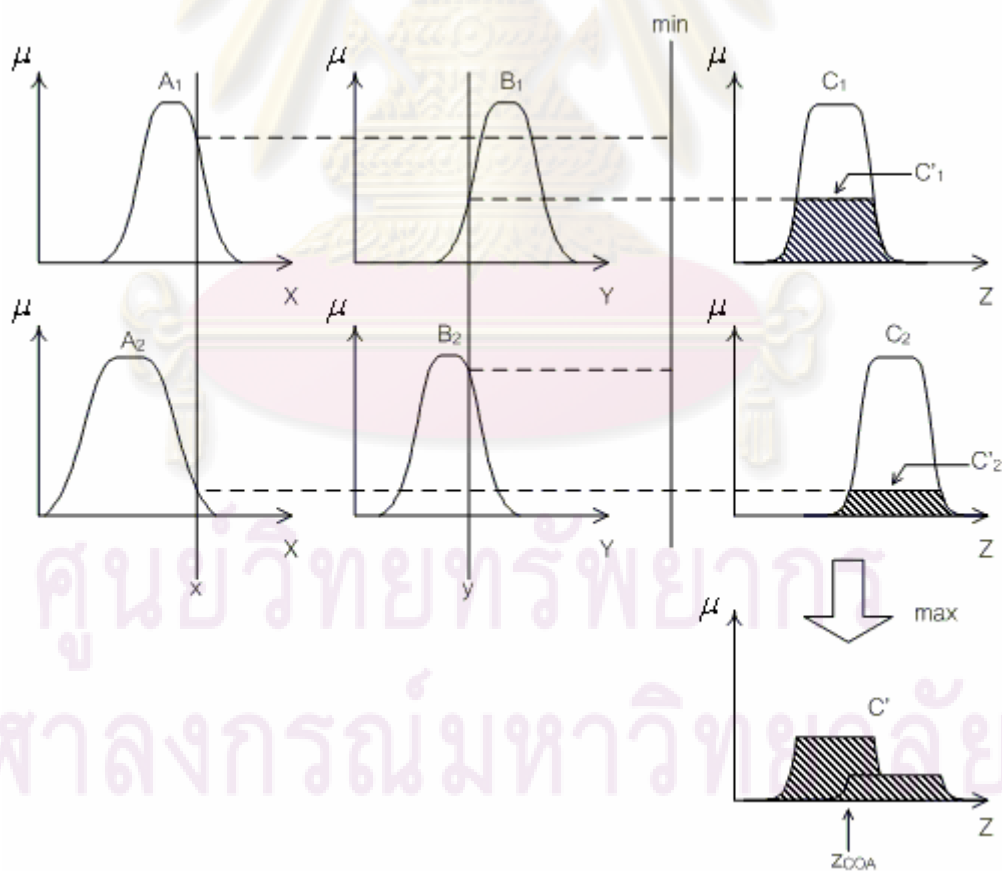


รูปที่ 3.4 โครงสร้างการทำงานของระบบอนุมานแบบฟัซซี

จากรูปที่ 3.4 แสดงถึงโครงสร้างการทำงานของระบบอนุมานแบบฟัซซี โดยมีข้อมูลขาเข้า ซึ่งอาจจะเป็นค่าดั้งเดิม (crisp) หรือเป็นค่าฟัซซีก็ได้ โดยค่าที่รับเข้ามาจะผ่านการแปลงโดยใช้กฎของฟัซซีและส่งข้อมูลออกมาเป็นค่าฟัซซีเสมอ ในการประยุกต์ใช้งานหากต้องการให้ข้อมูลขาออกมีค่าออกมาเป็นค่าดั้งเดิมจะต้องมีการแปลงกลับฟัซซี (defuzzification) ในส่วนของข้อมูลขาออกให้กลับเป็นค่าดั้งเดิม โดยใช้การแปลงกลับฟัซซีซึ่งมีอยู่หลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้คือการแปลงกลับฟัซซีแบบจุดศูนย์กลางร่วมของพื้นที่ (centroid of Area) ซึ่งหาได้ดังนี้

$$z_{COA} = \frac{\int_Z \mu(z)zdz}{\int_Z \mu(z)dz} \quad (3.8)$$

สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้การอนุมานแบบฟัซซี (Fuzzy Inference System) ที่นิยมมีอยู่หลายวิธี ในส่วนนี้จะกล่าวถึงแค่ 2 วิธี คือ ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani และระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.5 ผลประกอบการ Max-Min ในระบบอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani

1) ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani

ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani [27] ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี 1974 การประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการไดนามิก ซึ่งมีรูปแบบเป็นประพจน์ฟัซซีทั้งในส่วนเงื่อนไข และส่วนผลของกฎ โดยทั่วไปแล้วตัวดำเนินการที่นิยมใช้เป็นตัวเชื่อมการร่วมกันและการแจกเหตุผลที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ตัวดำเนินการ *Min* และการใช้ตัวดำเนินการ *Max* สำหรับรวมกลุ่มกฎต่าง ๆ ในฐานกฎ ซึ่งเป็นการประมาณด้วยผลประกอบการ *Max-Min* ดังแสดงให้เห็นจากรูปที่ 3.5 โดยจากรูปจะเป็นระบบอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani ที่มีตัวแปรขาเข้า 2 ตัวคือ x และ y ซึ่งข้อมูลขาเข้าแต่ละตัวประกอบด้วยฟัซซีเซต 2 เซต ทำการอนุมานผ่านกฎจำนวน 2 กฎ และได้ข่าออกออกมาเป็นฟัซซีเซต C'

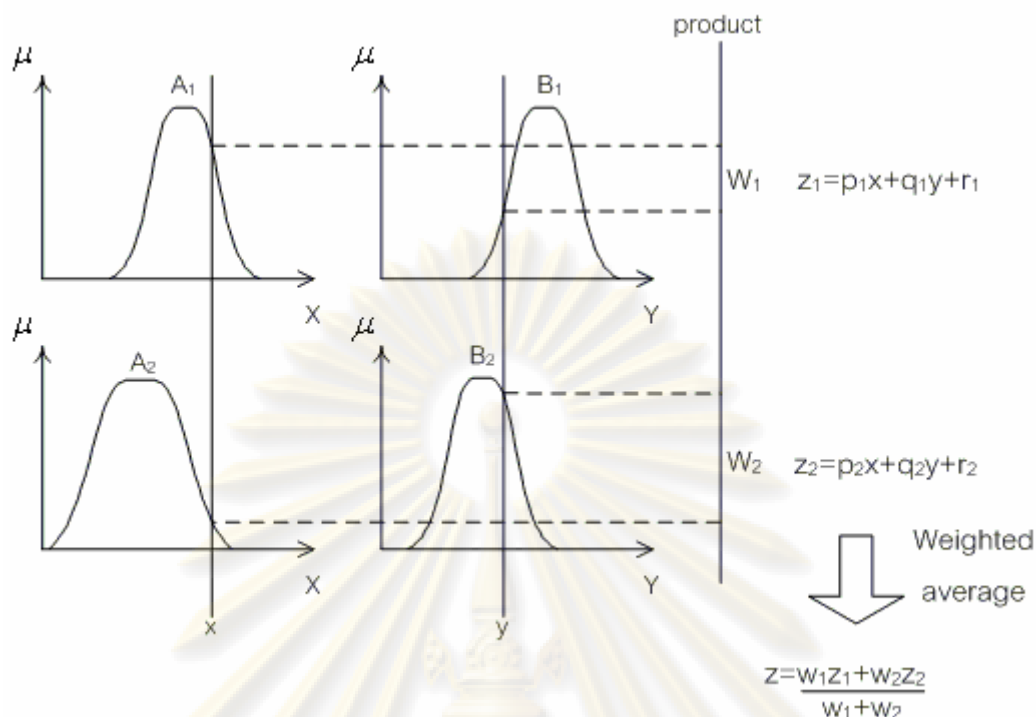
2) ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno

ระบบอนุมานฟัซซีชนิดนี้ถูกนำเสนอโดย Sugeno, Takagi และ Kang [28, 29] โดยมีส่วนเงื่อนไขของกฎเหมือนกับแบบจำลองแมมดानी ส่วนผลของกฎฟัซซีแสดงด้วยฟังก์ชัน f ของตัวแปรขาเข้า โดยมีรูปแบบดังนี้

$$\text{if } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = f(x, y), \quad (3.9)$$

โดยให้ A และ B เป็นฟัซซีเซตในส่วนของพรีมิส ในขณะที่ส่วนของคอนซีควเอนท์มี $z = f(x, y)$ เป็นฟังก์ชันของค่าดั้งเดิม โดย $f(x, y)$ เป็นสมการโพลิโนเมียลของตัวแปรขาเข้า x และ y โดยปกติแล้วฟังก์ชัน $f(x, y)$ มักนิยมแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น โดยค่าพารามิเตอร์ของส่วนผลสามารถหาได้โดยวิธีลีสท์สแควร์

ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno ซึ่งมีคอนซีควเอนท์เป็นสมการโพลิโนเมียลลำดับที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 ค่าตัวแปรขาเข้าเมื่อผ่านกฎแต่ละกฎจะให้ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าตัวแปรขาออกของกฎนั้น ๆ โดยข้อมูลขาออกของระบบอนุมานจะได้จากการนำค่าตัวแปรขาออกที่ได้จากกฎต่าง ๆ มาหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 3.6 ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno

ในบทถัดไปจะกล่าวถึงระบบอนุมานนิวโรฟัซซีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งได้จากการประยุกต์ใช้วิธีการเรียนรู้จากระบบนิเวศ (Artificial Neural Network) และใช้การกำหนดเงื่อนไขและกฎจากระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno เข้าด้วยกัน โดยมีรายละเอียดดังบทต่อไป

3.5 สรุป

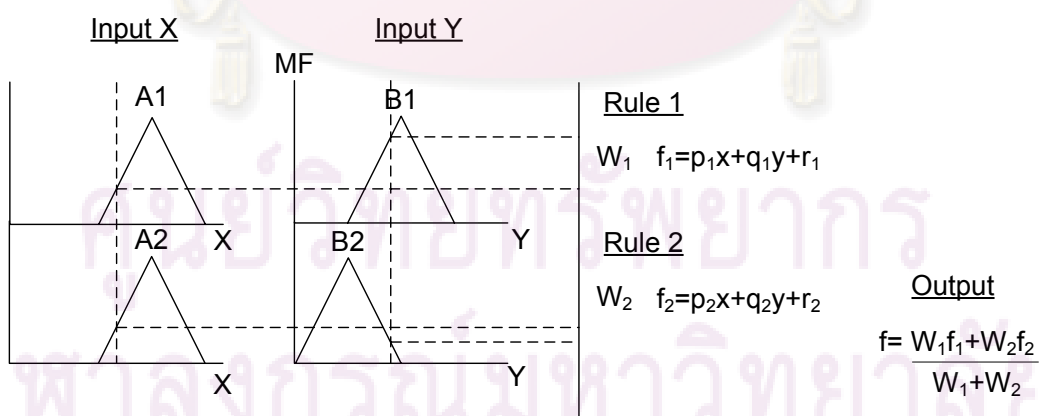
หลักการของฟัซซีเซตนั้นสามารถนำไปสร้างแบบจำลองระบบที่มีความซับซ้อนได้ดี โดยพิจารณาด้วยการกำหนดช่วงของค่าที่ต้องการจากตัวแปรภาษาที่ใช้อธิบายตามคำพูดของมนุษย์ และแบบจำลองที่สร้างขึ้นก็สามารถนำไปอนุมานหาข้อสรุปได้ ซึ่งระบบอนุมานนี้จะสามารถคำนวณหาข้อสรุปโดยไม่ต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนแต่อาศัยกฎของฟัซซีที่เลียนแบบตรรกะการใช้เหตุผล ซึ่งหลักการที่กล่าวมาในบทนี้จะเป็นพื้นฐานนำไปสู่การสร้างระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) ต่อไป

ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้

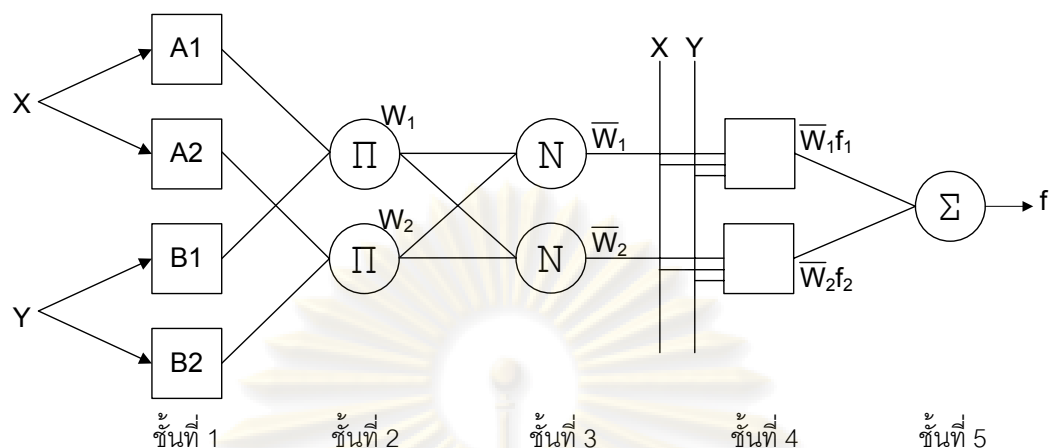
ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีหรือ ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) [30] เป็นระบบที่ได้จากการเลียนแบบการเรียนรู้ของระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) [31] มาใช้ระบบอนุมานฟัซซี (Fuzzy Inference System) โดยที่ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีจะทำการประมาณค่าข้อมูลขาออกจากการเรียนรู้จากชุดข้อมูลขาเข้า ซึ่งค่าขาออกที่ได้จะไม่ใช้ค่าคำตอบที่แท้จริง แต่จะสามารถใช้อนุมานค่าคำตอบได้ ซึ่งระบบจะสามารถสร้างแบบจำลองเฉพาะจากชุดข้อมูลที่มีอยู่ โดยจะมีจำนวนของระดับชั้นในโครงสร้างที่คงที่ไม่ซับซ้อนเหมือนระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) โดยความถูกต้องของค่าขาออกจะขึ้นอยู่กับจำนวนชุดข้อมูลและจำนวนรอบที่ใช้ฝึกสอนระบบรวมถึงจำนวนกฎที่ใช้ด้วย โดยมีโครงสร้างของระบบแสดงดังหัวข้อถัดไปดังนี้

4.1 โครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้

เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจจะสมมติให้ระบบอนุมานฟัซซีภายใต้การพิจารณา มีข้อมูลทางด้านขาเข้า 2 ตัวเป็น x และ y ส่วนข้อมูลขาออกเป็น z สำหรับระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno ลำดับที่ 1 ซึ่งมีกฎที่พิจารณาอยู่ 2 กฎดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno ที่มีจำนวนกฎ 2 กฎ



รูปที่ 4.2 ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (ANFIS)

Rule 1: If x is A_1 and y is B_1 , then $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$,

Rule 2: If x is A_2 and y is B_2 , then $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$.

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการทำงานของระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (ANFIS) โดยใช้การปรับปรุงแบบของระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno มาอยู่ในรูปของโครงข่ายปรับตัวได้ ซึ่งจะประกอบด้วยชั้นต่าง ๆ โดยรายละเอียดของโครงสร้างในแต่ละชั้นเป็นดังต่อไปนี้

ชั้นที่ 1 ทุก ๆ โหนดเป็นโหนดที่ปรับค่าตัวแปรในฟังก์ชันได้ โดยมีข้อมูลขาออกในชั้นนี้ดัง (4.1)

$$\begin{aligned} O_{1,i} &= \mu_{A_i}(x), \quad \text{for } i=1, 2, \text{ or} \\ O_{1,i} &= \mu_{B_i}(y), \quad \text{for } i=3, 4 \end{aligned} \quad (4.1)$$

โดย

$O_{1,i}$ คือ ขาออกของโหนดที่ i ในชั้นที่ 1

$\mu_{A_i}(x)$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขาเข้า x บนโหนดที่ i

$\mu_{B_i}(y)$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขาเข้า y บนโหนดที่ i

กำหนดให้ x (หรือ y) เป็นข้อมูลขาเข้าสู่โหนด i และ A_i (หรือ B_i) เป็นข้อมูลเชิงภาษาในโหนด i อธิบายง่าย ๆ ก็คือ ข้อมูลขาออก ($O_{1,i}$) ในชั้นนี้ เป็นระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซี

เซต A หรือ B ($=A_1, A_2, B_1$ หรือ B_2) ซึ่งถูกกำหนดโดยข้อมูลขาเข้า x (หรือ y) โดยที่ตัวแปรของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ A (หรือ B) จะสามารถปรับค่าได้ตามการเรียนรู้จากการฝึกสอน ยกตัวอย่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปประฆังดัง (4.2)

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b}}, \quad (4.2)$$

$\{a_i, b_i, c_i\}$ เป็นเซตของตัวแปรของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกใน (4.2) ซึ่งค่าตัวแปรดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดรูปร่างลักษณะของฟังก์ชัน โดยที่ตัวแปรดังกล่าวนี้เองที่จะมีการปรับค่าตามการเรียนรู้ ซึ่งเรียกตัวแปรดังกล่าวว่า “พรีมิส พารามิเตอร์” (premise parameter)

ขั้นที่ 2 ทุก ๆ โหนดในชั้นนี้เป็นโครงสร้างที่ตายตัว โดยมีข้อมูลขาออกมาจากผลคูณของสัญญาณขาเข้าทุกตัว ซึ่งมีจำนวนโหนดเท่ากับจำนวนกฎของฟัซซีที่ใช้ในระบบดัง (4.3)

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_n}(x)\mu_{B_n}(y) \quad ; \quad n = 1, 2 \quad ; \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.3)$$

โดย

$O_{2,i}$	คือ ขาออกของโหนดที่ i ในชั้นที่ 2
w_i	คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของโหนดที่ i
$\mu_{A_n}(x)$	คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขาเข้า x บนฟัซซีเซตที่ n
$\mu_{B_n}(y)$	คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขาเข้า y บนฟัซซีเซตที่ n

ในชั้นนี้ข้อมูลขาออกในแต่ละโหนดจะเป็นค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะเด่นของแต่ละกฎ

ขั้นที่ 3 ทุก ๆ โหนดในชั้นนี้เป็นโครงสร้างที่ตายตัวเช่นเดียวกับชั้นที่ 2 โดยที่แต่ละโหนดจะทำการคำนวณอัตราส่วนระหว่างค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละกฎ ที่โหนดนั้น ๆ กับผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด เป็นข้อมูลทางด้านขาออกดัง (4.4)

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2. \quad (4.4)$$

โดย

$O_{3,i}$	คือ ขาออกของโหนดที่ i ในชั้นที่ 3
W_i	คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของโหนดที่ i
\overline{W}_i	คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ผ่านการนอมัลไลซ์แล้ว

ชั้นที่ 4 ทุก ๆ โหนดในชั้นนี้เป็นโหนดที่ปรับค่าตัวแปรในฟังก์ชันได้ ซึ่งภายหลังจากผ่านการนอมัลไลซ์ค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นที่ 3 มาแล้ว ก็จะได้ข้อมูลขาออกในชั้นนี้เป็นดังสมการ (4.5) โดยมี $\{p_i, q_i, r_i\}$ เป็นเซตของตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ตามการเรียนรู้ ซึ่งเรียกตัวแปรดังกล่าวว่า “คอนซีควนท์ พารามิเตอร์” (consequent parameter)

$$O_{4,i} = \overline{w}_i f_i = \overline{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad (4.5)$$

โดย

$O_{4,i}$	คือ ขาออกของโหนดที่ i ในชั้นที่ 4
\overline{w}_i	คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ผ่านการนอมัลไลซ์แล้ว
f_i	คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณสมการโพลีโนเมียลในโหนดที่ i
p_i, q_i, r_i	คือ ค่าคอนซีควนท์พารามิเตอร์ในโหนดที่ i

ชั้นที่ 5 ในชั้นนี้จะป็นลักษณะเป็นโหนดเดียวที่ตายตัว ซึ่งจะทำกรรวบรวมทุก ๆ สัญญาณที่ได้จากชั้นที่ 4 ออกเป็นข้อมูลขาออกของระบบ

$$\text{overall output} = O_{5,1} = \sum_i \overline{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (4.6)$$

โดย

$O_{5,i}$	คือ ขาออกของโหนดที่ i ในชั้นที่ 5
\overline{w}_i	คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ผ่านการนอมัลไลซ์แล้ว
f_i	คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณสมการโพลีโนเมียลในโหนดที่ i

4.2 การฝึกสอน ANFIS

ANFIS จะทำงานได้ถูกต้องนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการฝึกสอน โดยทำการฝึกสอนจากข้อมูลขาเข้าขาออกตัวอย่าง โดยระหว่างการฝึกสอน ANFIS จะทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้สามารถคำนวณค่าขาออกให้ได้ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่นำมาฝึกสอน โดยพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการฝึกสอน ANFIS มีอยู่ 2 ชุดคือ ฟรึมิสพารามิเตอร์ และคอนซีควนท์พารามิเตอร์ ที่อยู่ในชั้นที่ 2 และชั้นที่ 4 ของโครงสร้าง ANFIS ตามลำดับ

4.2.1 การเรียนรู้แบบไฮบริด (Hybrid Learning Algorithm)

การเรียนรู้ของระบบอนุมานนิวโรฟซซีที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นการเลียนแบบการเรียนรู้มาจากระบบโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้วิธีการฝึกและเรียนรู้แบบไฮบริด ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะโดยมีการฝึกและเรียนรู้ทั้งสองส่วน ส่วนแรกเป็นการฝึกและกำหนดค่าคอนซีควนท์พารามิเตอร์ ซึ่งจะพิจารณาจากโครงสร้างของระบบดังรูป 4.1 โดยทำการคงค่าฟรึมิสพารามิเตอร์เริ่มต้น และกำหนดค่าคอนซีควนท์พารามิเตอร์ จากการประมาณค่าไปข้างหน้าโดยวิธีการลีสท์สแควร์จนถึงชั้นที่ 4 ก็จะได้สัญญาณขาออกที่ได้จากคอนซีควนท์พารามิเตอร์ ส่วนที่สองจะเป็นการฝึกและกำหนดค่าฟรึมิสพารามิเตอร์ โดยภายหลังจากการกำหนดค่าคอนซีควนท์พารามิเตอร์มาแล้ว จะทำการคงค่าไว้ จากนั้นทำการฝึกแบบย้อนกลับโดยวิธีแบคพรอพพาเกชัน (backpropagation) จะได้สัญญาณผิดพลาดแล้วจึงทำการกำหนดค่าฟรึมิสพารามิเตอร์ใหม่เพื่อทำการฝึกและกำหนดค่าคอนซีควนท์พารามิเตอร์ใหม่ ในรอบถัดไป ตารางที่ 4.1 จะสรุปให้เห็นถึงการฝึกและเรียนรู้ในแต่ละส่วนของวิธีการเรียนรู้แบบไฮบริด

ตารางที่ 4.1 วิธีการเรียนรู้แบบไฮบริด

	Forward pass	Backward pass
Premise parameters	Fixed	Gradient descent
Consequent parameters	Least-squares estimator	Fixed
Signals	Node outputs	Error signals

ในส่วนของรายละเอียดของวิธีการประมาณค่าแบบลีสท์สแควร์ และวิธีแบคพรอพพาเกชัน อธิบายในหัวข้อถัดไปดังต่อไปนี้

4.2.1.1 การประมาณค่าโดยวิธีลีสท์สแควร์ (Least-Squares Estimator) [32]

โดยทั่วไปผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีประมาณค่าแบบลีสท์สแควร์จะเป็นลักษณะแบบจำลองเชิงเส้นของตัวแปร y ดัง (4.7)

$$y = \theta_1 f_1(u) + \theta_2 f_2(u) + \dots + \theta_n f_n(u) \quad (4.7)$$

โดย

$u = [u_1, \dots, u_p]^T$ เป็นเวกเตอร์ของข้อมูลขาเข้า
 f_1, \dots, f_n เป็นฟังก์ชันของข้อมูลที่ป้อนเข้าซึ่งทราบค่าอยู่แล้ว
 $\theta_1, \dots, \theta_n$ เป็นคอนซีควนท์พารามิเตอร์ที่จะทำการประมาณค่า

ในงานทางสถิติ จะเรียกแบบจำลองเชิงเส้นนี้ว่า “การถดถอยเชิงเส้น” (linear regression) ดังนั้นใน (4.7) จึงเรียกว่าฟังก์ชันถดถอย (regression function)

ในการประมาณค่าตัวแปร θ_i จะทำได้โดยการพิสูจน์จากชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึก (training data set) ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลขาเข้าและขาออกของระบบ ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ได้ โดยที่ (4.8) เป็นการขยายความในสมการที่ (4.7) ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลในแต่ละชุด โดยมีสมการเชิงเส้นอยู่ m สมการ

$$\begin{cases} f_1(u_1)\theta_1 + f_2(u_1)\theta_2 + \dots + f_n(u_1)\theta_n = y_1, \\ f_1(u_2)\theta_1 + f_2(u_2)\theta_2 + \dots + f_n(u_2)\theta_n = y_2, \\ \vdots \\ f_1(u_m)\theta_1 + f_2(u_m)\theta_2 + \dots + f_n(u_m)\theta_n = y_m. \end{cases} \quad (4.8)$$

จาก (4.8) สามารถเขียนแทนโดยใช้เมทริกซ์ได้ใหม่เพื่อให้กระชับยิ่งขึ้นดังสมการดังนี้

$$A \theta = y. \quad (4.9)$$

โดย

$$A = \begin{bmatrix} f_1(u_1) & \dots & f_n(u_1) \\ \vdots & & \vdots \\ f_1(u_m) & \dots & f_n(u_m) \end{bmatrix} \quad \text{คือ ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของข้อมูลในแต่ละชุด}$$

$$\theta = [\theta_1 \cdots \theta_n]^T \quad \text{คือ เวกเตอร์ของคอนซีแวนท์พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า}$$

$$y = [y_1 \cdots y_m]^T \quad \text{คือ เวกเตอร์ของข้อมูลขาออก}$$

ในการหาค่าเวกเตอร์ของคอนซีแวนท์พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า (θ) จะสามารถทำได้ก็ต่อเมื่อ $m \geq n$ โดยในกรณีที่เมทริกซ์ A เป็นเมทริกซ์จัตุรัส ($m = n$) และไม่เป็นเมทริกซ์เอกฐาน (non singular matrix) จะสามารถหาคำตอบได้ดัง (4.10)

$$\theta = A^{-1}y. \quad (4.10)$$

อย่างไรก็ตามในการทำงานส่วนใหญ่ จะมีจำนวนชุดข้อมูลมากกว่าจำนวนชุดตัวแปรที่ต้องการทราบค่า ($m > n$) ซึ่งในกรณีนี้จะไม่สามารถหาคำตอบจากแก้สมการโดยตรงได้เนื่องจากข้อมูลที่ได้ไม่มีความผิดพลาดเจือปนอยู่ ดังนั้นในสมการที่ (4.9) จึงทำการปรับปรุงโดยทำการรวมเวกเตอร์ของความผิดพลาดเข้าไปด้วยดัง (4.11)

$$A \theta + e = y. \quad (4.11)$$

จาก (4.11) จะทำให้สามารถหาคำตอบได้ โดยจะต้องทำการค้นหาเวกเตอร์ของคอนซีแวนท์พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ($\theta = \hat{\theta}$) จากการลดขนาด (minimize) ของค่ารวมความผิดพลาดยกกำลังสอง (sum of squared error) จาก

$$E(\theta) = \sum_{i=1}^m (y_i - a_i^T \theta)^2 = e^T e = (y - A\theta)^T (y - A\theta), \quad (4.12)$$

โดยที่ $e = y - A\theta$ เป็นเวกเตอร์ความผิดพลาดที่ได้จากการเลือกเวกเตอร์ของคอนซีแวนท์พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า (θ) ที่ดีที่สุด ซึ่งค่ารวมความผิดพลาดยกกำลังสอง $E(\theta)$ จะอยู่ในรูปแบบ ควอดราติกและมีค่าน้อยที่สุด โดยเรียกเวกเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่า ($\hat{\theta}$) ว่า “Least-Squares Estimator” ซึ่งได้มาจากการแก้ปัญหาโดยการกระจาย (4.12) ดังนี้

$$E(\theta) = (y^T - \theta^T A^T)(y - A\theta) = \theta^T A^T A \theta - 2y^T A \theta + y^T y. \quad (4.13)$$

จากนั้นทำการหาอนุพันธ์ของค่ารวมความผิดพลาดยกกำลังสอง

$$\frac{\partial E(\theta)}{\partial \theta} = 2A^T A\theta - 2A^T y. \quad (4.14)$$

กำหนดให้ $\frac{\partial E(\theta)}{\partial \theta} = 0$ ที่ $\theta = \hat{\theta}$ จะได้

$$A^T A \hat{\theta} = A^T y. \quad (4.15)$$

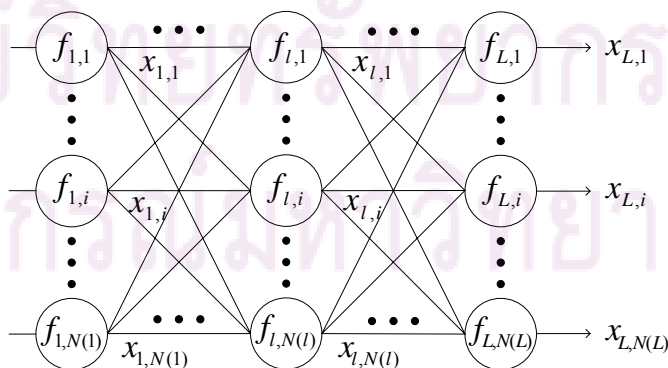
ถ้า $A^T A$ ไม่เป็นเมทริกซ์เอกฐาน (non-singular matrix) แล้วจะหาคำตอบได้ดังสมการ

$$\hat{\theta} = (A^T A)^{-1} A^T y. \quad (4.16)$$

4.2.1.2 การประมาณค่าโดยวิธีแบคพรอพพากชัน (Backpropagation Method) [33]

วิธีการ Backpropagation เป็นวิธีการที่ใช้กับโครงสร้างนิเวศทั่วไป ใช้สำหรับหาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนกำลังสองเทียบกับพารามิเตอร์ที่ต้องการ เพื่อนำค่าอนุพันธ์ที่ได้ไปปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ในการแก้ปัญหาออปติไมเซชัน การหาค่าอนุพันธ์ลำดับของฟังก์ชันจะใช้วิธีการแพร่ย้อนกลับของสัญญาณคลาดเคลื่อน (error signal, $\varepsilon_{l,i}$)

สำหรับโครงสร้างนิเวศใด ๆ ที่มีจำนวนชั้น L กำหนดให้ l เป็นหมายเลขแทนลำดับชั้นซึ่งมีจำนวนโหนดคือ $N(l)$ และโหนดต่าง ๆ มีหมายเลขโหนดคือ i ฟังก์ชันในแต่ละโหนดคือ $f_{l,i}$ และข้อมูลขาออกแต่ละโหนดคือ $x_{l,i}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างนิเวศ

ซึ่งมีข้อมูลขาออกในแต่ละโหนดมีลักษณะฟังก์ชันเป็นไปดัง (4.17)

$$x_{l,i} = f_{l,i}(x_{l-1,1}, \dots, x_{l-1,N(l-1)}) \quad (4.17)$$

สมมติให้มีข้อมูลชุดฝึกอยู่ P ชุด โดยกำหนดให้มีค่ารวมความผิดพลาดยกกำลังสองของข้อมูลชุดที่ p ดัง (4.18)

$$E_p = \sum_{k=1}^{N(L)} (d_k - x_{L,k})^2, \quad (4.18)$$

โดย

d_k เป็นข้อมูลขาออกที่ k จากชุดตัวอย่าง
 $x_{L,k}$ เป็นข้อมูลขาออกที่ k ที่ได้จากระบบ

ในการฝึกหาค่าพริสมิตราเมเตอร์ของระบบ จะทำการประมาณค่าย้อนกลับจากชั้นข้อมูลขาออกกลับไปยังชั้นข้อมูลขาเข้าที่ไล่ชั้นไปเรื่อย ๆ โดยเริ่มจากกำหนดให้สัญญาณความผิดพลาด ($\varepsilon_{l,i}$) คืออนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของค่ารวมความผิดพลาดยกกำลังสอง (E_p) เทียบกับข้อมูลขาออกที่ได้ ($x_{l,i}$) ในโหนดที่ i บนชั้นที่ l โดยมีลักษณะดัง (4.19)

$$\varepsilon_{l,i} = \frac{\partial E_p}{\partial x_{l,i}}, \quad (4.19)$$

จากสมการข้างต้นสัญญาณความผิดพลาดในโหนดที่ i บนชั้นข้อมูลขาออก (ชั้นที่ L) สามารถแก้ (4.19) ได้โดยตรงซึ่งมีค่า $\varepsilon_{L,i} = -2(d_i - x_{L,i})$ ในส่วนของสัญญาณความผิดพลาดในชั้นถัดไปข้างในนั้นจะหาค่าได้โดยใช้กฎลูกโซ่ (chain rule)

$$\varepsilon_{l,i} = \underbrace{\frac{\partial E_p}{\partial x_{l,i}}}_{\text{สัญญาณคลาดเคลื่อนที่ชั้น } l} = \sum_{m=1}^{N(l+1)} \underbrace{\frac{\partial E_p}{\partial x_{l+1,m}} \frac{\partial f_{l+1,m}}{\partial x_{l,i}}}_{\text{สัญญาณคลาดเคลื่อนที่ชั้น } l+1} = \sum_{m=1}^{N(l+1)} \varepsilon_{l+1,m} \frac{\partial f_{l+1,m}}{\partial x_{l,i}}, \quad (4.20)$$

โดยเมื่อให้ α เป็นพริสมิตราเมเตอร์ในโหนดที่ i บนชั้นที่ l จะได้ความสัมพันธ์ดัง (4.21)

$$\frac{\partial + E_p}{\partial \alpha} = \frac{\partial + E_p}{\partial x_{l,i}} \frac{\partial f_{l,i}}{\partial \alpha} = \varepsilon_{l,i} \frac{\partial f_{l,i}}{\partial \alpha}, \quad (4.21)$$

ซึ่งจะได้อนุพันธ์ของความผิดพลาดเทียบกับพารามิเตอร์รวมทั้งหมดดัง (4.22)

$$\Delta \alpha = \frac{\partial + E}{\partial \alpha} = \sum_{p=1}^p \frac{\partial + E_p}{\partial \alpha}. \quad (4.22)$$

โดยค่า $\Delta \alpha$ ที่ได้จะถูกนำมาอัปเดตหาค่าตอบในการทวนซ้ำใน (4.23) จนได้ค่าผู้เข้าสู่คำตอบที่ต้องการ

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + \Delta \alpha \quad (4.23)$$

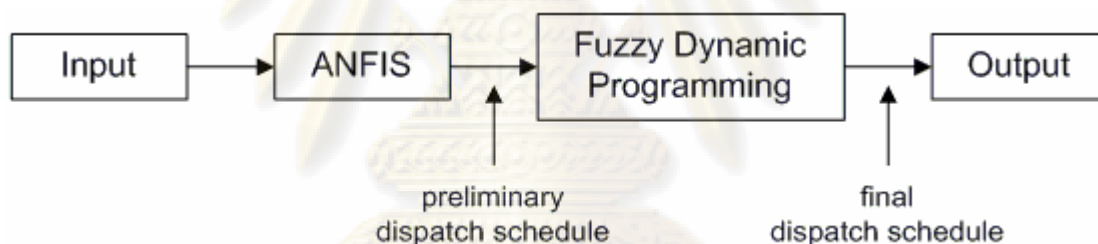
4.3 สรุป

ANFIS มีโครงสร้างพื้นฐานที่มาจากระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno แต่พารามิเตอร์ภายในจะได้มาจากการนำข้อมูลตัวอย่างมาฝึกสอน ANFIS ทำให้ ANFIS สามารถแปลงค่าขาเข้าของระบบใด ๆ ให้กลายเป็นขาออกที่คล้ายคลึงกับระบบนั้น ๆ ได้ โดยไม่ต้องสร้างแบบจำลองของระบบขึ้นมาโดยตรง ถึงแม้ว่ากระบวนการฝึกสอนของ ANFIS จะมีวิธีการที่ยุ่งยากเพื่อที่จะหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามกระบวนการคำนวณภายในของ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะสามารถคำนวณขาออกได้อย่างรวดเร็ว สำหรับการกำหนดค่าขาเข้าให้แก่ระบบเพื่อให้สอดคล้องการนำไปใช้งานนั้นจะกล่าวในบทที่ 6 ต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การประยุกต์ใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ ในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย

จากหลักการของระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ที่กล่าวไว้ข้างต้น ในบทนี้จะนำระบบดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming ในการหาแนวทางควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายหลังจากที่ได้มีการพยากรณ์โหลดล่วงหน้าไว้แล้ว ซึ่งในที่นี้จะทำการศึกษาโดยข้อมูลโหลดในระบบจำหน่ายในอดีต โดยมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 5.1 โดยที่ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีจะทำการอนุมานค่าสถานะการทำงานของตัวเก็บประจุในระบบและตำแหน่งที่ป้อนเปลี่ยนแปลง เบื้องต้นขึ้นมาก่อน แล้วจึงแก้ปัญหาในขั้นตอนสุดท้ายโดยใช้เทคนิค Fuzzy Dynamic Programming ซึ่งจะทำให้สามารถลดจำนวนเส้นทางเดินของคำตอบลงได้



รูปที่ 5.1 การควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายโดยการประยุกต์ใช้ ANFIS ร่วมกับ Fuzzy Dynamic Programming

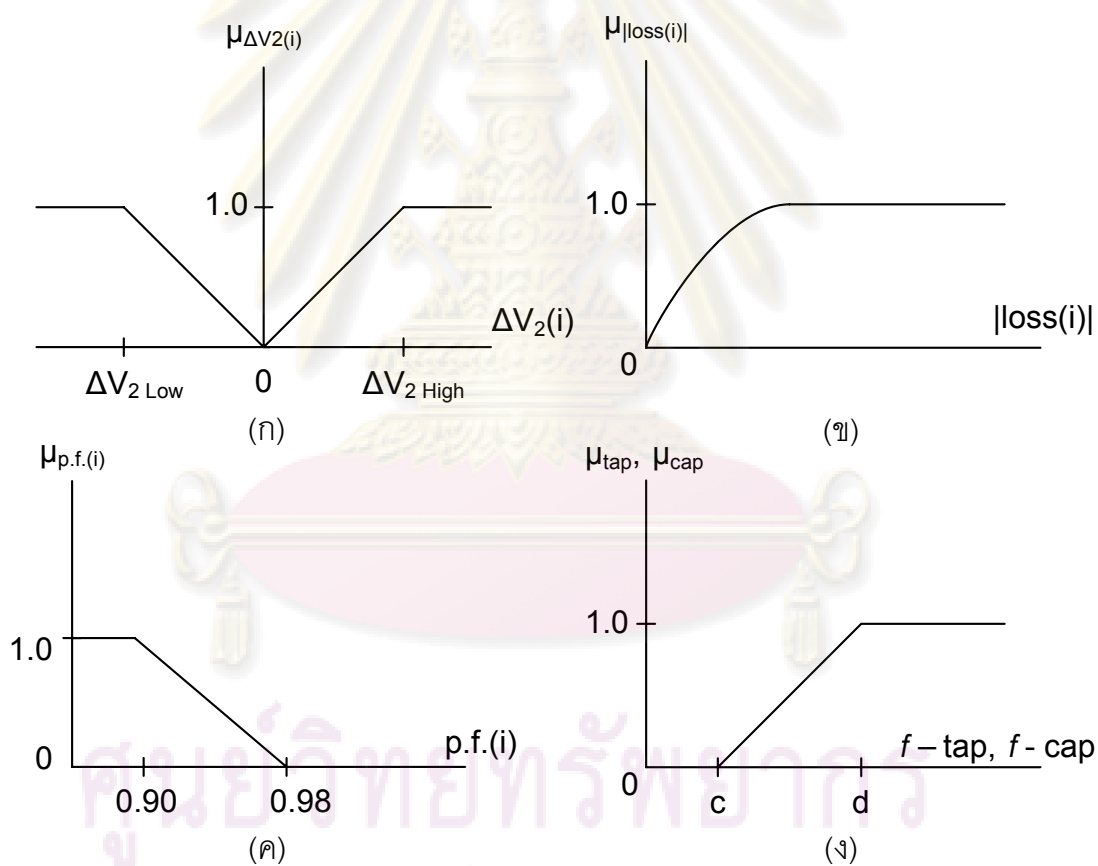
5.1 การอนุมานสถานะการทำงานของอุปกรณ์จาก ANFIS

จากรูป 5.1 ข้างต้นจะต้องมีการกำหนดข้อมูลขาเข้าให้กับ ANFIS อย่างเหมาะสมเพื่อให้ระบบสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมที่สุด โดยใช้ตัวเลขที่เป็นจำนวนเต็มแสดงถึงสถานะการทำงานต่าง ๆ ของอุปกรณ์ในระบบจำหน่าย ซึ่งรายละเอียดนั้นต่อไปในบทถัดไป ในส่วนค่าขาออกของ ANFIS จะมีข้อมูลขาออกที่แสดงถึงตำแหน่งการทำงานของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายที่พิจารณาอยู่ด้วยกันก็คือ ตำแหน่งที่ป้อนเปลี่ยนแปลงและสถานะของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่ติดตั้งในระบบ โดยค่าที่ได้นั้นจะเป็นจำนวนจริงซึ่งจะใช้ออกมาจนถึงสถานะการทำงานที่

เหมาะสมและเป็นไปได้ ซึ่งรายละเอียดของวิธีการอนุมานสถานะการทำงานนั้นจะกล่าวในบทถัดไป

5.2 การคำนวณสถานะทำงานของอุปกรณ์ในขั้นตอนสุดท้าย จากเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming

Fuzzy Dynamic Programming [19] เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายได้ในกรณีศึกษานี้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะทำให้การเลือกเส้นทางเดินของคำตอบที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งได้กำหนดจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของทฤษฎีฟัซซีเซตดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.2 ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่นำมาใช้สร้างฟังก์ชันเป้าหมาย

(1) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนไปจากค่าของระบบในบัสด้านแรงต่ำของหม้อแปลงจำหน่าย มีลักษณะดังรูปที่ 5.2 (ก) โดยมีฟังก์ชันแสดงดัง (5.1)

$$\mu_{\tilde{\Delta V}_2(i)} = \begin{cases} \frac{\Delta V_2(i)}{\Delta V_{2Low}}, & \Delta V_{2Low} \leq \Delta V_2(i) \leq 0 \\ \frac{\Delta V_2(i)}{\Delta V_{2High}}, & 0 \leq \Delta V_2(i) \leq \Delta V_{2High} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.1)$$

โดย

- $\mu_{\tilde{\Delta V}_2(i)}$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนไปจากค่าของระบบในบัสแรงต่ำของหม้อแปลง ที่เวลา i
- ΔV_{2Low} คือ ขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนไปต่ำกว่าค่าของระบบสูงสุดที่เป็นไปได้ ที่บัสแรงต่ำของหม้อแปลง
- ΔV_{2High} คือ ขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนไปสูงกว่าค่าของระบบสูงสุดที่เป็นไปได้ ที่บัสแรงต่ำของหม้อแปลง
- $\Delta V_2(i)$ คือ ขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนไปจากค่าแรงดันของระบบ ในบัสแรงต่ำของหม้อแปลง ที่เวลา i

(2) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายซึ่งจะใช้ลักษณะของฟังก์ชัน exponential ในรูปแบบลักษณะรูปที่ 5.2 (ข) ซึ่งมีฟังก์ชันแสดงดัง (5.2)

$$\mu_{|\tilde{loss}(i)|} = 1 - e^{-|loss(i)|} \quad (5.2)$$

โดย

- $\mu_{|\tilde{loss}(i)|}$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย ที่เวลา i
- $loss(i)$ คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ มีหน่วยเป็น per unit ที่เวลา i

(3) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวประกอบกำลังของสถานีซึ่งจะใช้ลักษณะของฟังก์ชันดังรูปที่ 5.2 (ค) ซึ่งมีฟังก์ชันแสดงดัง (5.3)

$$\mu_{p.f.(i)} = \begin{cases} 0 & p.f.(i) < 0.90 \\ \frac{(0.98-p.f.(i))}{(0.98-0.90)} & 0.90 \leq p.f.(i) \leq 0.98 \\ 1, & p.f.(i) > 0.98 \end{cases} \quad (5.3)$$

โดย

$\mu_{p.f.(i)}$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวประกอบกำลังของสถานี ที่เวลา i
 $p.f.(i)$ คือ ค่าตัวประกอบกำลังของสถานี ที่เวลา i

(4) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนครั้งการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งได้แก่ ตัวเก็บประจุแต่ละตัวในระบบ และตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงจำหน่าย โดยมีลักษณะของฟังก์ชันดังรูป 5.2 (ง) ซึ่งจะถูกกำหนดจากค่าตัวแปร a, b, c และ d จากสถิติและข้อมูลการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในแต่ละชนิด

จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะนำมาสร้างฟังก์ชันเป้าหมายเพื่อทำการมินิไมซ์หาคำตอบที่เหมาะสมดัง (5.3) โดยที่คำตอบในแต่ละสถานะจะต้องไม่ละเมิดข้อกำหนดทางคุณภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายดัง (5.4) และ (5.5)

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^j \mu_{\Delta V_{2(i)}} + \sum_{i=1}^j \mu_{|p.f.(i)|} + \sum_{i=1}^j \mu_{loss(i)} + \mu_{tap} + \sum_{k=1}^m \mu_{s-cap(k)} + \sum_{k=1}^n \mu_{f-cap(k)} \quad (5.3)$$

$$V_{Low} \leq V_2(i) \leq V_{High} \quad (5.4)$$

$$V_{Low} \leq V_L(i) \leq V_{High} \quad (5.5)$$

โดย

$\sum_{i=1}^j \mu_{\Delta V_{2(i)}}$ คือ ผลรวมฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนไปจากค่าของระบบในบัสแรงต่ำของหม้อแปลง แต่ละเวลา i ใน 1 วัน
 $\sum_{i=1}^j \mu_{|p.f.(i)|}$ คือ ผลรวมฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวประกอบกำลังที่สถานีไฟฟ้าแต่ละเวลา i ใน 1 วัน

$\sum_{i=1}^j \mu_{loss(i)}$	คือ ผลรวมฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย แต่ละเวลา i ใน 1 วัน
μ_{tap}	คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนการดำเนินการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลง ภายใน 1 วัน
$\sum_{k=1}^m \mu_{s-cap(k)}$	คือ ผลรวมฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนการดำเนินการสวิตชิงของตัวเก็บประจุที่สถานี แต่ละตัว ใน 1 วัน
$\sum_{k=1}^n \mu_{f-cap(k)}$	คือ ผลรวมฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนการดำเนินการสวิตชิงของตัวเก็บประจุในสายป้อน แต่ละตัว ใน 1 วัน
$V_2(i)$	คือ ขนาดแรงดันในบัสแรงต่ำของหม้อแปลง ที่เวลา i
$V_L(i)$	คือ ขนาดแรงดันในแต่ละบัสที่ L ในระบบจำหน่าย ที่เวลา i
V_{Low}	คือ ขนาดแรงดันต่ำสุดในระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน กฟภ.
V_{High}	คือ ขนาดแรงดันสูงสุดในระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน กฟภ.

จากฟังก์ชันเป้าหมายข้างต้นจะถูกนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้และพิจารณาในการดำเนินการของอุปกรณ์ควบคุมในแต่ละชั่วโมง โดยทำการมินิไมซ์ฟังก์ชันจากเทคนิค dynamic programming ก็จะได้คำตอบที่ต้องการ

5.3 สรุป

การนำ ANFIS มาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming นั้นจะสามารถลดจำนวน State ในการหาคำตอบโดยวิธี Fuzzy Dynamic Programming เพียงอย่างเดียว ซึ่งจะส่งผลให้ลดระยะเวลาการคำนวณคำตอบได้ ซึ่งในการศึกษาการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในที่นี่ จะทำการศึกษาเพื่อควบคุมการสวิตชิงตัวเก็บประจุและการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงให้มีความเหมาะสมตามระดับโหลดในแต่ละช่วงเวลา โดยจะใช้การทำนายระดับโหลดล่วงหน้าเป็นเส้นโค้งโหลดรายชั่วโมงเพื่อใช้ในการศึกษา ซึ่งกรณีศึกษาในลักษณะนี้อาจไม่จำเป็นต้องใช้ ANFIS เข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อลดระยะเวลาการคำนวณคำตอบ แต่อย่างไรก็ตามการนำ ANFIS เข้ามาประยุกต์ใช้นั้นก็สามารถที่จะทำให้การคำนวณหาคำตอบรวดเร็วขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมการสวิตชิงตัวเก็บประจุและการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงในสถานะ On-line ได้

บทที่ 6

การนำเสนอขาเข้าของ ANFIS ในการอนุมานสถานะการทำงานของอุปกรณ์

ในการอนุมานหาสถานะการทำงานของอุปกรณ์ด้วย ANFIS โดยที่จะให้ ANFIS คำนวณหาค่าสถานะการทำงานได้อย่างถูกต้อง จะต้องใช้ข้อมูลในการฝึกสอนที่ครอบคลุมสถานะของระบบที่สามารถเกิดขึ้นได้ และจำเป็นจะต้องกำหนดค่าให้ตัวแปรขาเข้าของ ANFIS มีค่าที่เปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับตัวแปรขาออกที่ต้องการ ซึ่งจำนวนข้อมูลขาเข้าจะต้องมีไม่น้อยหรือมากเกินไป อีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับการฝึกสอน ANFIS ก็คือ ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและจำนวนของระดับฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (จำนวนฟัซซีเซต) ของข้อมูลขาเข้า ซึ่งจะมีส่วนในการบ่งบอกถึงลักษณะของข้อมูลที่น่ามาใช้

6.1 สมมติฐาน

จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงปัจจัยทั้งหมดที่มีผลกระทบต่อ การฝึกสอนและการนำ ANFIS ไปใช้งาน โดยมีปัจจัยที่จะนำมาพิจารณาด้วยกันก็คือ จำนวนข้อมูลขาเข้าของ ANFIS (N_{input}) และจำนวนฟัซซีเซตของข้อมูลขาเข้า โดยที่จำนวนพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต (N_f) แต่ละชนิดจะมีจำนวนที่แตกต่างกัน ดังตาราง 6.1

ตารางที่ 6.1 จำนวนพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบต่าง ๆ

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	จำนวนพารามิเตอร์
สามเหลี่ยม	3
สี่เหลี่ยมคางหมู	4
รูประฆัง	3
เกาส์เซียน	2

ซึ่งปัจจัยทั้งสองจะมีส่วนที่กำหนดจำนวนพรีมิสพารามิเตอร์ (N_{pre}), จำนวนกฎ (N_{rule}) และจำนวนคอนซีควนท์พารามิเตอร์ (N_{cons}) ใน ANFIS ดัง (6.1), (6.2) และ (6.3) ตามลำดับ

$$N_{pre} = N_f \sum_{k=1}^{N_{input}} m_k \quad (6.1)$$

$$N_{rule} = \prod_{k=1}^{N_{input}} m_k \quad (6.2)$$

$$N_{cons} = (N_{input} + 1) \times N_{rule} \quad (6.3)$$

โดย	N_{pre}	จำนวนพรีมิสพารามิเตอร์ทั้งหมด
	N_{rule}	จำนวนกฎ
	N_{cons}	จำนวนคอนซีเกวนท์พารามิเตอร์
	N_f	จำนวนพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตที่ใช้
	N_{input}	จำนวนข้อมูลขาเข้าทั้งหมด
	m_k	จำนวนฟัซซีเซตของข้อมูลขาเข้าแต่ละตัว

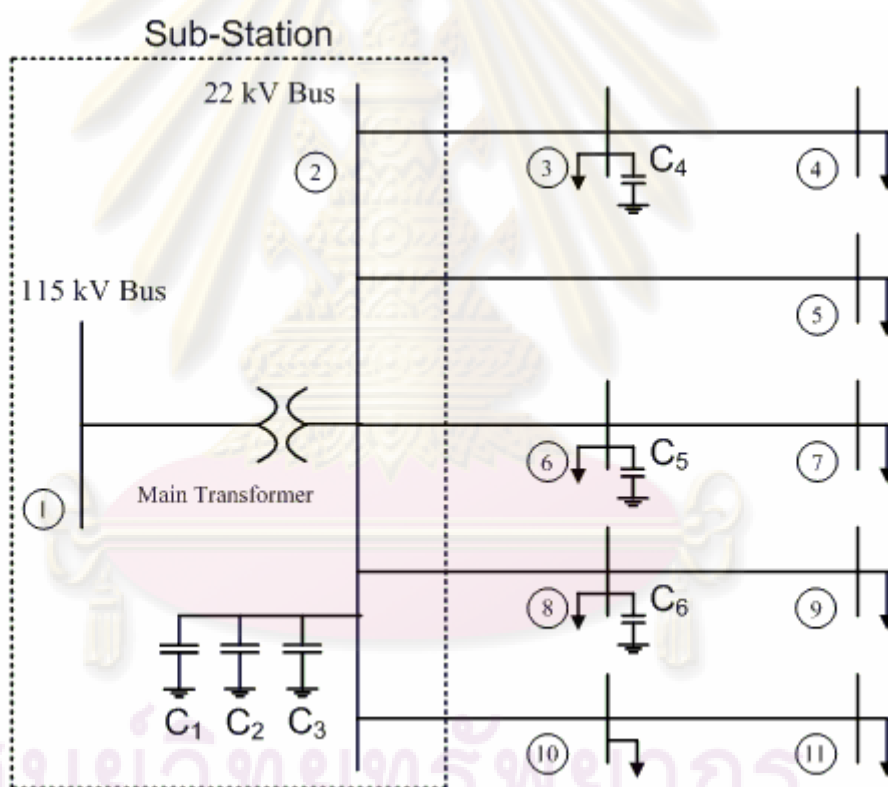
ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบจำนวนพารามิเตอร์ของระบบที่มีจำนวนขาเข้าแตกต่างกัน

ระบบที่	N_{input}	m_k	N_{rule}	N_{pre}	N_{cons}	พารามิเตอร์รวม
1	1	3	3	9	6	15
2	2	3	9	18	27	45
3	3	3	27	27	108	135
4	4	3	81	36	405	441
5	5	3	243	45	1,458	1,503
6	6	3	729	54	5,103	5,157
7	7	3	2,187	63	17,496	17,559
8	8	3	6,561	72	59,049	59,121
9	9	3	19,683	81	196,830	196,911
10	10	3	59,049	90	649,539	649,629

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า จำนวนข้อมูลขาเข้าของ ANFIS และจำนวนฟัซซีเซตของข้อมูลขาเข้า จะส่งผลถึงจำนวนตัวแปรใน ANFIS อีกมากมายซึ่งจะส่งผลถึงความถูกต้องของระบบที่จะนำไปใช้งาน จากตาราง 6.2 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนขาเข้าเพียงเล็กน้อยส่งผลต่อจำนวนพารามิเตอร์ที่อยู่ใน ANFIS มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน ANFIS จะต้องใช้เวลามากขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกันการลดจำนวนขาเข้าลงอาจทำให้ ANFIS ที่ได้ ไม่สอดคล้องกับระบบจริงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น

6.2 แนวคิดในการกำหนดค่าเข้าให้ ANFIS ในการอนุมานสถานะการทำงานของอุปกรณ์

ในระบบจำหน่ายตัวแปรที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์โหลดโพลีมีอยู่มากมายเช่น ปริมาณกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละบัส, แรงดันที่สถานีจำหน่าย และค่าพารามิเตอร์ในสายส่ง เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้ ANFIS ควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยการเปลี่ยนตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงจำหน่ายร่วมกับการสวิตซ์ซึ่งตัวเก็บประจุที่สถานีและในสายป้อนของระบบจำหน่ายในแต่ละช่วงเวลานั้น จำเป็นจะต้องกำหนดข้อมูลค่าเข้าให้ ANFIS ให้เหมาะสม เพื่อให้ ANFIS สามารถอนุมานค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำที่สุด โดยใช้การพิจารณาจากแบบจำลองของระบบจำหน่ายดังรูปที่ 6.1

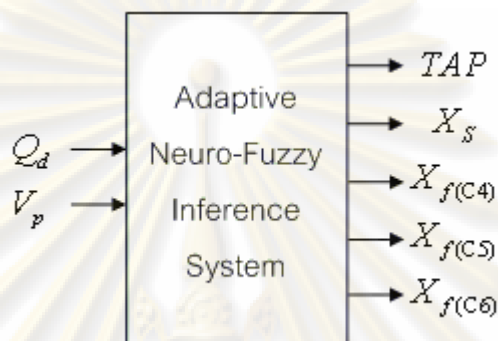


รูปที่ 6.1 ลักษณะแบบจำลองของระบบจำหน่ายที่ใช้ศึกษา

จากแบบจำลองระบบจำหน่าย 22 kV ในรูปที่ 6.1 ที่จะทำการศึกษาจะมีการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงจำหน่าย และการสวิตซ์ซึ่งตัวเก็บประจุ ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานก็คือ ปริมาณแรงดันด้านแรงสูงของหม้อแปลง, ปริมาณโหลดของผู้ใช้ไฟในระบบ จึงขอเสนอแนวคิดในการกำหนดค่าเข้าให้ ANFIS 4 รูปแบบด้วยกันดังนี้

- รูปแบบที่ 1

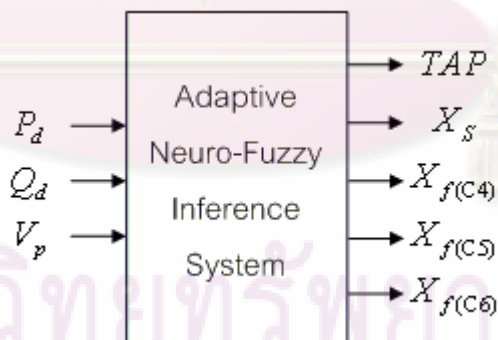
กำหนดขาเข้าจาก ขนาดแรงดันที่บัสทางด้านแรงสูงของสถานีไฟฟ้า (V_p) และ กำลังไฟฟัรืแอกทีฟรวมของผู้ใช้ไฟทั้งหมด (Q_d) ซึ่งจะได้ค่าขาออกคือ ค่า Step ของ Capacitors ที่สถานี (X_s), ตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงจำหน่าย (TAP) และสถานะการทำงานของ feeder capacitors แต่ละตัว ($X_{f(i)}$) ซึ่งค่าขาออกนั้นจะเหมือนกันทั้ง 4 รูปแบบ



รูปที่ 6.2 รูปแบบที่ 1 ของ ANFIS ที่ใช้ทดสอบระบบจำหน่าย

- รูปแบบที่ 2

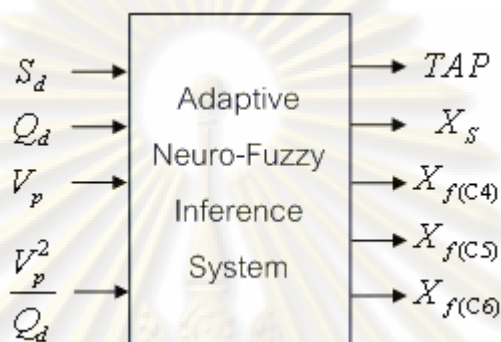
กำหนดขาเข้าจาก ขนาดแรงดันที่บัสทางด้านแรงสูงของสถานีไฟฟ้า (V_p), ขนาด กำลังไฟฟ้าจริง (P_d) และกำลังไฟฟัรืแอกทีฟรวมของผู้ใช้ไฟทั้งหมด (Q_d)



รูปที่ 6.3 รูปแบบที่ 2 ของ ANFIS ที่ใช้ทดสอบระบบจำหน่าย

- รูปแบบที่ 3

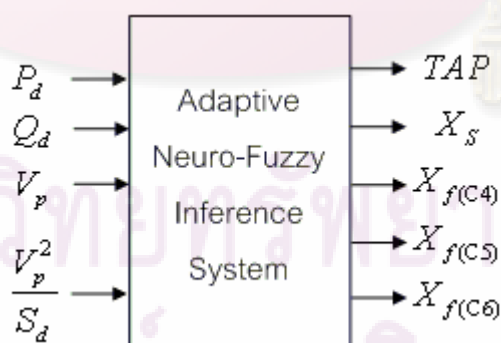
กำหนดขาเข้าจาก ขนาดแรงดันที่บัสทางด้านแรงสูงของสถานีไฟฟ้า (V_p), ปริมาณกำลังไฟฟัรืแอกทีฟรวมของผู้ใช้ไฟัทั้งหมด (Q_d) และอัตราส่วนองขนาดแรงดันกำลังสองต่อปริมาณกำลังไฟฟัรืแอกทีฟรวมของผู้ใช้ไฟัทั้งหมด $\left(\frac{V_p^2}{Q_d}\right)$



รูปที่ 6.4 รูปแบบที่ 3 ของ ANFIS ที่ใช้ทดสอบระบบจำหน่าย

- รูปแบบที่ 4

กำหนดขาเข้าจาก ขนาดแรงดันที่บัสทางด้านแรงสูงของสถานีไฟฟ้า (V_p), ขนาดกำลังไฟฟัจริง (P_d), กำลังไฟฟัรืแอกทีฟรวมของผู้ใช้ไฟัทั้งหมด (Q_d) และอัตราส่วนองขนาดแรงดันกำลังสองต่อขนาดโหลดรวมเป็น MVA ของระบบ $\left(\frac{V_p^2}{S_d}\right)$



รูปที่ 6.5 รูปแบบที่ 4 ของ ANFIS ที่ใช้ทดสอบระบบจำหน่าย

จากแนวคิดของการกำหนดขาเข้าให้กับ ANFIS ที่นำเสนอแต่ละรูปแบบดังกล่าวนี้ จะมีรายละเอียดของการทดสอบและวิเคราะห์ผล ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 7 ถัดไป

6.3 การตัดสินใจหาสถานะการทำงานของอุปกรณ์จากค่าขาออกของ ANFIS

ระบบอนุมานค่านิวโรฟัซซีที่ใช้ในการศึกษานี้ จะมีโหนดข้อมูลขาออกที่แสดงถึงตำแหน่งการทำงานของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายที่พิจารณาอยู่ด้วยกันก็คือ ตำแหน่งแท็ปหม้อแปลง, ค่า Step ของ ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้า และสถานะการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในระบบ ซึ่งจะมีการตัดสินใจในการทำงานของอุปกรณ์ดังนี้

(1.) ตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงพิจารณาจากข้อมูลขาออกของ ANFIS O_k ซึ่งจะมีค่าเป็นจำนวนจริงโดยกำหนดให้แท็ปหม้อแปลงในระบบจำหน่ายมีจำนวน 17 แท็ปซึ่งแทนด้วยจำนวนเต็มตั้งแต่ 1 จนถึง 17 โดยให้

$$tap_i = O_k \quad (6.4)$$

โดยกำหนดให้ a_i เป็นจำนวนเต็มที่อยู่ใกล้กับ tap_i มากที่สุด และ b_i มีค่าตาม (6.5)

$$b_i = |tap_i - a_i| \quad (6.5)$$

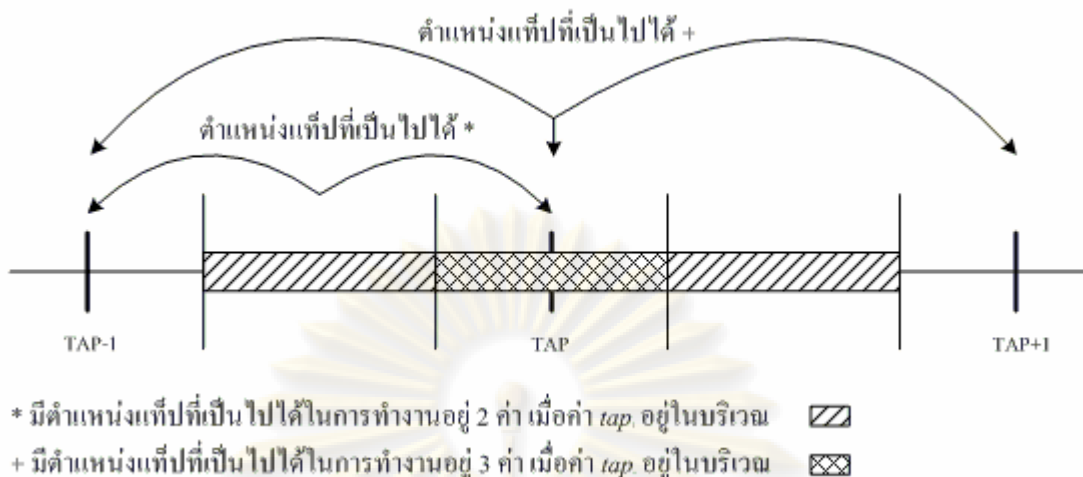
และกำหนดให้การตัดสินใจในการทำงานใน state ที่ i เป็นดังสมการดังนี้

$$\begin{aligned} TAP_i &= a_i, a_i+1, a_i-1 \quad ; b_i \leq 0.15 \\ TAP_i &= a_i, c_i \quad ; b_i > 0.15 \end{aligned} \quad (6.6)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} c_i &= a_i - 1 \quad \text{ถ้า } a_i - 1 \text{ มีค่าใกล้กับ } tap_i \\ c_i &= a_i + 1 \quad \text{ถ้า } a_i + 1 \text{ มีค่าใกล้กับ } tap_i \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยุโทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.6 การพิจารณาการทำงานของตำแหน่งที่ปัดหม้อแปลง

(2.) ค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้า (X_s) ในแต่ละ state พิจารณาจากข้อมูลขาออกของ ANFIS O_k ซึ่งจะมีค่าเป็นจำนวนจริง โดยจะมีค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าจำนวน 3 step ซึ่งแทนด้วยจำนวนเต็มตั้งแต่ 0 จนถึง 3 โดยให้

$$\begin{aligned}
 X_i &= 0,1 : 0.00 \leq O_k < 1.00 \\
 X_i &= 1,2 : 1.00 \leq O_k < 2.00 \\
 X_i &= 2,3 : 2.00 \leq O_k < 3.00 \\
 X_i &\text{ ไม่สามารถระบุได้เมื่อ } O_k \text{ มีค่าอื่นๆ}
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

(3.) สถานะตัวเก็บประจุแต่ละตัว (X_i) ในแต่ละ state พิจารณาจากข้อมูลขาออกของ ANFIS O_k ซึ่งจะมีค่าเป็นจำนวนจริง โดยแทนค่าสถานะของตัวเก็บประจุที่สายป้อนด้วยจำนวนเต็มตั้งแต่ 0 และ 1 ซึ่งแสดงถึงสถานะ on และ off ตามลำดับ โดยมีการตัดสินใจในการทำงานดังนี้

$$\begin{aligned}
 X_i &= 1, 0.70 < O_k \leq 1.00 \\
 X_i &= 0, 0.00 \leq O_k < 0.30 \\
 X_i &\text{ ไม่สามารถระบุได้เมื่อ } O_k \text{ มีค่าอื่นๆ}
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

6.4 สรุป

ในการกำหนดขาเข้าที่นำเสนอในบทนี้ มีแนวคิดเพื่อที่จะให้ ANFIS สามารถคำนวณสถานะของตัวเก็บประจุและตำแหน่งแท่งหม้อแปลงในระบบได้ โดยจะทำการศึกษามีกการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังฟาริแอกทีฟจากการเปลี่ยนแท่งหม้อแปลงจำหน่าย และการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานก็คือ ปริมาณแรงดันด้านแรงสูงของหม้อแปลง, ปริมาณโหลดของผู้ใช้ไฟในระบบ โดยได้กำหนดขาเข้าให้ ANFIS 4 รูปแบบด้วยกันในลักษณะต่าง ๆ เพื่อที่จะใช้รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอเหล่านี้จะนำไปใช้ทดสอบคำนวณค่าสถานะ ในบทต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบการประยุกต์ใช้ ANFIS ควบคุมปริมาณแรงดัน และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำเสนอการทดสอบการประยุกต์ใช้ ANFIS ในการหาสถานะการทำงานของตำแหน่งที่หม้อแปลงรวมกับการสวิตชิงตัวเก็บประจุแต่ละตัวในระบบจำหน่ายให้เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา เพื่อที่จะทำการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าให้มีคุณภาพที่ดี โดยได้ออกแบบการทดสอบที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะของปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งจะทดสอบกับระบบจำหน่ายในประเทศไทย โดยมีการทดสอบดังนี้

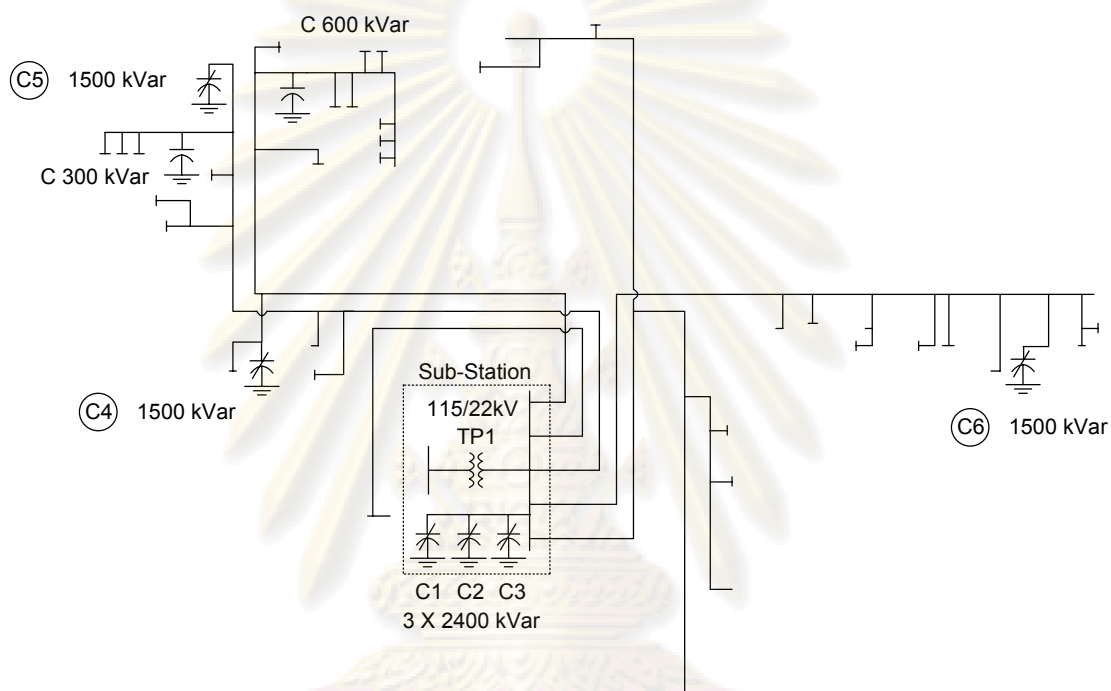
- 1) การทดสอบรูปแบบขาเข้าของ ANFIS ที่แตกต่างกัน เพื่อดูผลของการเพิ่มขาเข้าของ ANFIS ตามแนวคิดที่นำเสนอ และเปรียบเทียบกับผลของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (mean absolute error) เพื่อใช้ในการตัดสินใจนำรูปแบบที่ดีที่สุดไปใช้ต่อไป
- 2) การทดสอบชนิดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่แตกต่างกันในการคำนวณค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ในระบบจำหน่าย และเปรียบเทียบกับผลของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (mean absolute error) เพื่อใช้ในการตัดสินใจนำรูปแบบที่ดีที่สุดไปใช้ต่อไป
- 3) การทดสอบการหาสถานะการทำงานของตำแหน่งที่หม้อแปลงรวมกับการสวิตชิงตัวเก็บประจุแต่ละตัวในระบบจำหน่ายของประเทศไทยให้เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา โดยเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีการที่นำเสนอโดยใช้ ANFIS ช่วยคำนวณกับวิธีการตามแนวคิดเดิม

7.1 การทดสอบรูปแบบการกำหนดขาเข้าของ ANFIS ที่แตกต่างกัน

จากสมมติฐานในบทที่ผ่านมาว่าการกำหนดจำนวนขาเข้าของ ANFIS ที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนและความคลาดเคลื่อนของ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอน เพื่อตรวจสอบสมมติฐานนี้ จึงได้ออกแบบการทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนและระยะเวลาในการฝึกสอนของ ANFIS ที่มีการกำหนดขาเข้าแตกต่างกัน เพื่อใช้ในการตัดสินใจนำรูปแบบที่ดีที่สุดไปใช้งานต่อไป

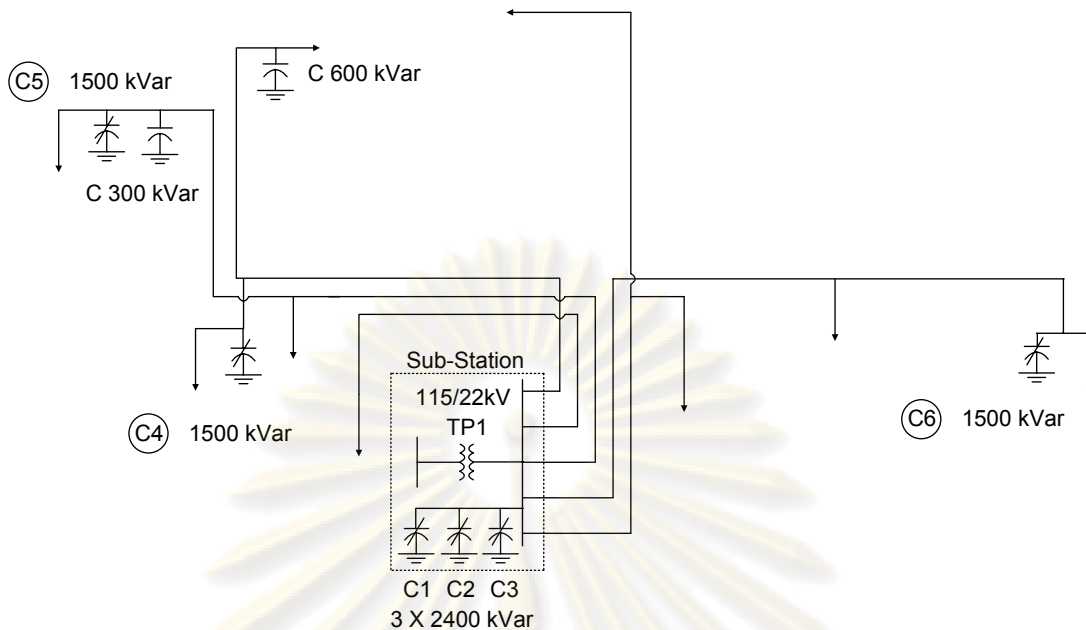
7.1.1 ระบบจำหน่ายที่ใช้ทดสอบและการสร้างข้อมูลตัวอย่าง

การทดสอบนี้และการทดสอบอื่น ๆ ในบทนี้จะใช้ระบบจำหน่ายของประเทศไทย ซึ่งเป็นระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 1 ภาคกลาง ที่สถานีไฟฟ้านวนคร 3 โดยทำการศึกษาในระบบจำหน่ายหลังหม้อแปลง TP1 ขนาด 50 MVA ซึ่งจ่ายโหลดให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าในสายป้อนที่ 1 ถึง สายป้อนที่ 5 โดยมีลักษณะระบบจำหน่ายดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ระบบจำหน่ายทดสอบของสถานีไฟฟ้านวนคร 3

จากรูป 7.1 จะเห็นว่าในระบบจะมีส่วนประกอบของประกอบด้วยสายป้อนย่อยที่แยกออกจากสายป้อนหลัก (Lateral) ก่อนข้างซับซ้อนและยากต่อการศึกษา จึงทำการยุบระบบจำหน่ายในรูปที่ 7.1 เพื่อให้ง่ายขึ้น โดยมีลักษณะระบบหลังทำการยุบดังรูปที่ 7.2 และทำการเก็บข้อมูลที่สถานีแล้วทำการเฉลี่ยโหลดตามขนาดหม้อแปลงที่ติดตั้งในระบบ โดยสมมติให้ข้อมูลดังกล่าวเป็นโหลดของผู้ใช้ไฟ ตัวอย่างดังตารางที่ ข.7 ในภาคผนวก ซึ่งจะใช้ระบบจำหน่ายดังกล่าวในการศึกษาและทดสอบต่อไปในทุกการทดสอบในบทนี้



รูปที่ 7.2 ระบบจำหน่ายทดสอบที่ได้จากการยุบระบบลง

7.1.2 การสร้าง ANFIS สำหรับการทดสอบ

ในการสร้าง ANFIS ขึ้นมาสำหรับการประยุกต์ใช้ในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายนั้น จำเป็นจะต้องสร้างชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกสอน ANFIS ให้เหมาะสมและสอดคล้องกับระบบจำหน่ายที่ใช้สำหรับทดสอบ ซึ่งการกำหนดค่าเข้าให้กับ ANFIS ที่จะศึกษาในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น 4 รูปแบบแตกต่างกันออกไป ดังที่ได้นำเสนอไปแล้วในหัวข้อ 6.2 โดยทำการแบ่งระดับโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบทดสอบออกเป็นหลาย ๆ ระดับเพื่อใช้ในการฝึกสอนต่อไป โดยแบ่งระดับแรงดัน, กำลังไฟฟ้า และตัวประกอบกำลัง 12 ระดับ ซึ่งจะมีข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนทั้งหมด 1,728 ข้อมูล

สำหรับการหาค่าขาออกสำหรับใช้ในการฝึกสอน ANFIS นั้น หาได้จากการทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่แต่ละข้อมูลขาเข้า โดยลองทำการปรับเปลี่ยนสถานะการทำงานของหม้อแปลงและสวิตซ์ตัวเก็บประจุในแต่ละกรณี และทำการเก็บค่าสถานะที่เป็นไปได้โดยไม่ละเมิดข้อกำหนดทางด้านคุณภาพไฟฟ้าของระบบจำหน่าย 22 kV ($20.9 \text{ kV} \leq V \leq 23.1 \text{ kV}$) ไปหาค่าเฉลี่ยออกมาเป็นค่าขาออกของ ANFIS ต่อไป

ในการหาค่าเฉลี่ยจากการเก็บค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ที่เป็นไปได้ นั้น จะใช้การหาค่าเฉลี่ยจากค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ซึ่งทำให้คุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่ายอยู่ใน

เกณฑ์ดี โดยถูกกำหนดจากค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ซึ่งใช้ลักษณะเดียวกันกับหัวข้อ 5.2 โดยค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ดังกล่าวจะบ่งบอกถึงคุณภาพไฟฟ้า ดัง (7.1)

$$F(i)_{\text{obj}} = \mu(i)_{\Delta V_{2(i)}} + \mu(i)_{p.f.(i)} + \mu(i)_{\text{loss}(i)} \quad (7.1)$$

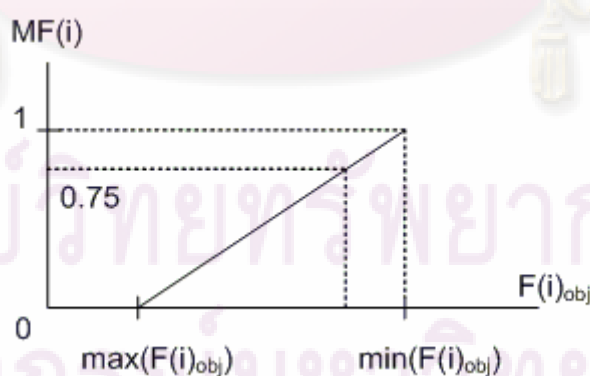
โดย

$\mu_{\Delta V_{2(i)}}$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนไปจากค่าของระบบในบัสแรงต่ำของหม้อแปลง ในสถานะที่ i

$\mu_{p.f.(i)}$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าตัวประกอบกำลังที่สถานีไฟฟ้า ในสถานะที่ i

$\mu_{\text{loss}(i)}$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย ในสถานะที่ i

จาก (7.1) จะเห็นว่าค่าฟuzzyเซตในสถานะใด ๆ ที่มีค่าน้อยที่สุดจะบ่งชี้ถึงสถานะการทำงานของอุปกรณ์ในสถานะนั้น ๆ ที่ทำให้คุณภาพไฟฟ้าดีที่สุด ส่วนค่าฟuzzyเซตในสถานะใด ๆ ที่มีค่ามากที่สุดจะบ่งชี้ถึงสถานะการทำงานของอุปกรณ์ในสถานะนั้น ๆ ที่ทำให้คุณภาพไฟฟ้าแย่มากที่สุดที่เป็นไปได้ ในแต่ละขาเข้าที่ใช้ฝึกสอน โดยจากค่าฟuzzyเซตใน (7.1) ในแต่ละสถานะที่เป็นไปได้ของขาเข้าใด ๆ จะถูกนำมาใช้หาเฉลี่ยของสถานะการทำงานของอุปกรณ์จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังรูป 7.3 ซึ่งถูกกำหนดด้วย (7.2)



รูปที่ 7.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าฟuzzyเซตใน (7.1)

$$MF(i) = \frac{\max(F(i)_{\text{obj}}) - F(i)_{\text{obj}}}{\max(F(i)_{\text{obj}}) - \min(F(i)_{\text{obj}})} \quad (7.2)$$

เมื่อได้ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้จาก (7.2) จะถูกนำมาใช้เป็นค่ากำหนดในการหาค่าเฉลี่ยของสถานะการทำงานของอุปกรณ์ในระบบ โดยกำหนดให้ค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ที่มีค่าค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมากกว่าหรือเท่ากับ 0.75 ซึ่งทำให้ระบบมีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ดี จะถูกนำมาเป็นข้อมูลในการหาค่าเฉลี่ยโดยใช้การหาค่าเฉลี่ยจากการถ่วงน้ำหนักดัง (7.3) เพื่อกำหนดให้เป็นข้อมูลสำหรับขาออกของ ANFIS ต่อไป

$$Output(k) = \frac{\sum_{i=1}^j MF(i) \times output(i)}{\sum_{i=1}^j MF(i)} \quad (7.3)$$

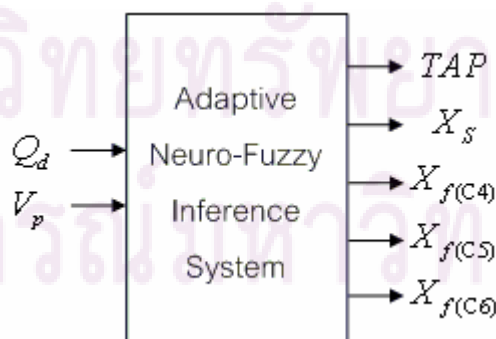
โดย	$Output(k)$	ค่าขาออกของชุดข้อมูลฝึกสอนที่ k
	$MF(i)$	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอุปกรณ์ในสถานะที่ i ของข้อมูลฝึกสอนชุดที่ k
	$output(i)$	ค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ในสถานะที่ i ของข้อมูลฝึกสอนชุดที่ k

7.1.3 รูปแบบขาเข้าในการทดสอบ

ในการทดสอบจะใช้รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอในบทที่ผ่านมา โดยแบ่งรูปแบบขาเข้าที่ใช้ทดสอบ รูปแบบดังนี้

- รูปแบบที่ 1

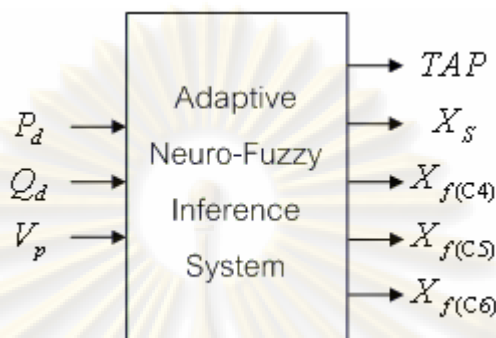
กำหนดขาเข้าจาก ขนาดแรงดันที่บัสทางด้านแรงสูงของสถานีไฟฟ้า (V_p) และ กำลังไฟฟ้าริแอกทีฟรวมของผู้ใช้ไฟทั้งหมด (Q_d)



รูปที่ 7.4 รูปแบบที่ 1 ของ ANFIS ที่สถานีไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

- รูปแบบที่ 2

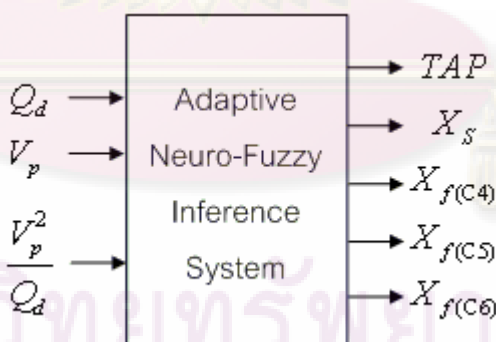
กำหนดขาเข้าจาก ขนาดแรงดันที่บัสทางด้านแรงสูงของสถานีไฟฟ้า (V_p), ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง (P_d) และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟรวมของผู้ใช้ไฟทั้งหมด (Q_d)



รูปที่ 7.5 รูปแบบที่ 2 ของ ANFIS ในระบบจำหน่ายที่ใช้ทดสอบ

- รูปแบบที่ 3

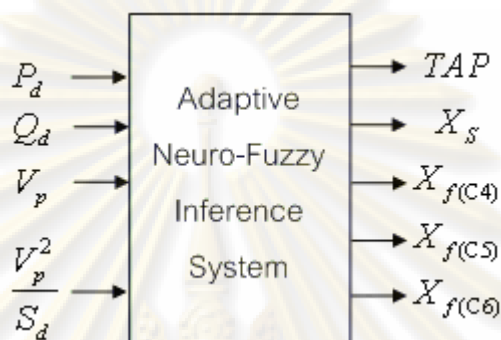
กำหนดขาเข้าจาก ขนาดแรงดันที่บัสทางด้านแรงสูงของสถานีไฟฟ้า (V_p), ปริมาณกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟรวมของผู้ใช้ไฟทั้งหมด (Q_d) และอัตราส่วนของขนาดแรงดันกำลังสองต่อปริมาณกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟรวมของผู้ใช้ไฟทั้งหมด ($\frac{V_p^2}{Q_d}$)



รูปที่ 7.6 รูปแบบที่ 3 ของ ANFIS ในระบบจำหน่ายที่ใช้ทดสอบ

- รูปแบบที่ 4

กำหนดขาเข้าจาก ขนาดแรงดันที่บัสทางด้านแรงสูงของสถานีไฟฟ้า (V_p), ขนาดกำลังไฟฟ้าจริง (P_d), กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรวมของผู้ใช้ไฟทั้งหมด (Q_d) และอัตราส่วนของขนาดแรงดันกำลังสองต่อขนาดโวลตรวมเป็น MVA ของระบบ $\left(\frac{V_p^2}{S_d}\right)$



รูปที่ 7.7 รูปแบบที่ 4 ของ ANFIS ในระบบจำหน่ายที่ใช้ทดสอบ

หลังจากที่ได้ ANFIS ทั้ง 4 ชุดแล้วจึงนำข้อมูลฝึกสอนที่เตรียมไว้ทั้ง 3 ชุดไปฝึกสอน ANFIS โดยใช้ Fuzzy Logic Toolbox ฝึกสอนแบบไฮบริดจำนวน 10 รอบ โดยในแต่ละรอบจะมีการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองกำลังสองฝึกสอนเฉลี่ย (Root Mean Square Error) หรือ RMSE ของค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ที่ได้จากการป้อนข้อมูลสู่ ANFIS เทียบกับค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ที่เป็นค่าตัวอย่างในข้อมูลฝึกสอน ค่า RMSE ในแต่ละรอบของการฝึกสอนแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.1 ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบหัวข้อที่ 7.1

ANFIS	จำนวนขาเข้า	จำนวนขาออก	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	จำนวนพีชชีเซต	จำนวนกฎ	จำนวนพารามิเตอร์
รูปแบบที่ 1	2	5	เกาส์เซียน	4 4	16	64
รูปแบบที่ 2	3	5	เกาส์เซียน	4 4 4	64	280
รูปแบบที่ 3	3	5	เกาส์เซียน	4 4 4	64	280
รูปแบบที่ 4	4	5	เกาส์เซียน	4 4 4 4	256	1312

ตารางที่ 7.2 ค่า RMSE ของตำแหน่งเท้าที่เปลี่ยนจากการฝึกสอนแต่ละรอบ

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
รูปแบบที่ 1	1.1669	1.1635	1.1643	1.1671	1.1701	1.1706	1.1714	1.1707	1.1685	1.1680
รูปแบบที่ 2	0.7980	0.8179	0.8000	0.8173	0.8180	0.8054	0.8072	0.8147	0.8081	0.8065
รูปแบบที่ 3	1.1450	1.1552	1.1696	1.1690	1.1620	1.1649	1.1359	1.1537	1.1628	1.1523
รูปแบบที่ 4	0.7683	0.7761	0.7822	0.7865	0.7931	0.7919	0.7777	0.7537	0.7496	0.7859

ตารางที่ 7.3 ค่า RMSE ของค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีจากการฝึกสอนแต่ละรอบ

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
รูปแบบที่ 1	0.3491	0.3485	0.3485	0.3505	0.3517	0.3499	0.3507	0.3522	0.3517	0.3491
รูปแบบที่ 2	0.2589	0.2561	0.2629	0.2600	0.2564	0.2599	0.2603	0.2614	0.2705	0.2673
รูปแบบที่ 3	0.3268	0.3295	0.3327	0.3347	0.3291	0.3298	0.3278	0.3308	0.3334	0.3328
รูปแบบที่ 4	0.2297	0.2292	0.2457	0.2417	0.2454	0.2425	0.2354	0.2382	0.2426	0.2420

ตารางที่ 7.4 ค่า RMSE ของค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ที่สายป้อนจากการฝึกสอนแต่ละรอบ

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
รูปแบบที่ 1	0.0948	0.0933	0.0946	0.0941	0.0945	0.0952	0.0949	0.0945	0.0950	0.0952
รูปแบบที่ 2	0.0856	0.0833	0.0845	0.0859	0.0861	0.0834	0.0848	0.0861	0.0859	0.0861
รูปแบบที่ 3	0.0905	0.0903	0.0911	0.0915	0.0888	0.0895	0.0904	0.0915	0.0894	0.0907
รูปแบบที่ 4	0.0808	0.0787	0.0806	0.0808	0.0813	0.0817	0.0837	0.0829	0.0816	0.0823

ตารางที่ 7.5 ค่า RMSE ของค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ที่สายป้อนจากการฝึกสอนแต่ละรอบ

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
รูปแบบที่ 1	0.0922	0.0916	0.0918	0.0917	0.0922	0.0924	0.0927	0.0923	0.0923	0.0923
รูปแบบที่ 2	0.0831	0.0853	0.0845	0.0832	0.0832	0.0834	0.0827	0.0829	0.0827	0.0833
รูปแบบที่ 3	0.0877	0.0888	0.0871	0.0874	0.0898	0.0883	0.0889	0.0880	0.0890	0.0886
รูปแบบที่ 4	0.0785	0.0792	0.0793	0.0797	0.0800	0.0809	0.0797	0.0825	0.0823	0.0828

ตารางที่ 7.6 ค่า RMSE ของค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ที่สายป้อนจากการฝึกสอนแต่ละรอบ

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
รูปแบบที่ 1	0.1205	0.1206	0.1210	0.1206	0.1214	0.1209	0.1211	0.1206	0.1203	0.1210
รูปแบบที่ 2	0.0827	0.0836	0.0818	0.0832	0.0829	0.0827	0.0826	0.0836	0.0834	0.0843
รูปแบบที่ 3	0.1167	0.1181	0.1155	0.1167	0.1169	0.1181	0.1181	0.1173	0.1172	0.1165
รูปแบบที่ 4	0.0771	0.0773	0.0775	0.0771	0.0757	0.0787	0.0757	0.0785	0.0776	0.0771

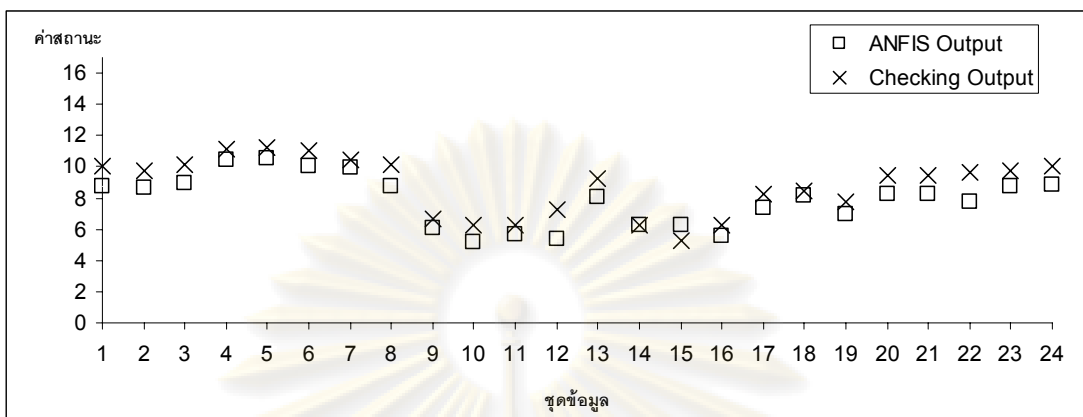
ในการนำ ANFIS ไปใช้งานจะเลือกใช้ ANFIS ที่ได้รับการฝึกสอนในรอบที่ให้ค่า RMSE น้อยที่สุดไปใช้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะมีการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ค่าออกที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับกับค่าขาออกตัวอย่างของข้อมูลฝึกสอน อย่างไรก็ตามในการตรวจสอบการคำนวณค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายของ ANFIS จะใช้ข้อมูลตรวจสอบที่เตรียมไว้ซึ่งมีขาเข้าแตกต่างจากขาเข้าของข้อมูลฝึกสอน เมื่อป้อนข้อมูลตรวจสอบให้กับ ANFIS ทั้ง 4 รูปแบบ นำค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ของข้อมูลตรวจสอบ โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (mean absolute error) เป็นดัชนีนี้ใช้เพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ที่ได้จาก ANFIS กับค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ของข้อมูลตรวจสอบที่ได้จากวิธีการทำโหนดโพลว์แล้วหาค่าเฉลี่ยสถานะการทำงานของอุปกรณ์จากวิธีการในหัวข้อ 7.1.2 ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Output_{i,ANFIS} - Output_{i,PF}| \quad (7.4)$$

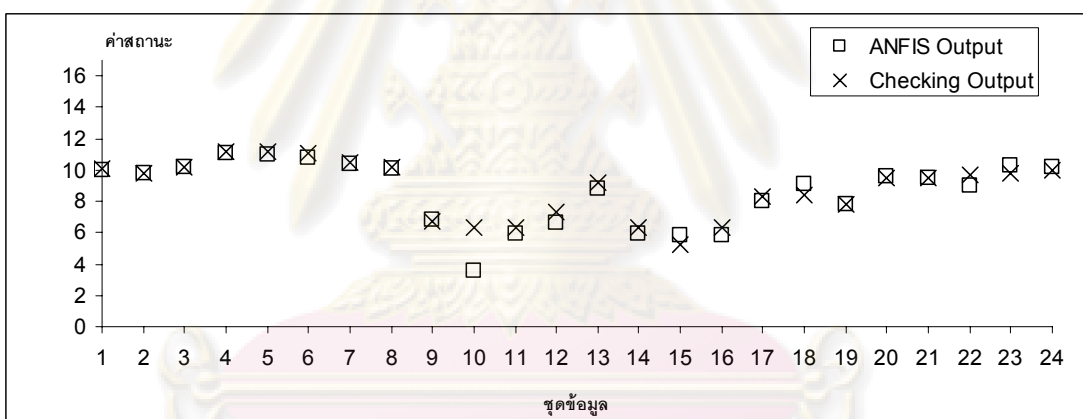
7.1.4 ผลการทดสอบ

หลังจากนำ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนแล้วมาคำนวณสถานะการทำงานของตัวประจุและตำแหน่งแท็บหม้อแปลง จากข้อมูลขาเข้าตรวจสอบซึ่งเป็นระดับโหลดตามเส้นโค้งโหลดรายชั่วโมง ของสถานีไฟฟ้านคร วันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551 มาทำการศึกษา ซึ่งจะใช้ข้อมูลโหลดดังกล่าวในทุก ๆ การทดสอบในทุกหัวข้อในบทนี้ โดยที่ค่าสถานะการทำงานของตัวประจุและตำแหน่งแท็บหม้อแปลง ANFIS ทั้ง 4 รูปแบบเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีการทำโหนดโพลว์แล้วหาค่าเฉลี่ยสถานะการทำงานของอุปกรณ์จากวิธีการในหัวข้อ 7.1.2 แสดงได้ดังต่อไปนี้

- ผลการคำนวณสถานะตำแหน่งแท็บหม้อแปลง

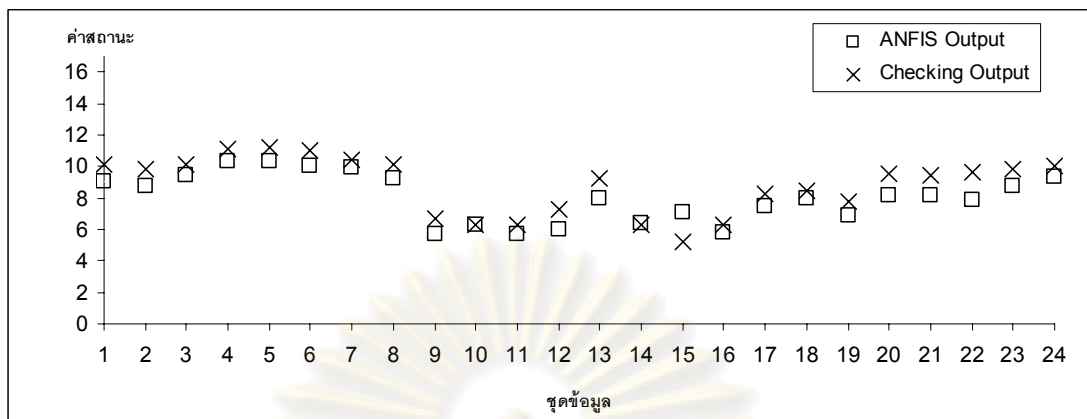


รูปที่ 7.8 ค่าตำแหน่งแท็บหม้อแปลงที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้เข้ารูปแบบที่ 1 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

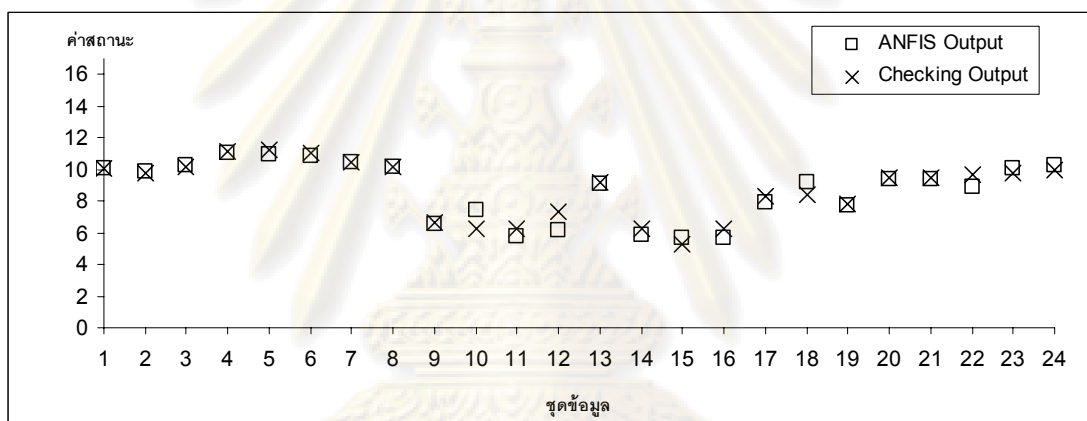


รูปที่ 7.9 ค่าตำแหน่งแท็บหม้อแปลงที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้เข้ารูปแบบที่ 2 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



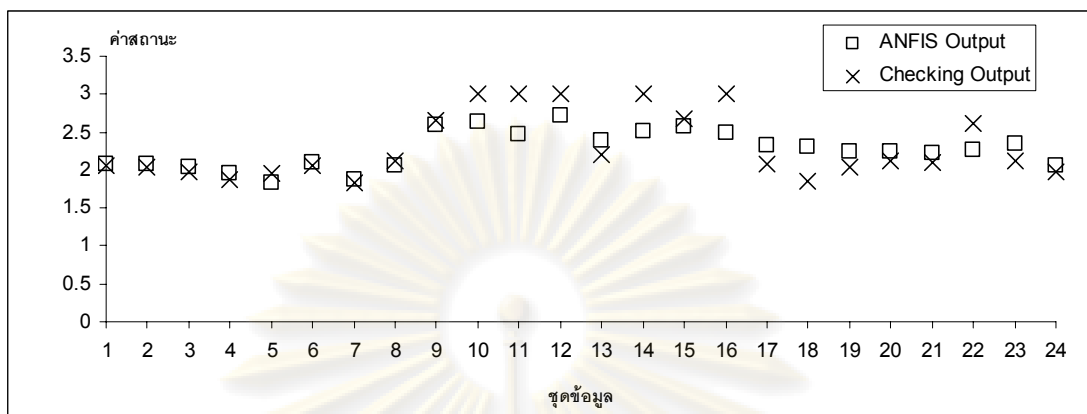
รูปที่ 7.10 ค่าตำแหน่งแท็บหม้อแปลงที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 3 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ



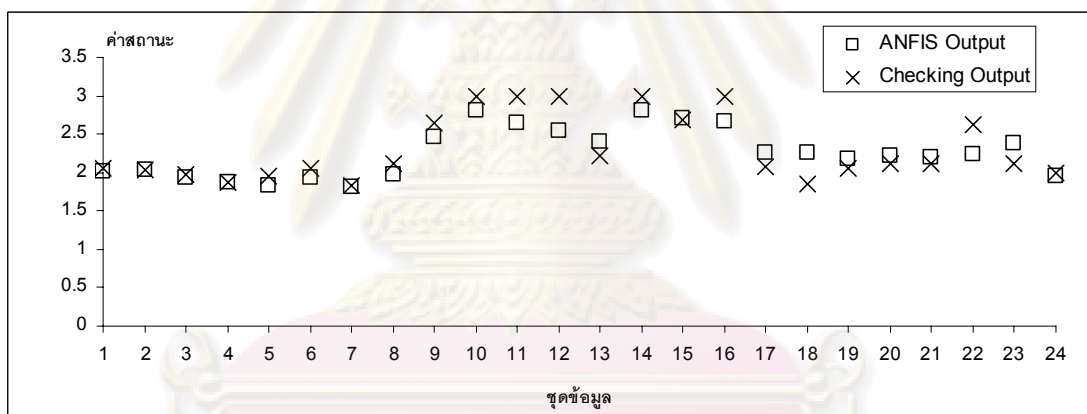
รูปที่ 7.11 ค่าตำแหน่งแท็บหม้อแปลงที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 4 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ผลการคำนวณค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานี

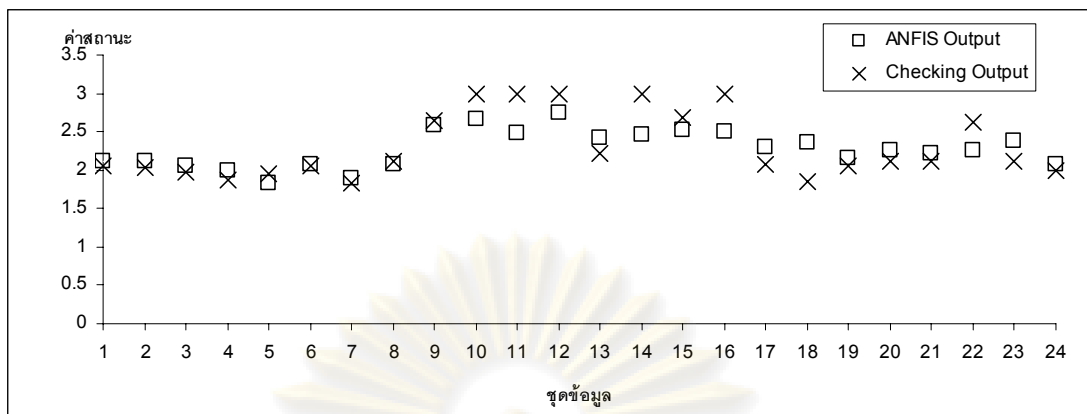


รูปที่ 7.12 ค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 1 ของการทดสอบ ในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

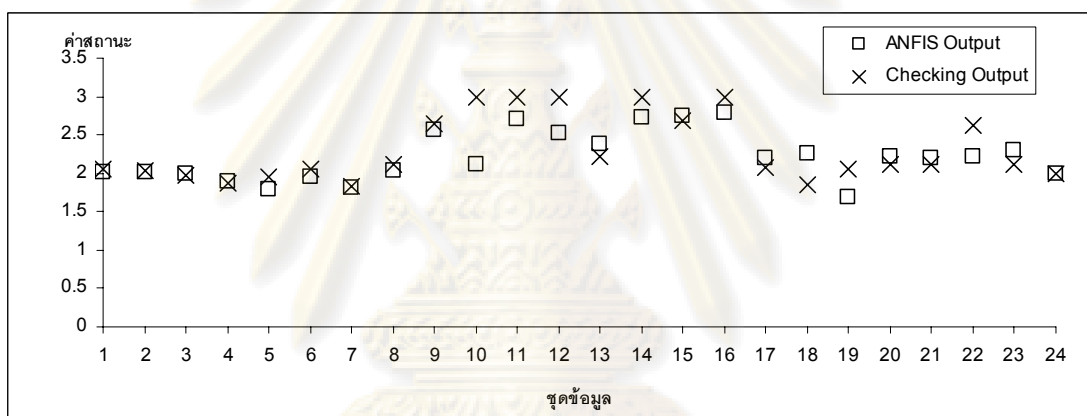


รูปที่ 7.13 ค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 2 ของการทดสอบ ในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



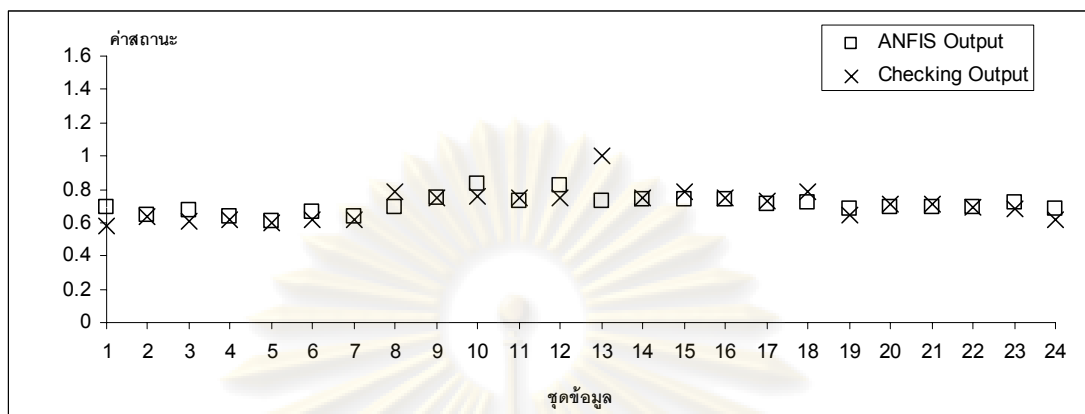
รูปที่ 7.14 ค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 3 ของการทดสอบ ในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ



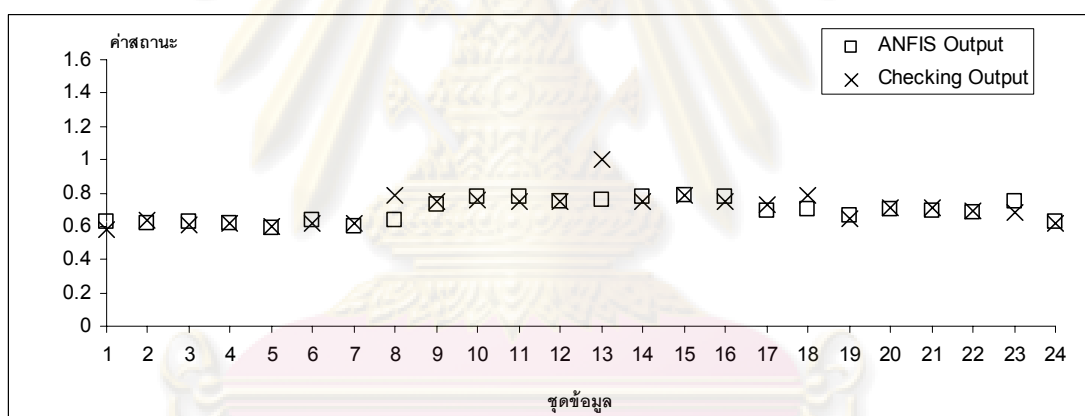
รูปที่ 7.15 ค่าตำแหน่งแท็บหม้อแปลงที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 4 ของการทดสอบใน หัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ผลการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ในสายป้อน

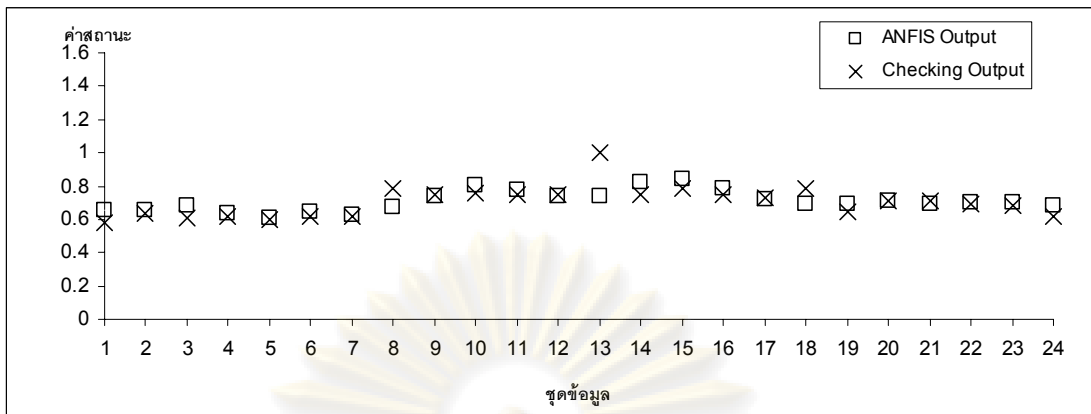


รูปที่ 7.16 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 1 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

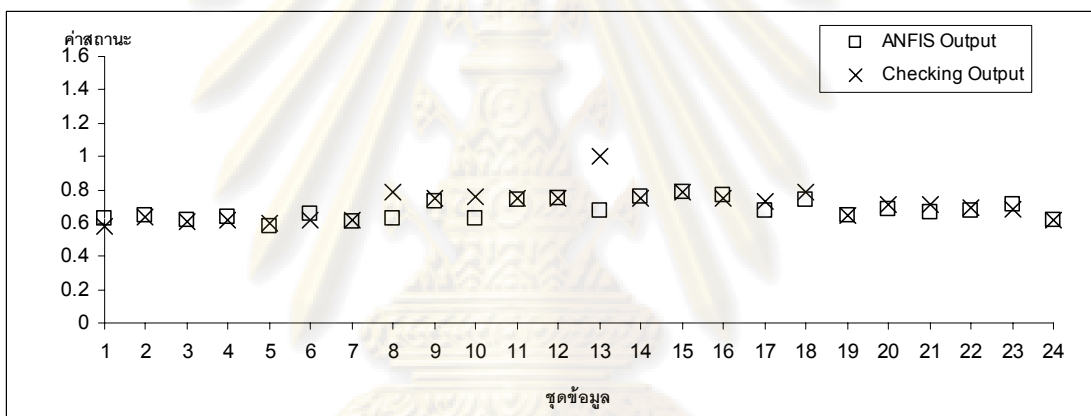


รูปที่ 7.17 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 2 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



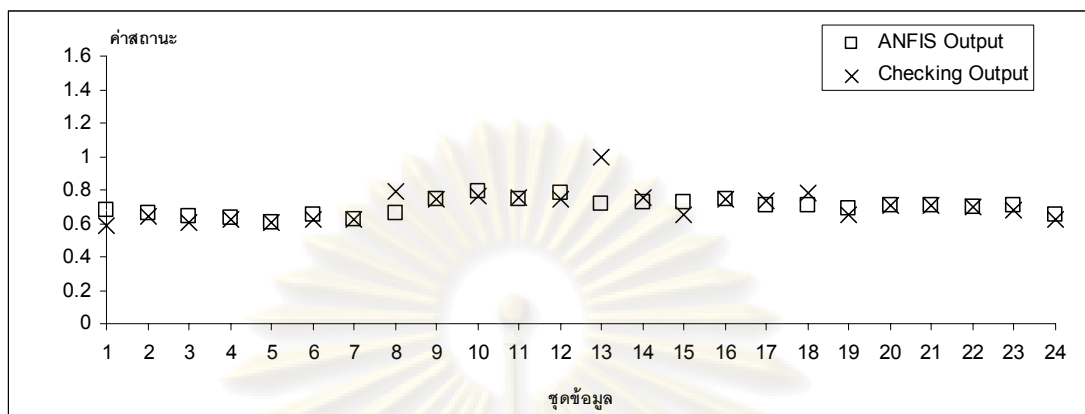
รูปที่ 7.18 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 3 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ



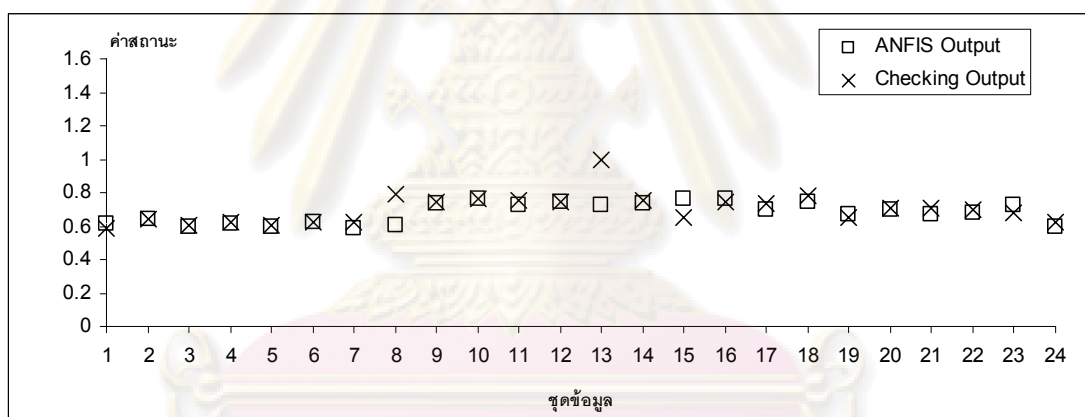
รูปที่ 7.19 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 4 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ผลการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ในสายป้อน

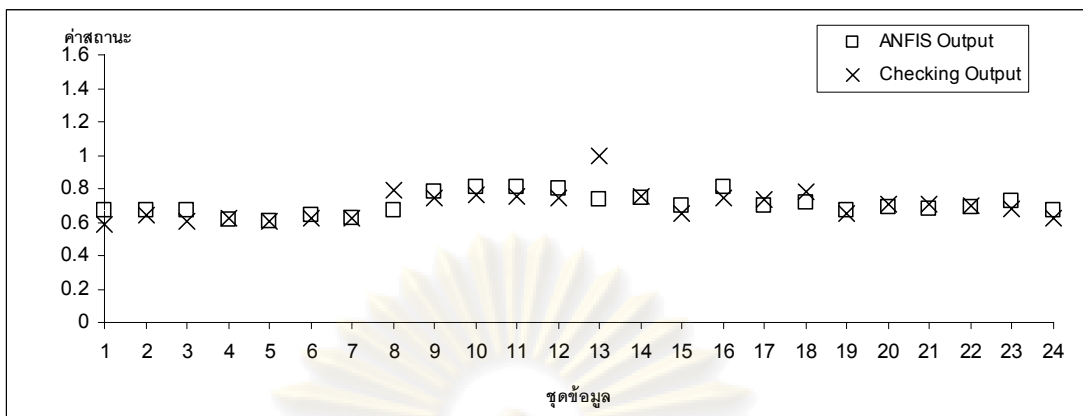


รูปที่ 7.20 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้หาเข้ารูปแบบที่ 1 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

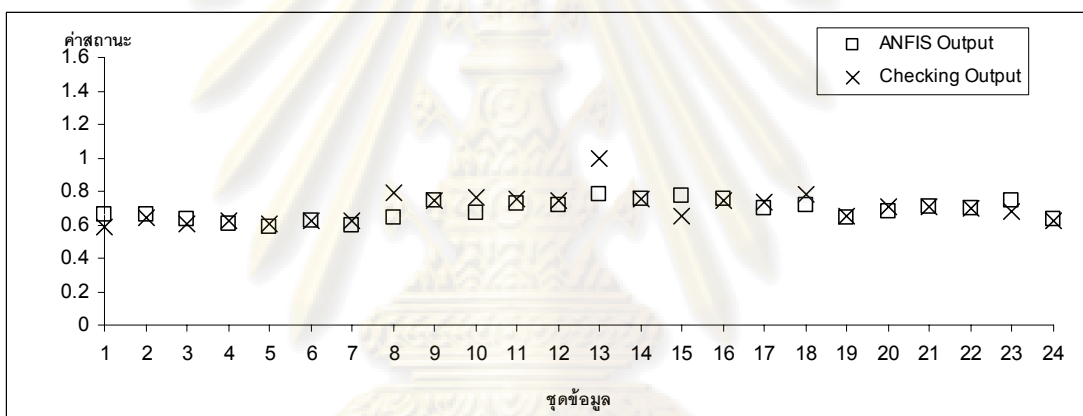


รูปที่ 7.21 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้หาเข้ารูปแบบที่ 2 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



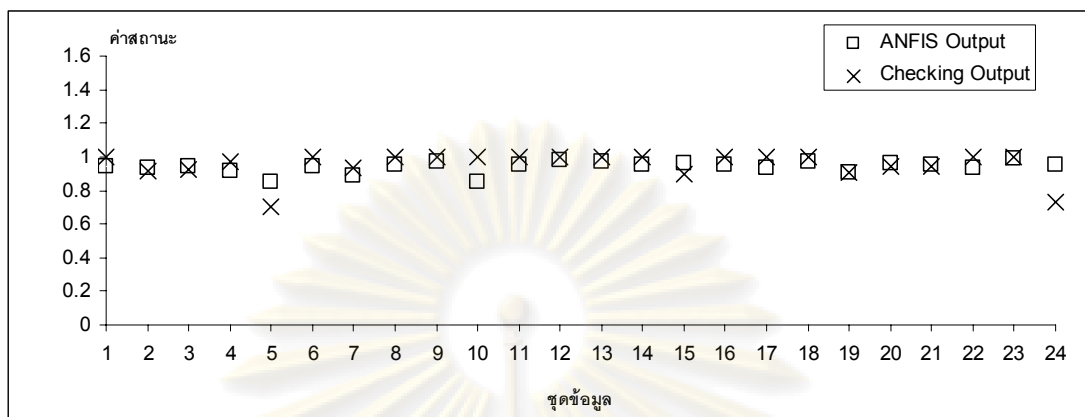
รูปที่ 7.22 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 3 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ



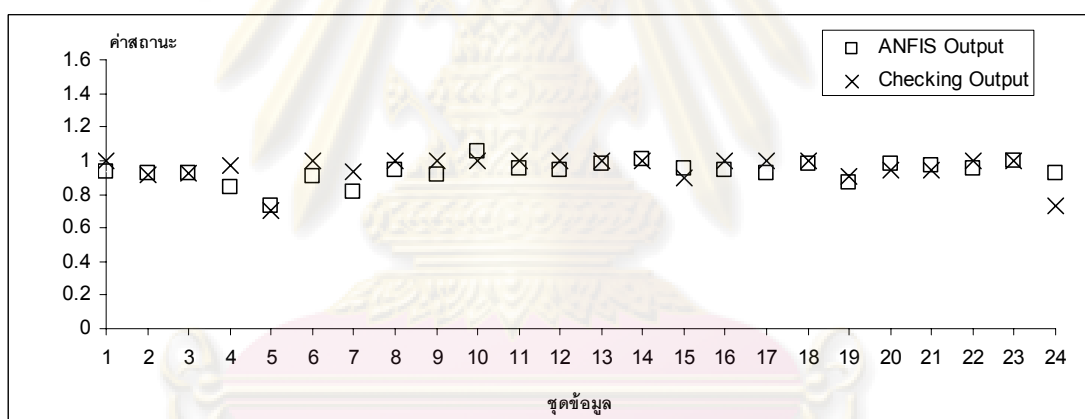
รูปที่ 7.23 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 4 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ผลการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_c) ในสายป้อน

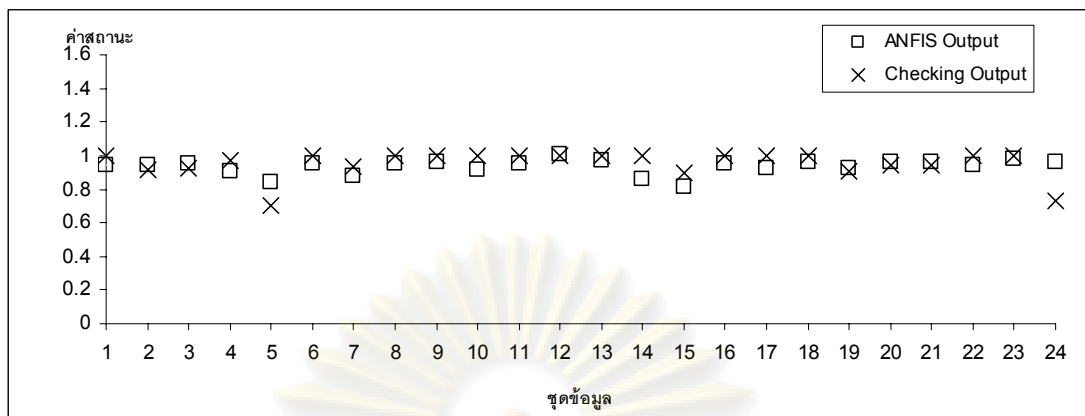


รูปที่ 7.24 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_c) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้เข้ารูปแบบที่ 1 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

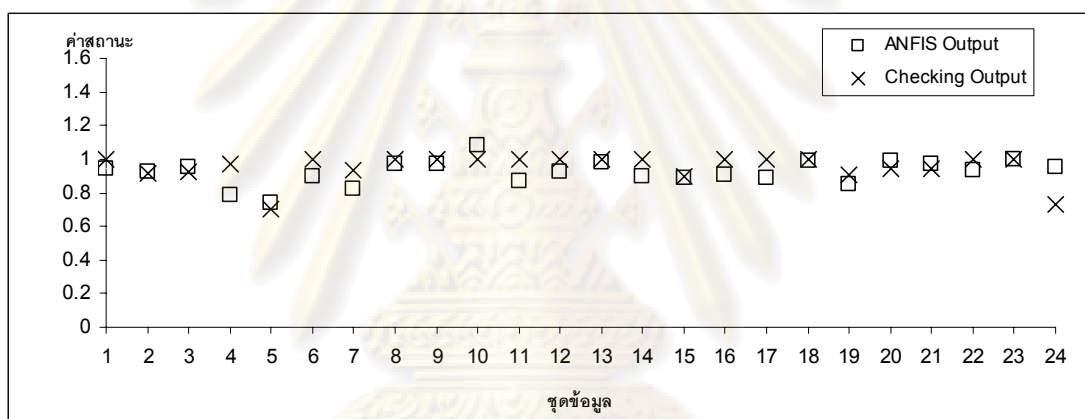


รูปที่ 7.25 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_c) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้เข้ารูปแบบที่ 2 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.26 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_0) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 3 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ



รูปที่ 7.27 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_0) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 4 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

นำผลได้จากขาออกของ ANFIS มาวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนตามโดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (mean absolute error) เป็นดัชนีชี้วัดในการทดสอบ ANFIS ทั้ง 4 รูปแบบแสดงได้ดังตาราง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.7 ผลการทดสอบการคำนวณสถานะตำแหน่งเท้าปมื่อแปลง

	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	4.86	121.66	98.83	3134.95
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.02	0.02
<i>MAE</i>	0.9793	0.3709	0.9106	0.3214

ตารางที่ 7.8 ผลการทดสอบการคำนวณค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานี

	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	4.86	113.62	67.36	3014.36
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.02	0.02
<i>MAE</i>	0.1991	0.1665	0.2058	0.1905

ตารางที่ 7.9 ผลการทดสอบการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ที่สายป้อน

	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	4.84	113.13	72.73	3093.99
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.02	0.02
<i>MAE</i>	0.0467	0.0372	0.0467	0.0440

ตารางที่ 7.10 ผลการทดสอบการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ที่สายป้อน

	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	4.83	114.55	112.14	3092.81
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.02	0.02
<i>MAE</i>	0.0414	0.0390	0.0478	0.0436

ตารางที่ 7.11 ผลการทดสอบการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ที่สายป้อน

	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	4.80	117.13	111.06	3164.80
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.02	0.02
<i>MAE</i>	0.0541	0.0552	0.0582	0.0696

7.1.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจะพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย พบว่า ANFIS ทั้ง 4 รูปแบบให้ค่า *MAE* ใกล้เคียงกันในการคำนวณสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4, C_5, C_6) ในสายป้อนของระบบจำหน่าย ซึ่งในระบบจำหน่ายนั้นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ก็คือ ค่าตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงและค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานี ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากกว่าสถานะของตัวเก็บประจุในสายป้อน

โดยถ้ามองที่ค่า *MAE* ของค่าตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงและค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานี ที่ได้จากการฝึกสอนของ ANFIS ทั้ง 4 รูปแบบจะเห็นว่า ANFIS รูปแบบที่ 1 ให้ค่า *MAE* ในการคำนวณค่าตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงมากที่สุด และ ANFIS รูปแบบที่ 3 ให้ค่า *MAE* ในการคำนวณค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีมากที่สุด ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นว่า ANFIS ในรูปแบบที่ 2 และ 4 จะให้ค่า *MAE* ในการคำนวณค่าตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงน้อยที่สุด

หากทำการพิจารณาเลือก ANFIS ไปใช้งานนั้นจะเห็นว่าควรนำ ANFIS ในรูปแบบที่ 4 ไปใช้ เนื่องจากให้ค่า *MAE* น้อย ในการคำนวณค่าตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงและค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานี ถึงแม้ว่าค่า *MAE* ในการคำนวณค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีใน ANFIS รูปแบบที่ 4 จะมีค่ามากกว่า ANFIS รูปแบบที่ 2 อยู่เล็กน้อย แต่ถ้าพิจารณาถึงการคำนวณค่าตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงจะเห็นว่า ANFIS รูปแบบที่ 4 จะให้ค่าน้อยกว่า ANFIS รูปแบบที่ 2 อยู่พอสมควร

และหากเปรียบเทียบเวลาในการฝึกสอน ANFIS พบว่าการเพิ่มขาเข้าให้แก่ ANFIS จะใช้เวลาในการฝึกสอนมากขึ้นทวีคูณ ANFIS อย่งไรก็ตาม ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะใช้เวลาในการคำนวณน้อยมาก

7.1.6 สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการกำหนดขาเข้ารูปแบบที่ 4 สามารถทำการคำนวณ ค่าสถานะของอุปกรณ์ด้วย ANFIS ได้ โดยการกำหนดขาเข้าที่สะท้อนถึงข้อมูลของระบบจำหน่ายทั้งหมดจะทำให้การคำนวณค่าสถานะของอุปกรณ์มีความแม่นยำขึ้น อย่งไรก็ตามการกำหนดขาเข้าที่มากขึ้นจะส่งผลให้การคำนวณต้องใช้เวลามากขึ้นเป็นทวีคูณ แต่หากนำ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนมาใช้งานใช้เวลาในการคำนวณน้อยมาก

7.2 การทดสอบชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ต่างกันในการคำนวณสถานะการทำงานของอุปกรณ์

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของค่าสถานะของอุปกรณ์ที่คำนวณได้จาก ANFIS ในกรณีที่กำหนดชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแตกต่างกัน โดยใช้ระบบจำหน่ายทดสอบกับวิธีการสร้าง ANFIS เพื่อทดสอบตามหัวข้อ 7.1.1 และ 7.1.2 ตามลำดับ

7.2.1 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้ในการทดสอบ

กำหนดให้ ANFIS จำนวน 3 ชุด ใช้รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอมีขาเข้ารูปแบบเดียวกันกับรูปแบบที่ 4 ของการทดสอบหัวข้อ 7.1 โดย ANFIS แต่ละชุดจะกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซตที่ขาเข้าแตกต่างกัน โดยฟังก์ชันที่ใช้ประกอบด้วย

- 1.) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูประฆัง (Bell MFs)
- 2.) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน (Gaussian MFs)
- 3.) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบผลต่างเกาส์เซียน (Gaussian2 MFs)

7.2.2 การสร้าง ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบ

ใช้วิธีการเช่นกับในหัวข้อ 7.1.2 โดยมีข้อมูลของ ANFIS แต่ละชุดแสดงดังตาราง

ตารางที่ 7.12 ANFIS ที่ใช้การทดสอบในการทดสอบหัวข้อที่ 7.2

ANFIS	จำนวนขาเข้า	จำนวนขาออก	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	จำนวนฟuzzyเซต	จำนวนกฎ	จำนวนพารามิเตอร์
ANFIS1	3	1	ระฆัง	4 4 4 4	256	1328
ANFIS2	3	1	เกาส์เซียน	4 4 4 4	256	1312
ANFIS3	3	1	ผลต่างเกาส์เซียน	4 4 4 4	256	1344

หลังจากที่ได้ ANFIS ทั้ง 3 ชุดแล้วจึงนำข้อมูลฝึกสอนที่เตรียมไว้ไปฝึกสอน ANFIS ด้วย Fuzzy Logic Toolbox โดยฝึกสอนแบบไฮบริดจำนวน 10 รอบ ค่า RMSE ที่ได้ในแต่ละรอบแสดงในตาราง

ตารางที่ 7.13 ค่า RMSE ของตำแหน่งเท้าปมื่อแปลงจากการฝึกสอนแต่ละรอบ

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ANFIS1	0.7713	0.7823	0.7541	0.7654	0.7718	0.7805	0.7876	0.7637	0.7732	0.7989
ANFIS2	0.7683	0.7761	0.7822	0.7865	0.7931	0.7919	0.7777	0.7537	0.7496	0.7859
ANFIS3	0.7883	0.7712	0.7930	0.7981	0.7928	0.7828	0.7975	0.8037	0.8060	0.7819

ตารางที่ 7.14 ค่า RMSE ของค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีจากการฝึกสอนแต่ละรอบ

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ANFIS1	0.2288	0.2368	0.2344	0.2407	0.2429	0.2361	0.2362	0.2322	0.2294	0.2351
ANFIS2	0.2297	0.2292	0.2457	0.2417	0.2454	0.2425	0.2354	0.2382	0.2426	0.2420
ANFIS3	0.2327	0.2340	0.2330	0.2347	0.2412	0.2441	0.2396	0.2395	0.2374	0.2474

ตารางที่ 7.15 ค่า RMSE ของค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ที่สายป้อนจากการฝึกสอนแต่ละรอบ

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ANFIS1	0.0811	0.0793	0.0807	0.0798	0.0791	0.0800	0.0829	0.0812	0.0819	0.0820
ANFIS2	0.0808	0.0787	0.0806	0.0808	0.0813	0.0817	0.0837	0.0829	0.0816	0.0823
ANFIS3	0.0826	0.0819	0.0824	0.0820	0.0823	0.0818	0.0818	0.0823	0.0834	0.0814

ตารางที่ 7.16 ค่า RMSE ของค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ที่สายป้อนจากการฝึกสอนแต่ละรอบ

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ANFIS1	0.0781	0.0787	0.0766	0.0782	0.0783	0.0772	0.0787	0.0789	0.0797	0.0810
ANFIS2	0.0785	0.0792	0.0793	0.0797	0.0800	0.0809	0.0797	0.0825	0.0823	0.0828
ANFIS3	0.0792	0.0787	0.0790	0.0792	0.0787	0.0788	0.0791	0.0800	0.0793	0.0788

ตารางที่ 7.17 ค่า RMSE ของค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ที่สายป้อนจากการฝึกสอนแต่ละรอบ

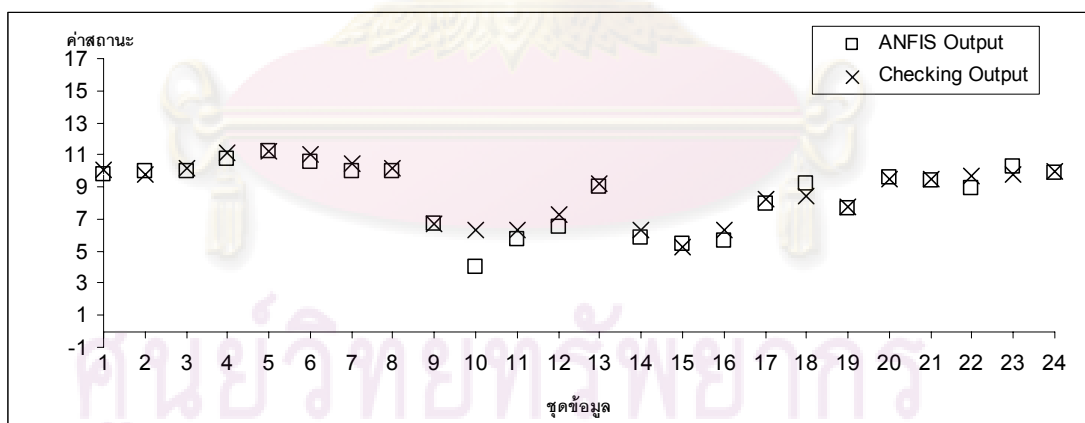
รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ANFIS1	0.0765	0.0788	0.0778	0.0767	0.0761	0.0783	0.0784	0.0764	0.0782	0.0769
ANFIS2	0.0771	0.0773	0.0775	0.0771	0.0757	0.0787	0.0757	0.0785	0.0776	0.0771
ANFIS3	0.0779	0.0772	0.0778	0.0789	0.0785	0.0777	0.0785	0.0793	0.0795	0.0786

ในการนำ ANFIS ไปใช้งานจะเลือกใช้ ANFIS ที่ได้รับการฝึกสอนในรอบที่ให้ค่า RMSE น้อยที่สุดไปใช้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะมีการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ขาออกที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับกับค่าขาออกตัวอย่างของข้อมูลฝึกสอน อย่างไรก็ตามในการตรวจสอบการคำนวณค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายของ ANFIS จะใช้ข้อมูลตรวจสอบที่เตรียมไว้ซึ่งมีขาเข้าแตกต่างจากขาเข้าของข้อมูลฝึกสอน เมื่อป้อนข้อมูลตรวจสอบให้กับ ANFIS ทั้ง 3 ชุด นำค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ของข้อมูลตรวจสอบ โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (mean absolute error) ดัง (7.4) เป็นดัชนีนี้ใช้เพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกันกับในหัวข้อ 7.1.3

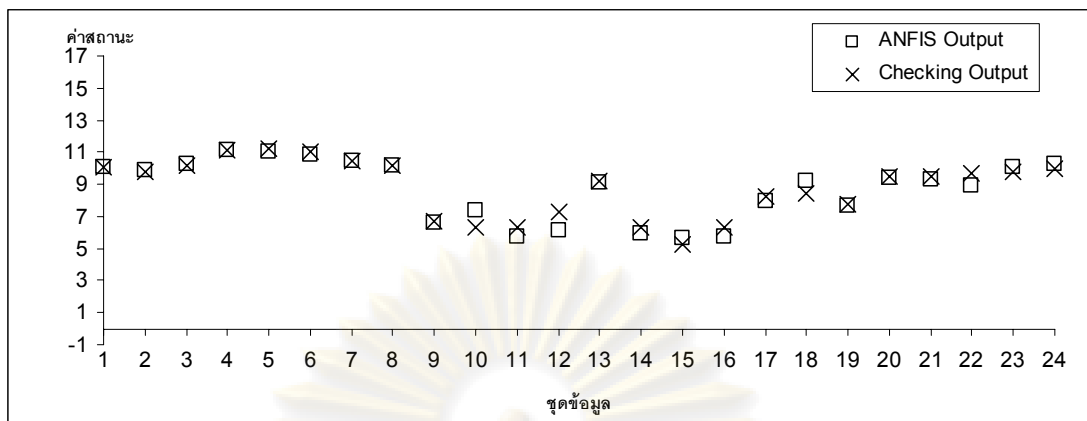
7.2.3 ผลการทดสอบ

นำข้อมูลตรวจสอบป้อนให้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนเรียบร้อยแล้วทั้ง 3 ชุด ค่าสถานะการทำงานของตัวประจุและตำแหน่งแท็บหม้อแปลง ANFIS ทั้ง 3 ชุด เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีการทำโพลด์โพลว์แล้วหาค่าเฉลี่ยสถานะการทำงานของอุปกรณ์จากวิธีการในหัวข้อ 7.1.2 แสดงได้ดังต่อไปนี้

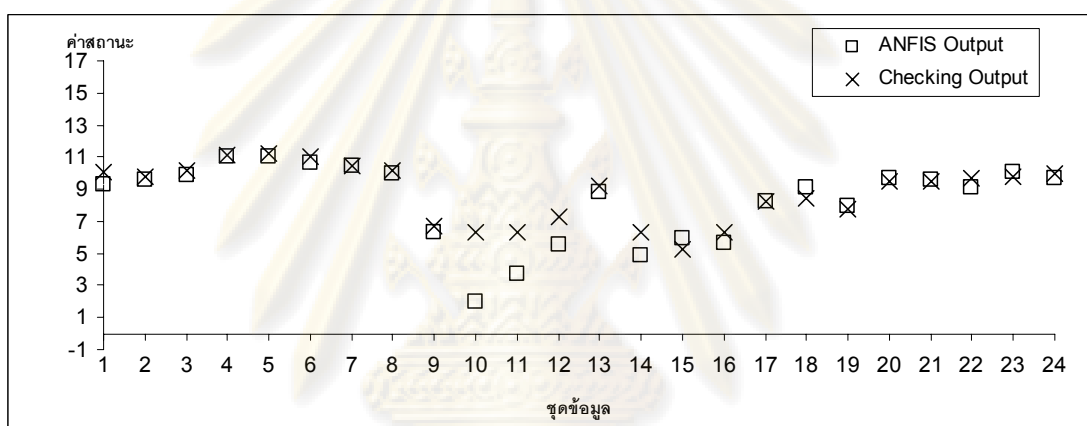
- ผลการคำนวณสถานะตำแหน่งแท็บหม้อแปลง



รูปที่ 7.28 ค่าตำแหน่งแท็บหม้อแปลงที่ได้จาก ANFIS1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ



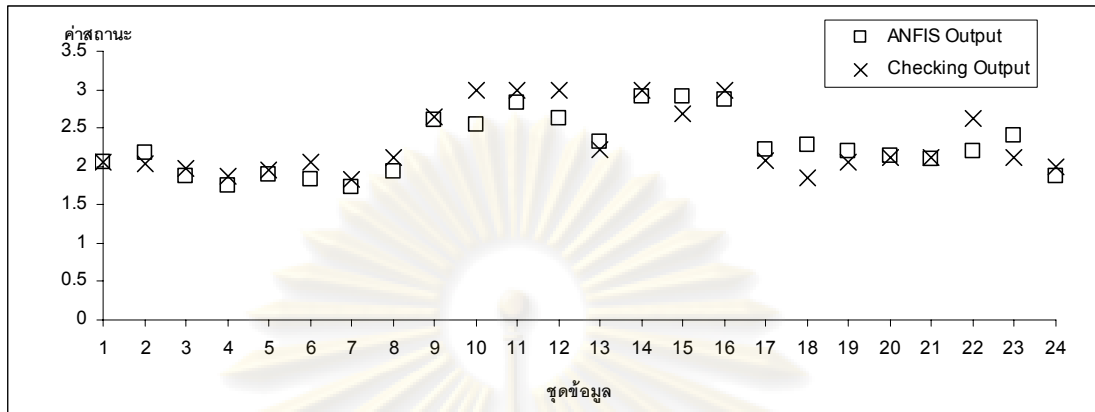
รูปที่ 7.29 ค่าตำแหน่งแท่งหม้อแปลงที่ได้จาก ANFIS2 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ



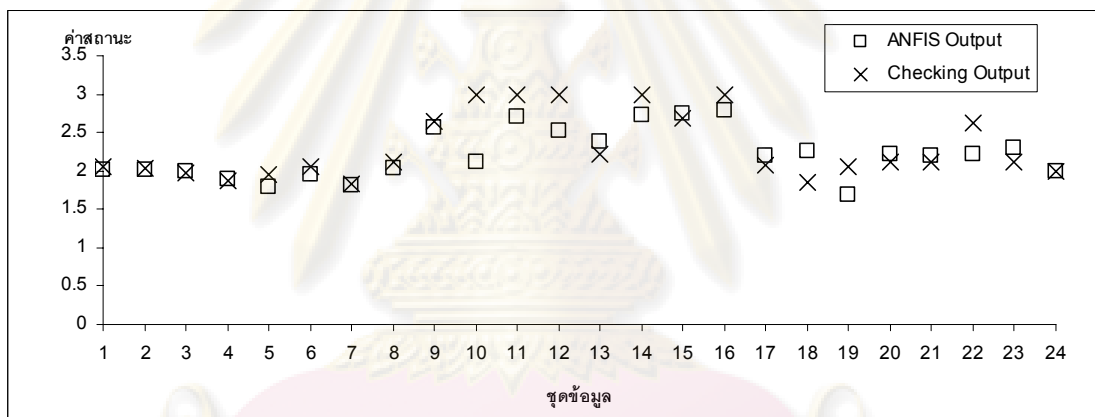
รูปที่ 7.30 ค่าตำแหน่งแท่งหม้อแปลงที่ได้จาก ANFIS3 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

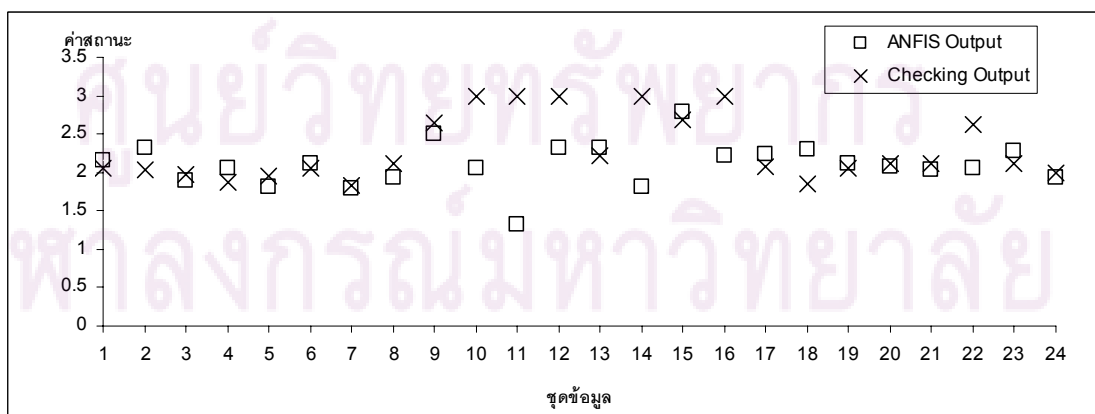
- ผลการคำนวณค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานี



รูปที่ 7.31 ค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีที่ได้จาก ANFIS1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

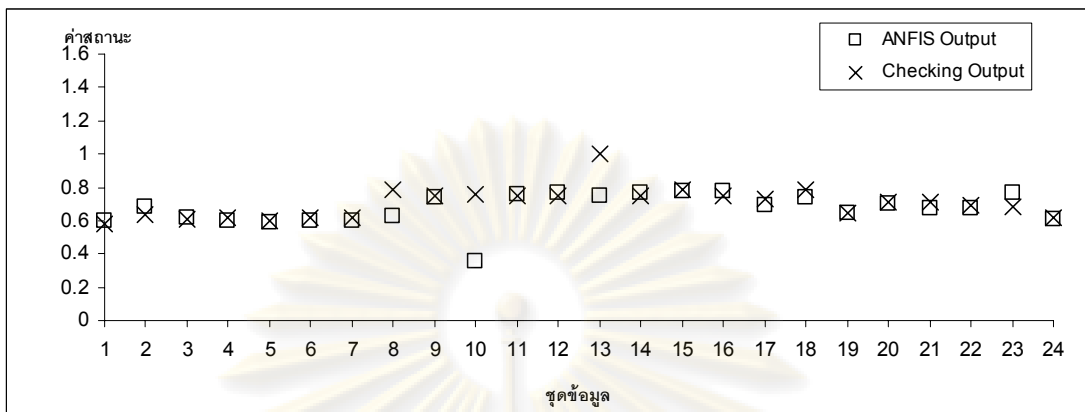


รูปที่ 7.32 ค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีที่ได้จาก ANFIS2 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

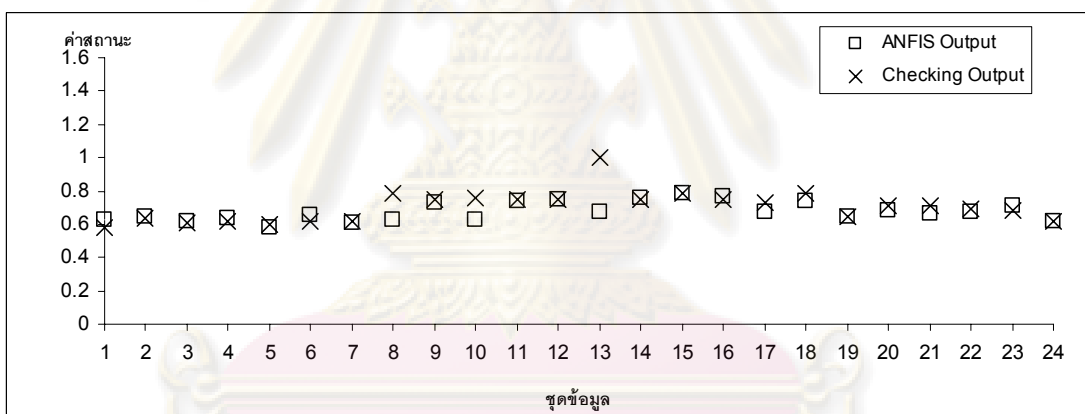


รูปที่ 7.33 ค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานีที่ได้จาก ANFIS3 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

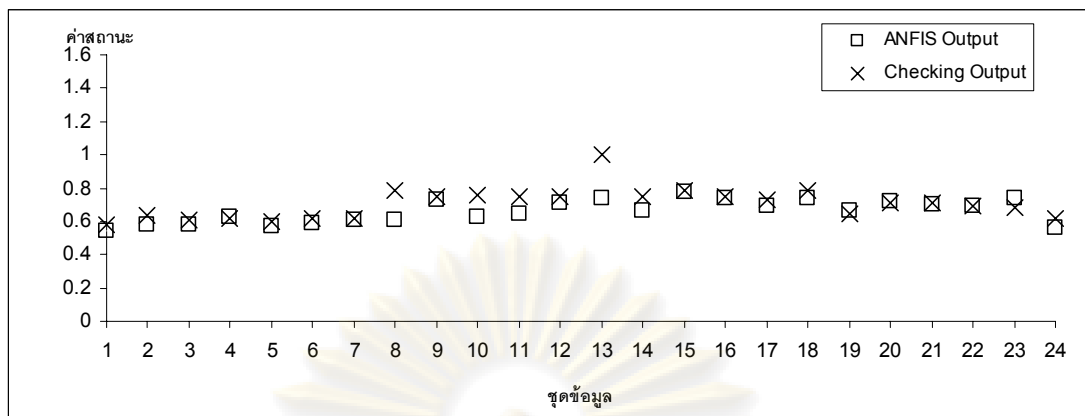
- ผลการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ในสายป้อน



รูปที่ 7.34 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

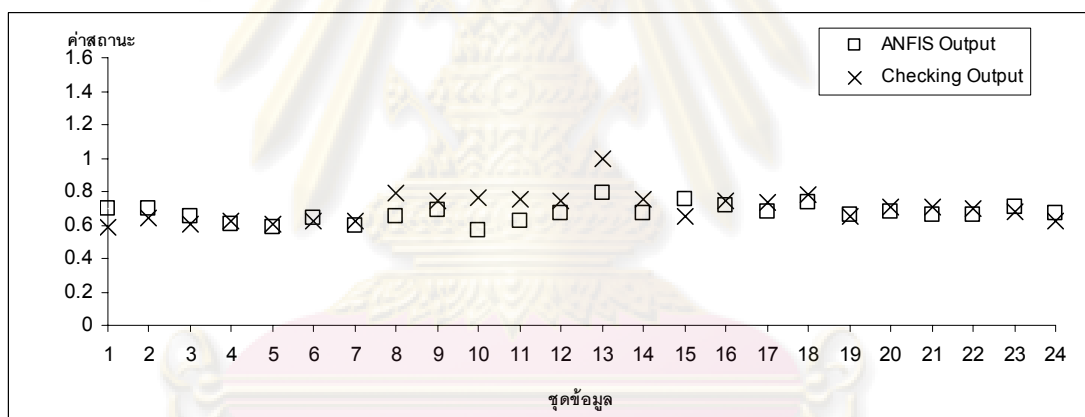


รูปที่ 7.35 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS2 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ



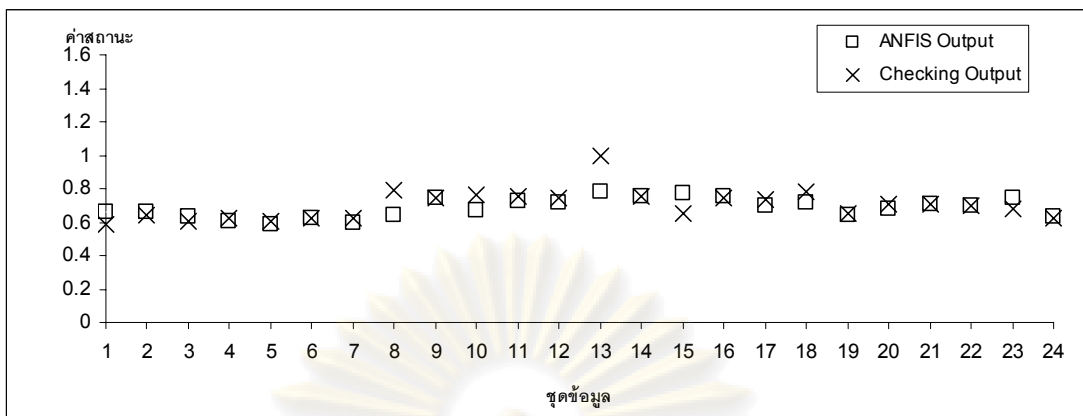
รูปที่ 7.36 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS3 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

- ผลการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ในสายป้อน

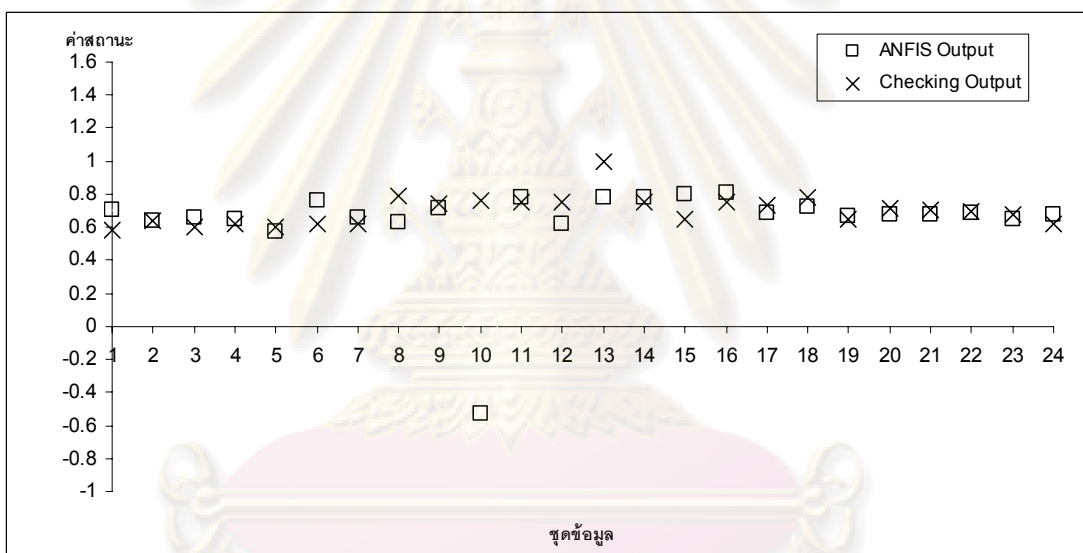


รูปที่ 7.37 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



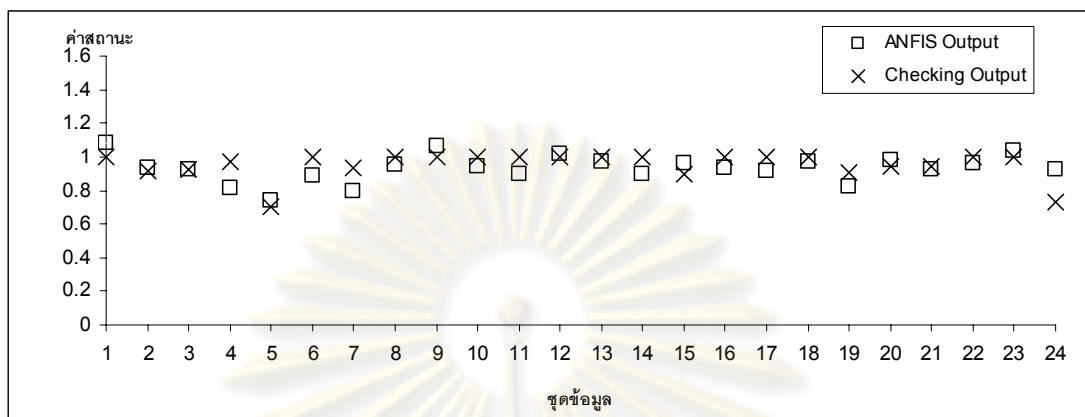
รูปที่ 7.38 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS2 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ



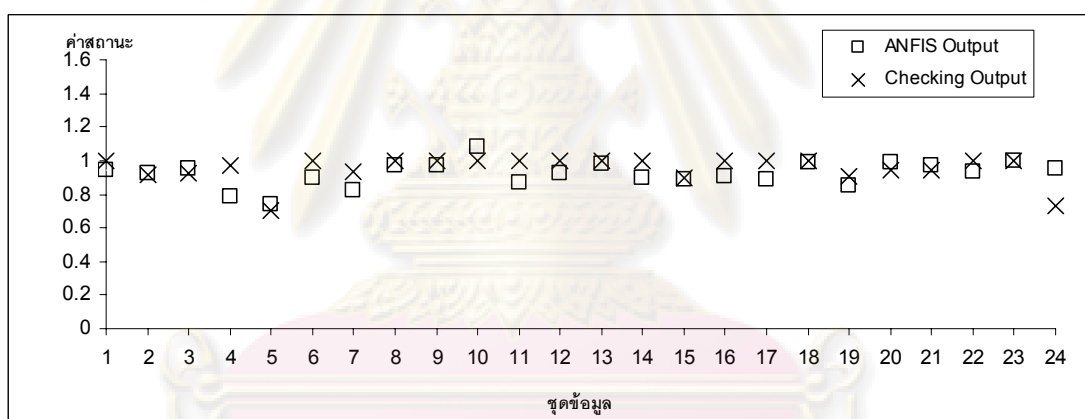
รูปที่ 7.39 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS3 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ผลการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ในสายป้อน

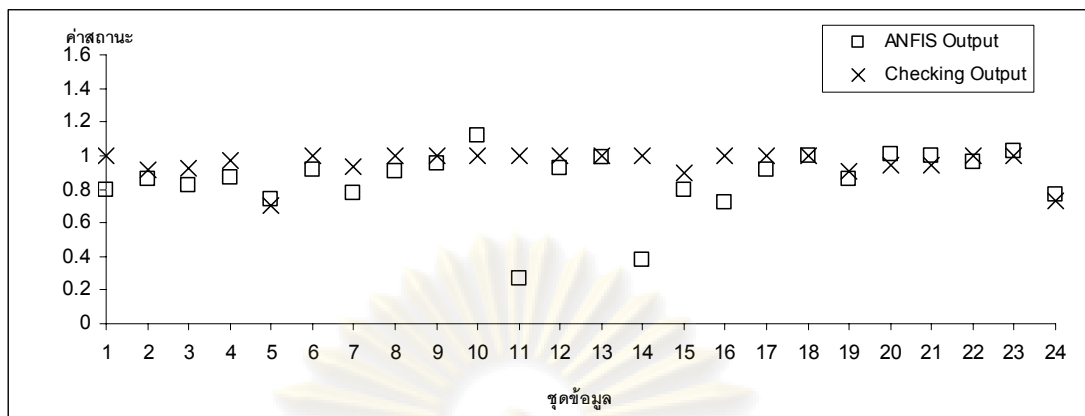


รูปที่ 7.40 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS1 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ



รูปที่ 7.41 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS2 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.42 ค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ในสายป้อนที่ได้จาก ANFIS3 เทียบกับค่าขาเข้าตรวจสอบ

นำผลได้จากขาออกของ ANFIS มาวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนตามโดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (mean absolute error) เป็นดัชนีชี้วัดในการทดสอบ ANFIS ทั้ง 3 รูปแบบแสดงได้ดังตารางด้านล่าง

ตารางที่ 7.18 ผลการทดสอบการคำนวณสถานะตำแหน่งแท็ปหม้อแปลง

	ANFIS 1	ANFIS 2	ANFIS 3
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	3083.58	3134.95	3140.41
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.02
<i>MAE</i>	0.4165	0.3214	0.6812

ตารางที่ 7.19 ผลการทดสอบการคำนวณค่า Step ของตัวเก็บประจุที่สถานี

	ANFIS 1	ANFIS 2	ANFIS 3
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	3017.45	3014.36	3093.17
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.02
<i>MAE</i>	0.1719	0.1905	0.3462

ตารางที่ 7.20 ผลการทดสอบการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_4) ที่สายป้อน

	ANFIS 1	ANFIS 2	ANFIS 3
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	3114.45	3093.99	3117.31
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.02
<i>MAE</i>	0.0544	0.0440	0.0536

ตารางที่ 7.21 ผลการทดสอบการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_5) ที่สายป้อน

	ANFIS 1	ANFIS 2	ANFIS 3
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	3112.39	3092.81	3124.77
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.02
<i>MAE</i>	0.0683	0.0436	0.1164

ตารางที่ 7.22 ผลการทดสอบการคำนวณค่าสถานะของตัวเก็บประจุ (C_6) ที่สายป้อน

	ANFIS 1	ANFIS 2	ANFIS 3
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	3124.25	3164.80	3119.03
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.02
<i>MAE</i>	0.0681	0.0696	0.1317

7.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจะพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย พบว่า ANFIS ที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบผลต่างเกาส์เซียนให้ค่า *MAE* มากที่สุด และ ANFIS ที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียนให้ค่า *MAE* น้อยที่สุด ซึ่งเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่จะนำไปใช้งานที่สุคในการศึกษาการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบจำหน่ายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนพบว่า ANFIS ทั้ง 4 ชุดใช้เวลาในการฝึกสอนใกล้เคียงกัน เนื่องจาก ANFIS ทั้งหมดใช้รูปแบบขาเข้าเดียวกัน

7.2.5 สรุปผลการทดสอบ

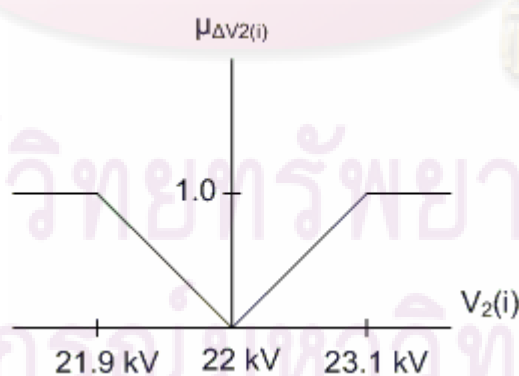
ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่แตกต่างกันของขาเข้า ANFIS ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่าสถานะของอุปกรณ์ จากการทดสอบพบว่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียนมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานเนื่องจากให้ค่า *MAE* น้อยกว่า ANFIS แบบอื่น

7.3 การทดสอบกับระบบจำหน่ายของประเทศไทย โดยเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีการที่นำเสนอ โดยประยุกต์ใช้ ANFIS ช่วยคำนวณกับวิธีการตามแนวคิดเดิม

จากที่ได้มีการนำเสนอวิธีการคำนวณค่าสถานะของอุปกรณ์ด้วย ANFIS และทำการทดสอบไปในหัวข้อก่อนหน้านี้ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบรูปแบบในการหาคำตอบจากวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการตามแนวคิดเดิมเพื่อเปรียบเทียบผลและสรุปถึงข้อดีข้อเสียในแต่ละวิธีการต่อไป โดยมีรูปแบบของวิธีการที่จะใช้ทดสอบดังนี้

7.3.1 วิธีการหาคำตอบจากเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming

Fuzzy Dynamic Programming [19] เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายได้ในกรณีศึกษานี้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะทำให้การเลือกเส้นทางเดินของคำตอบที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งได้กำหนดจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของทฤษฎีฟัซซีเซตดังต่อไปนี้



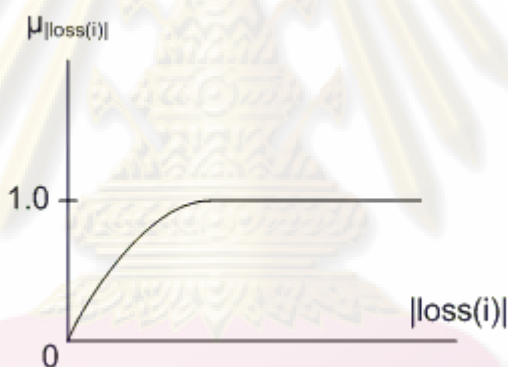
รูปที่ 7.43 ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนไปจากค่าของระบบ

(1) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนไปจากค่าของระบบในบัสด้านแรงต่ำของหม้อแปลงจำหน่าย มีลักษณะดังรูปที่ 7.43 โดยมีฟังก์ชันแสดงดัง (7.5)

$$\mu_{\Delta V_2(i)} = \begin{cases} \frac{-(V_2(i) - 22.0)}{1.1} & 21.9 \leq V_2(i) \leq 22.0 \\ \frac{(V_2(i) - 22.0)}{1.1} & 22.0 \leq V_2(i) \leq 23.1 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7.5)$$

โดย

$\mu_{\Delta V_2(i)}$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนไปจากค่าของระบบในบัสแรงต่ำของหม้อแปลง ที่เวลา i
 $V_2(i)$ คือ ขนาดแรงดันในบัสแรงต่ำของหม้อแปลง ที่เวลา i



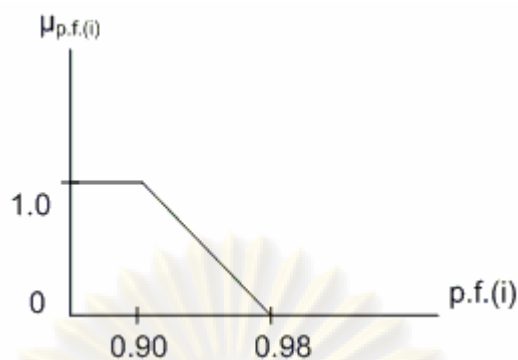
รูปที่ 7.44 ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ

(2) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายซึ่งจะใช้ลักษณะของฟังก์ชัน exponential ในรูปแบบลักษณะรูปที่ 7.44 ซึ่งมีฟังก์ชันแสดงดัง (7.6)

$$\mu_{|loss(i)} = 1 - e^{-|loss(i)|} \quad (7.6)$$

โดย

$\mu_{|loss(i)}$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ที่เวลา i
 $loss(i)$ คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ มีหน่วยเป็น per unit ที่เวลา i



รูปที่ 7.45 ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวประกอบกำลังในระบบ

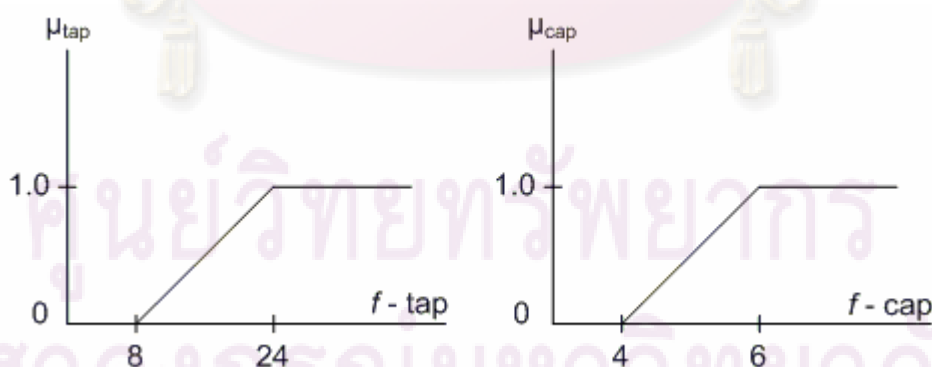
(3) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวประกอบกำลังของสถานีซึ่งจะใช้ลักษณะของฟังก์ชันดังรูปที่ 7.45 ซึ่งมีฟังก์ชันแสดงดัง (7.7)

$$\mu_{p.f.(i)} = \begin{cases} 1 & p.f.(i) < 0.90 \\ \frac{(0.98-p.f.(i))}{(0.98-0.90)} & 0.90 \leq p.f.(i) \leq 0.98 \\ 0, & p.f.(i) > 0.98 \end{cases} \quad (7.7)$$

โดย

$\mu_{p.f.(i)}$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวประกอบกำลังของสถานี ที่เวลา i

$p.f.(i)$ คือ ค่าตัวประกอบกำลังของสถานี ที่เวลา i



รูปที่ 7.46 ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนครั้งการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์

(4) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนครั้งการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งได้แก่ ตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงจำหน่าย และตัวเก็บประจุแต่ละตัวในระบบ โดยมีลักษณะเป็นเส้นตรงตามจำนวนครั้งการเปลี่ยนสถานะของฟังก์ชันดังรูป 7.46 ซึ่งจะกำหนดให้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนครั้งการเปลี่ยนสถานะของตำแหน่งแท็ปหม้อแปลงจำหน่ายมีค่าเป็น 0 เมื่อดำเนินการเปลี่ยนแท็ปไม่เกิน 8 ครั้ง และค่าเป็น 1 เมื่อดำเนินการเปลี่ยนแท็ปตั้งแต่ 24 ครั้งขึ้นไป ส่วนจำนวนครั้งการเปลี่ยนสถานะของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในระบบจะกำหนดให้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนครั้งการเปลี่ยนสถานะมีค่าเป็น 0 เมื่อดำเนินการสวิตซ์ซึ่งตัวเก็บประจุไม่เกิน 4 ครั้ง และค่าเป็น 1 เมื่อดำเนินการสวิตซ์ซึ่งตัวเก็บประจุตั้งแต่ 6 ครั้งขึ้นไป

จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ทั้งหมดที่กล่าวมา จะถูกนำมาสร้างฟังก์ชันเป้าหมายเพื่อทำการมินิไมซ์หาคำตอบที่เหมาะสมดัง (7.8) โดยที่คำตอบในแต่ละสถานะจะต้องไม่ละเมิดข้อกำหนดทางคุณภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายดัง (7.9) และ (7.10) โดยจะใช้ข้อมูลโหลดในลักษณะเส้นโค้งโหลดรายชั่วโมงของสถานีไฟฟ้านวนคร 3 ชุด วันที่ 20, 21 และ 24 กุมภาพันธ์ 2551 มาทำการศึกษา ซึ่งจะใช้ข้อมูลโหลดดังกล่าวในทุก ๆ การทดสอบถัดไปหลังจากนี้

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^{24} \mu_{\Delta V_2(i)} + \sum_{i=1}^{24} \mu_{p.f.(i)} + \sum_{i=1}^{24} \mu_{loss(i)} + \mu_{tap} + \sum_{k=1}^3 \mu_{s-cap(k)} + \sum_{k=1}^3 \mu_{f-cap(k)} \quad (7.8)$$

$$20.9 \text{ kV} \leq V_2(i) \leq 23.1 \text{ kV} \quad (7.9)$$

$$20.9 \text{ kV} \leq V_L(i) \leq 23.1 \text{ kV} \quad (7.10)$$

โดย

$$\sum_{i=1}^{24} \mu_{\Delta V_2(i)}$$

คือ ผลรวมฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของขนาดแรงดันที่เบี่ยงเบนไปจากค่าของระบบในบัสแรงต่ำของหม้อแปลง แต่ละชั่วโมง i ใน 1 วัน

$$\sum_{i=1}^j \mu_{p.f.(i)}$$

คือ ผลรวมฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวประกอบกำลังที่สถานีไฟฟ้าแต่ละชั่วโมง i ใน 1 วัน

$$\sum_{i=1}^j \mu_{loss(i)}$$

คือ ผลรวมฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย แต่ละชั่วโมง i ใน 1 วัน

$$\mu_{tap}$$

คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนการดำเนินการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลง ภายใน 1 วัน

$$\sum_{k=1}^3 \mu_{s-\text{cap}(k)}$$

คือ ผลรวมฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนการดำเนินการสวิตซ์ของตัวเก็บประจุที่สถานี แต่ละตัว ใน 1 วัน ซึ่งมีทั้งหมด 3 ตัว

$$\sum_{k=1}^3 \mu_{f-\text{cap}(k)}$$

คือ ผลรวมฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนการดำเนินการสวิตซ์ของตัวเก็บประจุในสายป้อน แต่ละตัว ใน 1 วัน ซึ่งมีทั้งหมด 3 ตัว

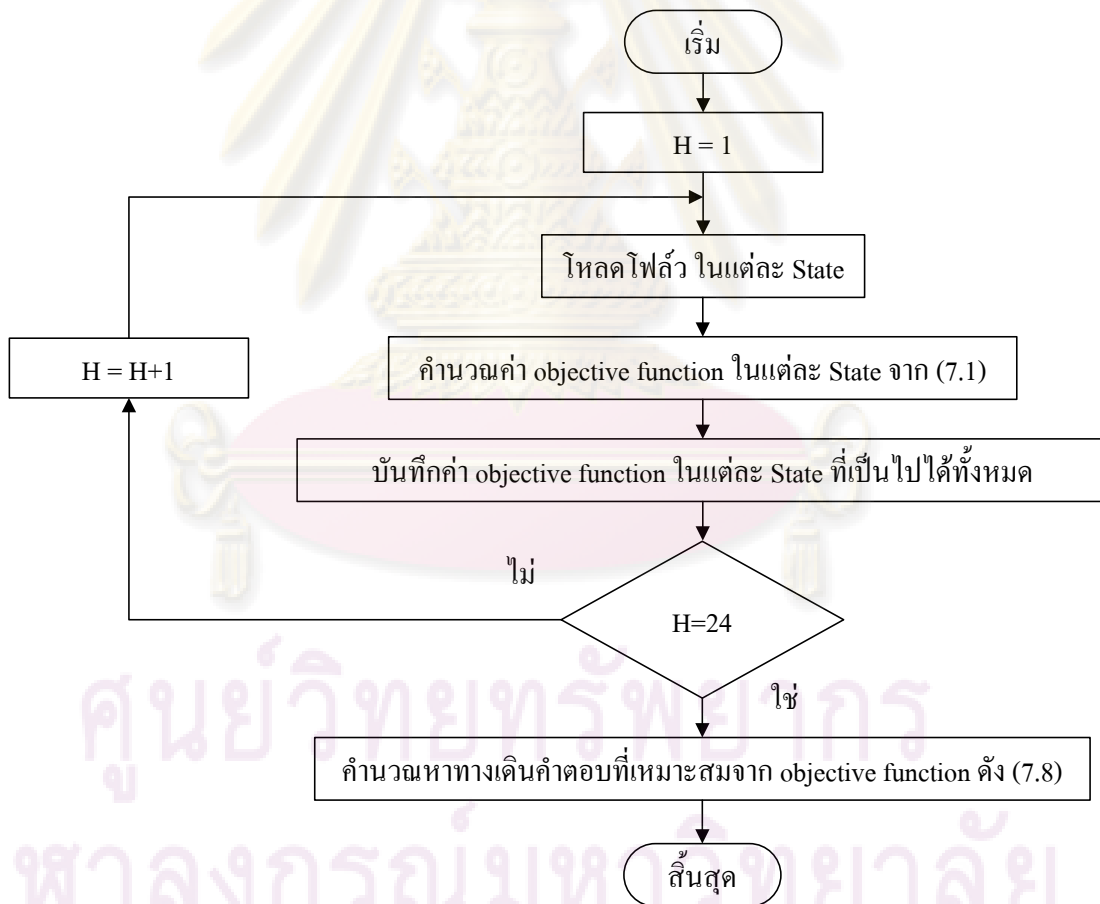
$$V_2(i)$$

คือ ขนาดแรงดันในบัสแรงต่ำของหม้อแปลง ที่ชั่วโมง i

$$V_L(i)$$

คือ ขนาดแรงดันในแต่ละบัสที่ L ในระบบจำหน่าย ที่ชั่วโมง i

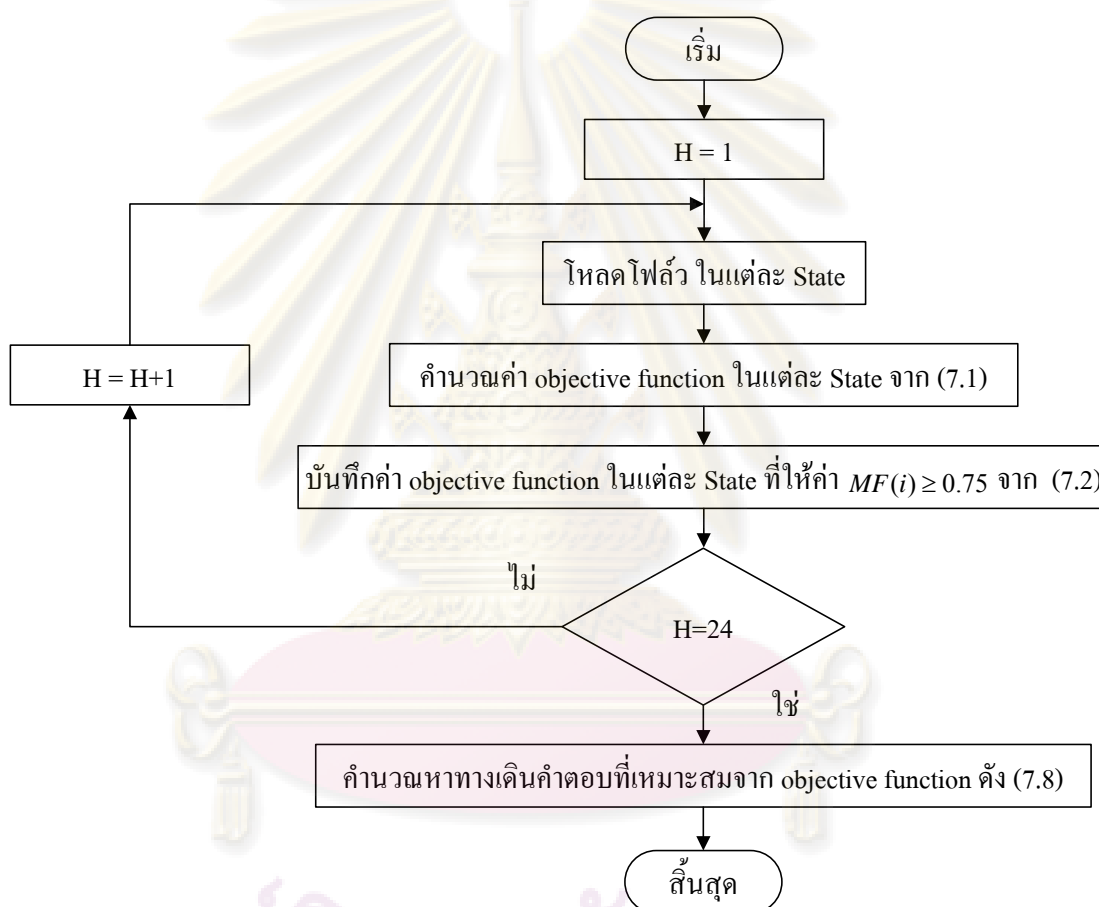
จากฟังก์ชันเป้าหมายข้างต้นจะถูกนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้และพิจารณาในการดำเนินการของอุปกรณ์ควบคุมในแต่ละชั่วโมง โดยทำการมินิไมซ์ฟังก์ชันจากเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming ตามขั้นตอนดังแสดงดังรูปที่ 7.47



รูปที่ 7.47 ขั้นตอนการหาคำตอบจากเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming

7.3.2 วิธีการหาคำตอบจากเทคนิค Partial Dynamic Programming

จากวิธีการหาคำตอบจากเทคนิค Fuzzy Dynamic Programming ข้างต้นจะเห็นว่าจะมีการนำสถานะการทำงานของอุปกรณ์ทุกสถานะที่ไม่ละเมิดข้อกำหนดทางคุณภาพแรงดันไฟฟ้ามาทำการพิจารณา ซึ่งในบางสถานะการทำงานเป็นสถานะที่ทำให้คุณภาพไฟฟ้าในระบบไม่ดีจึงไม่จำเป็นจะต้องนำมาพิจารณา ในหัวข้อนี้จึงได้เสนอแนวทางการหาคำตอบโดยการจากเทคนิค Partial Dynamic Programming ตามขั้นตอนดังแสดงดังรูปที่ 7.48

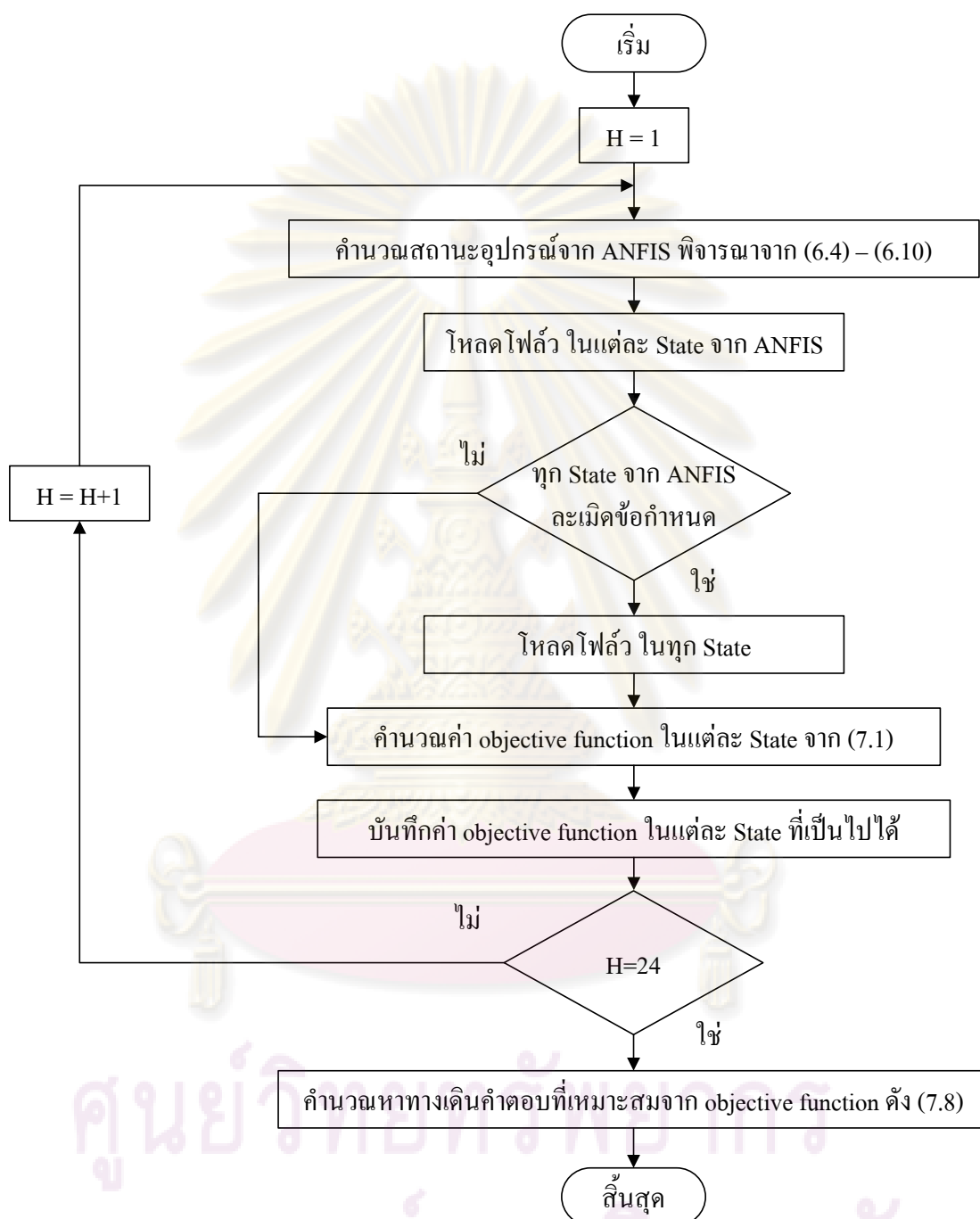


รูปที่ 7.48 ขั้นตอนการหาคำตอบจากเทคนิค Partial Dynamic Programming

7.3.3 วิธีการหาคำตอบจากเทคนิคที่นำเสนอ

จากวิธีการหาคำตอบจากเทคนิค Partial Dynamic Programming จำเป็นจะต้องทำโหลดโพล์ทุกสถานะก่อนทำการเลือกสถานะที่เหมาะสมมาทำการพิจารณาหาคำตอบจากเทคนิค dynamic programming แต่ในวิธีการที่จะนำเสนอนี้จะประยุกต์ใช้ ANFIS เพื่อทำการคำนวณค่า

สถานะของอุปกรณ์ที่เหมาะสมก่อนทำโหลดโพล์ ซึ่งจะไม่ต้องทำโหลดโพล์ทุกสถานะก่อนพิจารณาหาคำตอบ โดยวิธีการที่แนะนำเสนอนี้จะมีขั้นตอนการทำงานแสดงดังรูปที่ 7.49



รูปที่ 7.49 ขั้นตอนการหาคำตอบจากวิธีการที่นำเสนอ

7.3.4 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 7.23 ผลจากวิธี Fuzzy Dynamic Programming จากโหนดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	TAP(i)	สถานะ on/off ของตัวเก็บประจุ					
		ตัวเก็บประจุที่สถานี			ตัวเก็บประจุที่สายป้อน		
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	10	0	1	1	0	1	1
2	12	1	1	1	1	1	1
3	11	0	1	1	1	1	1
4	12	0	1	1	1	1	1
5	12	1	1	1	1	0	0
6	10	1	0	1	0	0	1
7	9	1	0	0	1	0	1
8	9	1	0	0	1	1	1
9	8	1	1	1	1	1	1
10	7	1	1	1	1	1	1
11	7	1	1	1	1	1	1
12	8	1	1	1	1	1	1
13	9	1	1	0	1	1	1
14	7	1	1	1	1	1	1
15	6	1	1	1	1	0	1
16	7	1	1	1	1	1	1
17	8	1	0	1	0	1	1
18	8	1	0	1	0	1	1
19	8	1	0	1	0	1	1
20	9	1	0	1	0	1	1
21	9	1	0	1	0	1	1
22	10	1	1	1	0	1	1
23	11	1	1	1	0	1	1
24	10	0	1	1	0	1	1

ตารางที่ 7.24 ผลจากวิธี Partial Dynamic Programming จากโหนดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	TAP(i)	สถานะ on/off ของตัวเก็บประจุ					
		ตัวเก็บประจุที่สถานี			ตัวเก็บประจุที่สายป้อน		
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	10	0	1	1	0	1	1
2	12	1	1	1	1	1	1
3	11	0	1	1	1	1	1
4	12	0	1	1	1	1	1
5	12	1	1	1	1	0	0
6	10	1	0	1	0	0	1
7	9	1	0	0	1	0	1
8	9	1	0	0	1	1	1
9	8	1	1	1	1	1	1
10	7	1	1	1	1	1	1
11	7	1	1	1	1	1	1
12	8	1	1	1	1	1	1
13	9	1	1	0	1	1	1
14	7	1	1	1	1	1	1
15	6	1	1	1	1	0	1
16	6	1	1	1	1	1	1
17	9	1	0	1	1	1	1
18	9	1	0	1	1	1	1
19	9	1	0	1	1	1	1
20	9	1	0	1	0	1	1
21	10	1	1	1	0	1	1
22	10	1	1	1	0	1	1
23	11	1	1	1	0	1	1
24	10	0	1	1	0	1	1

ตารางที่ 7.25 ผลจากวิธี ที่นำเสนอ จากโหนดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	TAP(i)	สถานะ on/off ของตัวเก็บประจุ					
		ตัวเก็บประจุที่สถานี			ตัวเก็บประจุที่สายป้อน		
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	10	0	1	1	0	1	1
2	11	1	1	1	0	1	1
3	11	0	1	1	1	1	1
4	12	0	1	1	1	1	1
5	10	0	0	1	0	1	1
6	10	0	1	1	0	0	1
7	10	0	1	1	0	0	1
8	10	1	1	1	0	0	1
9	7	1	1	1	1	1	1
10	7	1	1	1	1	1	1
11	6	1	1	1	1	1	1
12	7	1	1	1	1	1	1
13	9	1	1	0	1	1	1
14	7	1	1	1	1	1	1
15	6	1	1	1	1	1	1
16	5	1	1	0	1	1	1
17	9	1	1	0	1	1	1
18	9	1	1	0	1	1	1
19	8	1	1	0	1	0	1
20	10	1	1	0	1	1	1
21	10	1	1	0	1	1	1
22	10	1	1	1	1	1	1
23	10	0	1	1	1	1	1
24	11	0	1	1	1	1	1

ตารางที่ 7.26 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี Fuzzy Dynamic Programming
จากโหลดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	แรงดันที่สถานีไฟฟ้า (kV)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียใน ระบบ (MW)	ตัวประกอบกำลังที่ สถานี (p.f.)
1	22.0018	0.2666	0.9884
2	22.0023	0.2605	0.9980
3	22.0411	0.2675	0.9983
4	22.0478	0.2432	0.9999
5	21.9870	0.2304	0.9996
6	21.9979	0.2753	0.9780
7	22.1390	0.2610	0.9776
8	22.1882	0.2977	0.9814
9	22.4680	0.4930	0.9876
10	22.5207	0.4990	0.9743
11	22.4631	0.4666	0.9825
12	22.4283	0.4631	0.9843
13	22.2652	0.3711	0.9806
14	22.4994	0.4749	0.9823
15	22.5329	0.5419	0.9671
16	22.4698	0.4862	0.9830
17	22.1236	0.3607	0.9684
18	22.3449	0.3642	0.9718
19	22.0785	0.3299	0.9751
20	22.1106	0.3006	0.9769
21	22.1016	0.2881	0.9797
22	22.0926	0.3061	0.9954
23	22.0129	0.3016	0.9947
24	22.0875	0.2481	0.9904
	S.D. = 0.1944	$\sum = 8.3971$	

ตารางที่ 7.27 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี Partial Dynamic Programming
จากโหลดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	แรงดันที่สถานีไฟฟ้า (kV)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียใน ระบบ (MW)	ตัวประกอบกำลังที่ สถานี (p.f.)
1	22.0018	0.2666	0.9884
2	22.0023	0.2605	0.9980
3	22.0411	0.2675	0.9983
4	22.0478	0.2432	0.9999
5	21.9870	0.2304	0.9996
6	21.9979	0.2753	0.9780
7	22.1390	0.2610	0.9776
8	22.1882	0.2977	0.9814
9	22.4680	0.4930	0.9876
10	22.5207	0.4990	0.9743
11	22.4631	0.4666	0.9825
12	22.4283	0.4631	0.9843
13	22.2652	0.3711	0.9806
14	22.4994	0.4749	0.9823
15	22.5329	0.5419	0.9671
16	22.8521	0.4665	0.9876
17	22.0755	0.3593	0.9829
18	22.2984	0.3634	0.9861
19	22.0335	0.3290	0.9885
20	22.1106	0.3006	0.9769
21	22.2344	0.2840	0.9976
22	22.0926	0.3061	0.9954
23	22.0129	0.3016	0.9947
24	22.0875	0.2481	0.9904
	S.D. = 0.2282	$\Sigma = 8.3702$	

ตารางที่ 7.28 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี ที่นำเสนอ
จากโหลดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	แรงดันที่สถานีไฟฟ้า (kV)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียใน ระบบ (MW)	ตัวประกอบกำลังที่ สถานี (p.f.)
1	22.0018	0.2666	0.9884
2	22.0499	0.2604	0.9999
3	22.0411	0.2675	0.9983
4	22.0478	0.2432	0.9999
5	22.0201	0.2033	0.9845
6	21.9979	0.2753	0.9780
7	21.9734	0.2663	0.9855
8	22.1945	0.3070	0.9953
9	22.8512	0.4729	0.9915
10	22.5207	0.4990	0.9743
11	22.8445	0.4475	0.9871
12	22.8131	0.4440	0.9888
13	22.2652	0.3711	0.9806
14	22.4994	0.4749	0.9823
15	22.8713	0.5022	0.9850
16	22.6951	0.4744	0.9639
17	22.0755	0.3593	0.9829
18	22.2984	0.3634	0.9861
19	22.0813	0.3386	0.9753
20	22.0626	0.3004	0.9901
21	22.0538	0.2865	0.9919
22	22.4084	0.2929	0.9999
23	22.1924	0.2926	0.9908
24	22.0409	0.2468	0.9983
	S.D. = 0.3101	$\Sigma = 8.2560$	

ตารางที่ 7.29 ตารางเปรียบเทียบผลในวิธีการแบบต่าง ๆ จากโหลดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551

	Fuzzy Dynamic Programming	Partial Dynamic Programming	วิธีที่นำเสนอ
เวลาคำนวณ (วินาที)	658.54	310.61	10.67
$\sum_{i=1}^{24} \mu_{\Delta V_2(i)}$	4.5772	4.9186	6.3250
$\sum_{i=1}^{24} \mu_{ p.f.(i) }$	0.6364	0.3270	0.3557
$\sum_{i=1}^{24} \mu_{loss(i)}$	0.1706	0.1661	0.1640
$\mu_{tap} + \sum_{k=1}^3 \mu_{s-cap(k)} + \sum_{k=1}^3 \mu_{f-cap(k)}$	0.7500	0.7500	0.9375
F_{obj}	6.1342	6.1618	7.7822

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.30 ผลจากวิธี Fuzzy Dynamic Programming จากโหนดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	TAP(i)	สถานะ on/off ของตัวเก็บประจุ					
		ตัวเก็บประจุที่สถานี			ตัวเก็บประจุที่สายป้อน		
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	11	0	1	1	1	1	1
2	11	0	1	1	1	1	1
3	13	1	1	1	1	1	1
4	11	0	1	1	0	1	1
5	11	0	0	1	1	1	1
6	11	0	1	1	1	0	1
7	12	0	1	1	1	1	1
8	11	0	1	1	1	1	1
9	11	1	1	1	1	1	1
10	10	1	1	1	1	1	1
11	10	1	1	1	1	1	1
12	9	1	1	1	0	1	1
13	9	1	0	0	1	1	1
14	8	1	1	0	1	1	1
15	9	1	1	0	1	1	1
16	10	1	1	1	1	0	1
17	12	1	1	1	1	0	1
18	10	1	1	0	1	1	1
19	10	1	1	0	1	1	1
20	11	1	1	0	1	1	1
21	11	1	1	0	1	1	1
22	9	1	1	1	1	1	1
23	12	1	1	1	1	1	1
24	13	1	1	1	1	1	1

ตารางที่ 7.31 ผลจากวิธี Partial Dynamic Programming จากโหนดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	TAP(i)	สถานะ on/off ของตัวเก็บประจุ					
		ตัวเก็บประจุที่สถานี			ตัวเก็บประจุที่สายป้อน		
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	11	0	1	1	1	1	1
2	11	0	1	1	1	1	1
3	13	1	1	1	1	1	1
4	11	0	1	1	0	1	1
5	10	0	0	1	1	0	1
6	11	0	1	1	1	0	1
7	12	0	1	1	1	1	1
8	11	0	1	1	1	1	1
9	11	1	1	1	1	1	1
10	10	1	1	1	1	1	1
11	10	1	1	1	1	1	1
12	9	1	1	1	0	1	1
13	9	1	0	0	1	1	1
14	8	1	1	0	1	1	1
15	9	1	1	0	1	1	1
16	10	1	1	1	1	0	1
17	12	1	1	1	1	0	1
18	10	1	1	0	1	1	1
19	10	1	1	0	1	1	1
20	11	1	1	0	1	1	1
21	11	1	1	0	1	1	1
22	9	1	1	1	1	1	1
23	12	1	1	1	1	1	1
24	13	1	1	1	1	1	1

ตารางที่ 7.32 ผลจากวิธี ที่นำเสนอ จากโหนดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	TAP(i)	สถานะ on/off ของตัวเก็บประจุ					
		ตัวเก็บประจุที่สถานี			ตัวเก็บประจุที่สายป้อน		
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	11	0	1	1	1	1	1
2	11	0	1	1	1	1	1
3	10	0	1	1	0	0	1
4	11	0	1	1	0	1	1
5	10	0	0	1	1	0	1
6	11	0	1	1	1	0	1
7	11	0	1	1	0	1	1
8	10	0	1	1	0	1	1
9	10	1	1	1	0	1	1
10	9	0	1	1	1	1	1
11	9	0	1	1	1	1	1
12	8	1	1	0	1	1	1
13	10	1	1	0	1	1	1
14	8	1	1	0	1	1	1
15	9	1	1	0	1	1	1
16	10	1	1	1	1	1	1
17	10	1	0	0	1	1	1
18	10	1	1	0	1	1	1
19	10	1	1	0	1	1	1
20	11	1	1	0	1	1	1
21	11	1	1	0	1	1	1
22	9	1	1	1	1	1	1
23	11	0	1	1	1	1	1
24	11	0	1	1	1	1	1

ตารางที่ 7.33 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี Fuzzy Dynamic Programming
จากโหลดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	แรงดันที่สถานีไฟฟ้า (kV)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียใน ระบบ (MW)	ตัวประกอบกำลังที่ สถานี (p.f.)
1	22.0372	0.2290	0.9999
2	22.0358	0.2332	0.9981
3	21.9905	0.2356	0.9944
4	22.0011	0.2112	0.9986
5	21.9381	0.2148	0.9938
6	21.9776	0.2613	0.9940
7	21.9889	0.2376	0.9999
8	22.0487	0.3060	0.9987
9	22.2400	0.3576	0.9998
10	22.5015	0.3630	0.9995
11	22.4186	0.3596	0.9995
12	22.4077	0.3535	0.9934
13	22.2495	0.3068	0.9809
14	22.4301	0.3868	0.9833
15	22.2603	0.3552	0.9875
16	22.2654	0.3570	0.9951
17	22.0965	0.2651	0.9996
18	22.1439	0.2905	0.9979
19	22.2804	0.2833	0.9990
20	22.0570	0.2782	0.9994
21	22.1982	0.2460	0.9999
22	22.1938	0.3101	0.9879
23	22.1367	0.2556	0.9909
24	22.0656	0.2273	0.9815
	S.D. = 0.1585	$\sum = 6.9243$	

ตารางที่ 7.34 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี Partial Dynamic Programming
จากโหลดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	แรงดันที่สถานีไฟฟ้า (kV)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียใน ระบบ (MW)	ตัวประกอบกำลังที่ สถานี (p.f.)
1	22.0372	0.2290	0.9999
2	22.0358	0.2332	0.9981
3	21.9905	0.2356	0.9944
4	22.0011	0.2112	0.9986
5	21.9863	0.2212	0.9799
6	21.9776	0.2613	0.9940
7	21.9889	0.2376	0.9999
8	22.0487	0.3060	0.9987
9	22.2400	0.3576	0.9998
10	22.5015	0.3630	0.9995
11	22.4186	0.3596	0.9995
12	22.4077	0.3535	0.9934
13	22.2495	0.3068	0.9809
14	22.4301	0.3868	0.9833
15	22.2603	0.3552	0.9875
16	22.2654	0.3570	0.9951
17	22.0965	0.2651	0.9996
18	22.1439	0.2905	0.9979
19	22.2804	0.2833	0.9990
20	22.0570	0.2782	0.9994
21	22.1982	0.2460	0.9999
22	22.1938	0.3101	0.9879
23	22.1367	0.2556	0.9909
24	22.0656	0.2273	0.9815
	S.D. = 0.1559	$\sum = 6.9307$	

ตารางที่ 7.35 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี ที่นำเสนอ
จากโหลดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	แรงดันที่สถานีไฟฟ้า (kV)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียใน ระบบ (MW)	ตัวประกอบกำลังที่ สถานี (p.f.)
1	22.0372	0.2290	0.9999
2	22.0358	0.2332	0.9981
3	21.9660	0.2471	0.9793
4	22.0011	0.2112	0.9986
5	21.9863	0.2212	0.9799
6	21.9776	0.2613	0.9940
7	22.0362	0.2370	0.9974
8	22.0940	0.3053	0.9912
9	22.2846	0.3572	0.9984
10	22.3617	0.3686	0.9865
11	22.2793	0.3652	0.9862
12	22.5842	0.3437	0.9889
13	22.3816	0.3026	0.9986
14	22.4301	0.3868	0.9833
15	22.2603	0.3552	0.9875
16	22.5821	0.3332	0.9999
17	22.1397	0.2551	0.9870
18	22.1439	0.2905	0.9979
19	22.2804	0.2833	0.9990
20	22.0570	0.2782	0.9994
21	22.1982	0.2460	0.9999
22	22.1938	0.3101	0.9879
23	22.0051	0.2591	0.9999
24	22.2793	0.2226	0.9977
	S.D. = 0.1803	$\Sigma = 6.9026$	

ตารางที่ 7.36 ตารางเปรียบเทียบผลในวิธีการแบบต่าง ๆ จากโหลดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551

	Fuzzy Dynamic Programming	Partial Dynamic Programming	วิธีที่นำเสนอ
เวลาคำนวณ (วินาที)	422.92	181.52	19.66
$\sum_{i=1}^{24} \mu_{\Delta V_{2(i)}}$	3.7935	3.7497	4.3051
$\sum_{i=1}^{24} \mu_{ p.f.(i) }$	0.0000	0.0010	0.0096
$\sum_{i=1}^{24} \mu_{loss(i)}$	0.1381	0.1384	0.1376
$\mu_{tap} + \sum_{k=1}^3 \mu_{s-cap(k)} + \sum_{k=1}^3 \mu_{f-cap(k)}$	0.8750	1.0000	0.6250
F_{obj}	4.8067	4.8891	5.0773

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.37 ผลจากวิธี Fuzzy Dynamic Programming จากโหนดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	TAP(i)	สถานะ on/off ของตัวเก็บประจุ					
		ตัวเก็บประจุที่สถานี			ตัวเก็บประจุที่สายป้อน		
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	12	0	1	1	0	1	1
2	14	1	1	1	1	1	0
3	11	0	1	1	1	1	1
4	12	0	1	1	1	0	0
5	12	0	0	1	1	1	0
6	13	1	1	1	0	0	0
7	13	1	0	1	1	0	0
8	13	1	0	1	1	0	1
9	12	1	0	1	1	0	1
10	12	1	1	1	0	0	1
11	12	1	1	1	0	0	1
12	12	1	1	1	0	0	1
13	12	1	1	1	0	0	1
14	12	1	1	1	0	0	1
15	12	1	1	1	0	0	1
16	12	0	1	1	0	0	1
17	12	0	1	1	0	0	1
18	12	0	1	1	0	0	1
19	12	0	1	1	0	0	1
20	12	0	1	0	0	1	1
21	12	0	1	0	0	1	1
22	12	0	1	0	0	1	1
23	12	0	1	0	0	1	1
24	12	0	1	0	0	1	1

ตารางที่ 7.38 ผลจากวิธี Partial Dynamic Programming จากโหนดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	TAP(i)	สถานะ on/off ของตัวเก็บประจุ					
		ตัวเก็บประจุที่สถานี			ตัวเก็บประจุที่สายป้อน		
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	12	0	1	1	0	1	1
2	14	1	1	1	1	1	0
3	11	0	1	1	1	1	1
4	12	0	1	1	1	0	0
5	12	0	0	1	1	1	0
6	13	1	1	1	0	0	0
7	13	1	0	1	1	0	0
8	13	1	0	1	1	0	1
9	12	1	0	1	1	0	1
10	12	1	1	1	0	0	1
11	12	1	1	1	0	0	1
12	12	1	1	1	0	0	1
13	12	1	1	1	0	0	1
14	12	1	1	1	0	0	1
15	12	1	1	1	0	0	1
16	12	0	1	1	0	0	1
17	12	0	1	1	0	0	1
18	12	0	1	1	0	0	1
19	12	0	1	1	0	0	1
20	12	0	1	0	0	1	1
21	12	0	1	0	0	1	1
22	12	0	1	0	0	1	1
23	12	0	1	0	0	1	1
24	12	0	1	0	0	1	1

ตารางที่ 7.39 ผลจากวิธี ที่นำเสนอ จากโหนดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	TAP(i)	สถานะ on/off ของตัวเก็บประจุ					
		ตัวเก็บประจุที่สถานี			ตัวเก็บประจุที่สายป้อน		
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	12	0	1	1	0	1	1
2	12	0	0	1	1	1	1
3	11	0	1	1	1	1	1
4	12	0	1	1	1	0	0
5	12	0	0	1	0	1	1
6	12	0	0	1	1	1	0
7	13	1	0	1	1	0	0
8	13	1	0	1	1	0	1
9	12	1	0	1	1	0	1
10	10	0	0	1	1	0	1
11	11	0	0	1	1	1	1
12	11	0	0	1	1	1	1
13	11	0	0	1	1	1	1
14	11	0	0	1	1	1	1
15	11	0	0	1	1	1	1
16	12	0	0	1	1	1	1
17	12	0	0	1	1	1	1
18	12	0	0	1	1	1	1
19	12	0	0	1	1	1	1
20	12	0	0	1	0	1	1
21	12	0	0	1	0	1	1
22	12	0	0	1	0	1	1
23	12	0	0	1	0	1	1
24	12	0	0	1	0	1	1

ตารางที่ 7.40 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี Fuzzy Dynamic Programming
จากโหลดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	แรงดันที่สถานีไฟฟ้า (kV)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียใน ระบบ (MW)	ตัวประกอบกำลังที่ สถานี (p.f.)
1	22.0198	0.1605	0.9992
2	21.9882	0.1689	0.9858
3	21.9413	0.1854	0.9881
4	21.9905	0.1503	0.9997
5	22.0212	0.1469	0.9977
6	21.9831	0.1522	0.9965
7	21.9831	0.1420	0.9988
8	22.0270	0.1440	0.9932
9	22.0455	0.1802	0.9998
10	21.9244	0.2026	0.9999
11	22.0457	0.1988	0.9994
12	21.8780	0.1994	0.9999
13	22.1866	0.1870	0.9978
14	21.9833	0.2101	0.9999
15	22.0256	0.2073	0.9999
16	21.7992	0.1793	0.9946
17	21.9894	0.1481	0.9999
18	22.0205	0.1403	0.9999
19	21.9399	0.1346	0.9997
20	21.9572	0.1339	0.9974
21	21.9270	0.1328	0.9983
22	21.9503	0.1408	0.9977
23	21.9337	0.1325	0.9985
24	22.1224	0.1355	0.9989
	S.D. = 0.0752	$\sum = 3.9134$	

ตารางที่ 7.41 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี Partial Dynamic Programming
จากโหลดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	แรงดันที่สถานีไฟฟ้า (kV)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียใน ระบบ (MW)	ตัวประกอบกำลังที่ สถานี (p.f.)
1	22.0198	0.1605	0.9992
2	21.9882	0.1689	0.9858
3	21.9413	0.1854	0.9881
4	21.9905	0.1503	0.9997
5	22.0212	0.1469	0.9977
6	21.9831	0.1522	0.9965
7	21.9831	0.1420	0.9988
8	22.0270	0.1440	0.9932
9	22.0455	0.1802	0.9998
10	21.9244	0.2026	0.9999
11	22.0457	0.1988	0.9994
12	21.8780	0.1994	0.9999
13	22.1866	0.1870	0.9978
14	21.9833	0.2101	0.9999
15	22.0256	0.2073	0.9999
16	21.7992	0.1793	0.9946
17	21.9894	0.1481	0.9999
18	22.0205	0.1403	0.9999
19	21.9399	0.1346	0.9997
20	21.9572	0.1339	0.9974
21	21.9270	0.1328	0.9983
22	21.9503	0.1408	0.9977
23	21.9337	0.1325	0.9985
24	22.1224	0.1355	0.9989
	S.D. = 0.0752	$\sum = 3.9134$	

ตารางที่ 7.42 ผลทางคุณภาพไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธี ที่นำเสนอ
จากโหลดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	แรงดันที่สถานีไฟฟ้า (kV)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียใน ระบบ (MW)	ตัวประกอบกำลังที่ สถานี (p.f.)
1	22.0198	0.1605	0.9992
2	22.0346	0.1578	0.9991
3	21.9413	0.1854	0.9881
4	21.9905	0.1503	0.9997
5	22.0159	0.1341	0.9975
6	21.9806	0.1518	0.9989
7	21.9831	0.1420	0.9988
8	22.0270	0.1440	0.9932
9	22.0455	0.1802	0.9998
10	21.9686	0.2017	0.9796
11	22.0420	0.1929	0.9966
12	21.8759	0.1935	0.9938
13	22.1822	0.1832	0.9984
14	21.9817	0.2018	0.9911
15	22.0231	0.2000	0.9947
16	21.9164	0.1727	0.9985
17	22.1065	0.1461	0.9989
18	22.1372	0.1392	0.9977
19	22.0566	0.1346	0.9966
20	21.9572	0.1339	0.9974
21	21.9270	0.1328	0.9983
22	21.9503	0.1408	0.9977
23	21.9337	0.1325	0.9985
24	22.1224	0.1355	0.9989
	S.D. = 0.0732	$\Sigma = 3.8473$	

ตารางที่ 7.43 ตารางเปรียบเทียบผลในวิธีการแบบต่าง ๆ จากโหลดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551

	Fuzzy Dynamic Programming	Partial Dynamic Programming	วิธีที่นำเสนอ
เวลาคำนวณ (วินาที)	5694.13	1203.86	223.58
$\sum_{i=1}^{24} \mu_{\Delta V_{2(i)}}$	1.2234	1.2234	1.2787
$\sum_{i=1}^{24} \mu_{p.f.(i)}$	0.0000	0.0000	0.0045
$\sum_{i=1}^{24} \mu_{loss(i)}$	0.0782	0.0782	0.0771
$\mu_{tap} + \sum_{k=1}^3 \mu_{s-cap(k)} + \sum_{k=1}^3 \mu_{f-cap(k)}$	0.0000	0.0000	0.0000
F_{obj}	1.3015	1.3015	1.3603

7.3.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจะเห็นว่า เมื่อใช้เทคนิค Fuzzy Dynamic Programming ในกาควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย โดยศึกษาในกรณีการวางแผนการควบคุมการทำงานล่วงหน้าจากการทำนายโหลดตามเส้นโค้งโหลดรายชั่วโมง พบว่าค่าคำตอบที่ได้ ได้ผลดีกว่าวิธีการ Partial Dynamic Programming และวิธีการที่นำเสนอโดยใช้ ANFIS มาประยุกต์ใช้ เนื่องจากวิธีการ Fuzzy Dynamic Programming ได้มีการนำคำตอบทุกสถานะมาทำการพิจารณาคำตอบ ซึ่งต่างจากวิธีการ Partial Dynamic Programming และวิธีการที่นำเสนอ ที่นำคำตอบบางสถานะมาทำการพิจารณา อย่างไรก็ตามวิธีการ Fuzzy Dynamic Programming จะใช้เวลาในการหาคำตอบนานกว่าอีก 2 แบบ ซึ่งเป็นผลจากการนำคำตอบทุกสถานะมาทำการพิจารณาดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพไฟฟ้าจากวิธีทดสอบทั้ง 3 วิธี พบว่าคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ดีตามข้อกำหนดทั้ง 3 วิธี ถึงแม้ว่าวิธีการที่นำเสนอโดยการนำ ANFIS มาประยุกต์ใช้จะให้คำตอบที่ดีที่สุดในการทดสอบ แต่วิธีการดังกล่าวก็ยังสามารถใช้คำนวณคำตอบได้ใกล้เคียงกับอีก 2 รูปแบบ ทั้งนี้เนื่องจากการนำ ANFIS มาช่วยประมาณสถานะการทำงานของอุปกรณ์ ANFIS ยังให้ค่าที่ผิดพลาดซึ่งผิดจากค่าที่แท้จริงอยู่บ้าง แต่คำตอบที่ได้ก็ได้บ่งบอกถึงคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถประมาณคำตอบในสถานะที่ดีที่สุดบางข้อมูลก็ตาม

7.3.6 สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบกับระบบจำหน่ายในหัวข้อนี้ได้ใช้เข้าที่นำเสนอโดยการคำนวณสถานะการทำงานของอุปกรณ์เบื้องต้นก่อนหาคำตอบจากวิธี Dynamic Programming ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบขาเข้าของ ANFIS ที่นำเสนอ สามารถคำนวณสถานะการทำงานของอุปกรณ์เบื้องต้นได้ใกล้เคียงกับการทำโหลดโพล์แล้วหาค่าเฉลี่ย ถึงแม้ว่าจะมีบางข้อมูลที่ไม่สามารถทำการประมาณค่าคำตอบที่ดีที่สุดมาพิจารณา แต่สถานะที่คำนวณได้นั้นก็ยังทำให้คุณภาพไฟฟ้าอยู่เกณฑ์ที่กำหนด

7.4 สรุป

จากการทดสอบทั้งหมดในบทนี้แสดงให้เห็นว่า การกำหนดขาเข้าของ ANFIS เพื่อคำนวณค่าสถานะการทำงานของอุปกรณ์ ตามแนวคิดที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถคำนวณสถานะการทำงานของอุปกรณ์ ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำโหลดโพล์แล้วพิจารณาค่าเฉลี่ยโดยฟuzzyเซตที่เหมาะสมในการคำนวณสถานะของอุปกรณ์ด้วย ANFIS ก็คือฟuzzyเซตที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน ถึงแม้ว่าการนำ ANFIS มาประยุกต์ใช้จะให้ผลที่ได้แตกต่างวิธีการแบบเก่าแต่ผลทางคุณภาพไฟฟ้าก็ยังอยู่ในเกณฑ์ดีและไม่ละเมิดข้อกำหนด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 ข้อสรุป

สามารถสรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดังนี้

8.1.1 หลักการ

การสวิตชิงตัวเก็บประจุร่วมกับการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลง เป็นวิธีการที่ใช้ควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายในสถานีไฟฟ้า โดยการศึกษาลักษณะการวางแผนการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายในสถานีไฟฟ้า ในประเทศไทย เป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า จากผลงานวิจัยเก่า ๆ วิธีหนึ่งที่เคยนำเสนอคือ dynamic programming โดยภายหลังได้มีการนำเสนอโดยใช้ระบบ Neural Network มาใช้ประมาณค่าตอบก่อนทำ dynamic programming

ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ หรือ ANFIS เป็นระบบที่สามารถปรับพารามิเตอร์ภายในได้โดยผ่านการฝึกสอนด้วยข้อมูลตัวอย่าง หลักการของ ANFIS มีพื้นฐานมาจากฟัซซีเซตและระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ในการสร้างระบบอนุมานโดยไม่ต้องสร้างแบบจำลองของระบบจริง และในการใช้งานก็สามารถส่งค่าขาออกได้อย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่ามีการนำ ANFIS มาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังมีความยุ่งยากน้อยกว่าในการกำหนด จำนวน โหนด, ฟังก์ชันถ่ายโอน และจำนวนระดับชั้น โครงสร้างภายใน

8.1.2 สิ่งที่น่าสนใจ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอรูปแบบขาเข้าของ ANFIS เพื่อใช้คำนวณสถานะการทำงานของ การปรับแท็ปหม้อแปลงและการสวิตชิงตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าตามเส้นโค้งโหลดราย ชั่วโมง โดยการกำหนดรูปแบบขาเข้านั้นใช้แนวคิดที่ต้องกำหนดขาเข้าให้เหมาะสมและสะท้อนถึงสถานะของโหลดในระบบเพื่อให้ ANFIS สามารถแยกแยะกรณีต่าง ๆ ผ่านกฎของฟัซซีที่อยู่ภายในและให้ค่าการทำงานออกมาได้อย่างถูกต้อง จากแนวคิดนี้นำไปสู่การกำหนดตัวแปรขาเข้า

เพื่อนำไปสู่การคำนวณสถานะการทำงานของการปรับแก้หม้อแปลงและการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าได้ซึ่งยังไม่เคยมีการนำเสนอมาก่อน

8.1.3 การทดสอบ

หลังจากนำเสนอรูปแบบขาเข้าในวิทยานิพนธ์แล้ว จึงทดสอบรูปแบบขาเข้าที่นำเสนอด้วยระบบจำหน่ายทดสอบ โดยสร้างข้อมูลฝึกสอนโดยการแบ่งระดับโหลดและแรงดันออกให้ครอบคลุมทุกสภาวะเพื่อให้ ANFIS สามารถแยกแยะสถานะการทำงานของการปรับแก้หม้อแปลงและการสวิตซ์ตัวเก็บประจุได้ และสร้างข้อมูลขาออกฝึกสอนจากการทำโหลดโพล์และหาค่าเฉลี่ยของสถานะการทำงานของการปรับแก้หม้อแปลงและการสวิตซ์ตัวเก็บประจุในแต่ละข้อมูล โดยนำข้อมูลจากเส้นโค้งโหลดรายชั่วโมงป้อนขาเข้าตรวจสอบเข้าไปและเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จาก ANFIS กับค่าขาออกตรวจสอบ

เมื่อทำการพิจารณารูปแบบและลักษณะพีซีเซตที่เหมาะสมแล้ว จึงนำ ANFIS ที่ได้มาใช้ประมาณคำตอบก่อนทำ dynamic programming ซึ่งผลที่ได้ถึงแม้จะให้ผลที่แยกว่าวิธี dynamic programming ที่เคยมีการนำเสนอ แต่ ANFIS ก็ยังสามารถอนุมานสถานะการทำงานได้โดยไม่มีละเมิดข้อกำหนดทางด้านคุณภาพไฟฟ้า

8.1.4 อุปสรรค

ในการทดสอบด้วยระบบไฟฟ้าจำหน่ายของประเทศไทย ทำให้เห็นอุปสรรคในการสร้างชุดข้อมูลสำหรับศึกษา สรุปได้ดังนี้

- 1) การทำการศึกษาในระบบจำหน่ายนั้นมีจุดติดตั้งหม้อแปลงจำหน่ายย่อยในระบบเป็นจำนวนมาก ทำให้สร้างข้อมูลสำหรับการทำโหลดโพล์ได้ยากและซับซ้อน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการยุบรวมระบบโดยแบ่งขอบเขตตามความหนาแน่นของผู้ใช้ไฟตามแต่ละจุด ซึ่งส่งผลให้ข้อมูลในการศึกษามีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง
- 2) ในระบบระบบจำหน่ายโดยทั่วไปมีจำนวนจุดของผู้ใช้ไฟจำนวนมาก ซึ่งยากต่อการเก็บข้อมูลโหลดของผู้ใช้ไฟมาทำโหลดโพล์ เพื่อใช้สำหรับสร้างข้อมูลฝึกสอน ANFIS และคำตอบ โดยการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการเก็บข้อมูลแรงดันและโหลดจากสถานีไฟฟ้า แล้วทำการเฉลี่ยโหลดตามขนาดหม้อแปลงที่ติดตั้งในระบบ ซึ่งทำให้ผลที่ได้ไม่ตรงกับความเป็นจริง

8.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยในขั้นต่อไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดขาเข้าของ ANFIS ในการสถานะการทำงานของ การปรับแก้หม้อแปลงและการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าตามระดับโหลดแต่ละช่วงเวลา อย่างไรก็ตาม จากการสร้างข้อมูลตัวอย่างในการทดสอบพบถึงอุปสรรคที่เกิดขึ้น ซึ่งหากจะพัฒนา เพื่อนำไปใช้งานต่อไปในอนาคตจะต้องพิจารณาสิ่งต่าง ๆ เพิ่มเติมดังนี้

- 1) ควรจะมีการติดตั้งเครื่องมือวัดโหลดที่หม้อแปลงตัวใหญ่ ๆ ในระบบเพื่อให้สามารถลดความคลาดเคลื่อนจากการเฉลี่ยโหลดตามขนาดหม้อแปลง เป็นผลให้ผลที่ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น
- 2) การศึกษาลักษณะการวางแผนการควบคุมปริมาณแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายในสถานีไฟฟ้าในลักษณะดังกล่าวนี้ ควรจะมีการศึกษาทางด้านการทำนายโหลดล่วงหน้าเพิ่มเติม โดยพิจารณาถึง Fuzzy Load และความไม่แน่นอนของโหลด ในการพัฒนา และศึกษาต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] C.J. Rridenbaugh, D.A. DiMascio, and RD'Aquila. Voltage control improvement through capacitor and transformier tap optimization. IEEE Transaction on Power Systems 7(1) (February 1992): 222-227.
- [2] Y.Y. Hsu, K.L. Ho, C.C. Liang, T.S. Lai, K.K. Chen, and B.S. Cliang, Voltage control using a combined intcgr lieuar programming and rule-based approach. IEEE Transaction on Power Systems 7(2) (May 1992): 744-752.
- [3] E. Hobson Network constrained reactive power control using linear programming. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems 99(3) (May 1980): 868-877.
- [4] N.K. Tripathi, C.A. Martinez, and S.A. Nirenberg Reactive switching simulation in security analysis at Florida Power and Light System control center. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems 104(12) (December 1985) 3482-3485.
- [5] R. Yokoyania, T. Niiniura, and Y. Nakanishi A coordinated control of voltage and reactive power by heuristic modeling and approximate reasoning. IEEE Transaction on Power Systems 8(2) (May 1993) 636-645.
- [6] K. Tomsovic A fuzzy linear programming approach to the reactive power/voltage control problem. IEEE Transaction on Power Systems 7(1) (February 1992) 287-293.
- [7] M.M.A. Salania, and A.Y. Chikliani A simplified network approach to the VAR control problem for radial distribution systems. IEEE Trans. on Power Delivery 8(3) (July 1993) 1529-1535.
- [8] M. Kaplan Optimization of number, location, size, control type, and control setting of shunt capacitors on radial distribution feeders. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems 103(9) (September 1984) 2659-2663.
- [9] H. Duran Optimum number, location, and size of shunt capacitors in radial distribution feeders : a dynamic programming approach. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems 87(9) (September 1968) 1769-1774.

- [10] Y.Y. Hsu, and H.C. Kuo Dispatch of capacitors on distribution system using dynamic programming. IEEE Proceedings, Part C 140(6) (November 1993) 433-438.
- [11] S.H. Lee, and J.J. Crainger Optimal placement of fixed and switched capacitors on primary distribution feeders. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems 100(1) (January 1981) 345-352.
- [12] S. Civanlar, and J.J. Grainger Volt/Var control on distribution systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators, part 3 : The simulation results. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems 104(11) (November 1985) 3291-3297.
- [13] M.E. Baran, and F.F. Wu Optimal capacitor placement on radial distribution systems. IEEE Transaction on Power Delivery 4(1) (January 1989) 725-734.
- [14] Y.Y. Hsu and C.C. Yang A hybrid artificial neural network-dynamic programming approach for feeder capacitor scheduling. IEEE Transaction on Power Systems 9(2) (May 1994) 1069-1075.
- [15] M.M.A. Salama, and A.Y. Chikhani An expert system for reactive power control of a distribution system IEEE Transaction on Power Delivery 7(2) (April 1992) 940-945.
- [16] S. Sundliararajan, and A. Pahwa Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm IEEE Transaction on Power Systems 9(3) (August 1994) 1499-1507.
- [17] J.J. Paserba, D.J. Leonard, N.W. Miller, S.T. Nasiunann, M.G. Lauby, and F.P. Sener Coordination of a distribution level continuously controlled compensation device with existing substation equipment for long term VAR management. IEEE Transaction on Power Delivery 9(2) (April 1994) 1034-1040.
- [18] F.C. Lu, and Y.Y. Hsu Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming. IEEE Proceedings, Part C 142(6) (November 1995)
- [19] Feng-Chang Lu, and Yuan-Yih Hsu Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation. IEEE Transactions on Power Systems 12(2) (May 1997) 681-688.

- [20] Yuan-Yih Hsu, and Feng-Chang Lu A combined artificial neuron network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation. IEEE Transactions on Power Systems 13(4) (November 1998) 1265-1271.
- [21] Ruey-Hsun Liang, and Chen-Kuo Cheng Dispatch of Main Transformer ULTC and Capacitors in a Distribution System. IEEE Transactions on Power Delivery 16(4) (October 2001) 625-630.
- [22] Ruey-Hsun Liang, and Yung-Shuen Wang Fuzzy-Based Reactive Power and Voltage Control in a Distribution System. IEEE Transactions on Power Delivery 18(2) (April 2003) 610-618.
- [23] H.N.Ng, M.M.A.Salama, and A.Y.Chikhani Classification of capacitor allocation techniques. IEEE Transaction on Power Delivery 25 (Jan 2000) 387-392.
- [24] Zadeh, L. A. Fuzzy sets. Information and Control (1965): 338-353. Cited in Jang, J.-S. R. Fuzzy Sets. In T. Robbins (ed.), Neuro-Fuzzy and Soft Computing, p.14. USA: Prentice-Hall, 1997.
- [25] Jang, J.-S. R. Fuzzy Sets. In T. Robbins (ed.), Neuro-Fuzzy and Soft Computing, pp.13-30. USA: Prentice-Hall, 1997.
- [26] Zadeh, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. IEEE Transactions on Systems 3(1) (January 1973): 28-44. Cited in Jang, J.-S. R. Fuzzy Rules and Fuzzy Reasoning. In T. Robbins (ed.), Neuro-Fuzzy and Soft Computing, p.54. USA: Prentice-Hall, 1997.
- [27] Mamdani, E. H., and Assilian, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies 7(1) (1975): 1-13. Cited in Jang, J.-S, R. Fuzzy Inference Systems. In T. Robbins (ed.), Neuro-Fuzzy and Soft Computing, pp.74-81. USA: Prentice-Hall, 1997.
- [28] Takagi, T., and Sugeno, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on Systems 15 (1985):116-132. Cited in Jang, J.-S, R. Fuzzy Inference Systems. In T. Robbins (ed.), Neuro-Fuzzy and Soft Computing, pp.81-84. USA: Prentice-Hall, 1997.

- [29] Sugeno, M., and Kang, G. T. Structure identification of fuzzy model. Fuzzy Sets and System 28 (1988): 15-33. Cited in Jang, J.-S, R. Fuzzy Inference Systems. In T. Robbins (ed.), Neuro-Fuzzy and Soft Computing, pp.81-84. USA: Prentice-Hall, 1997.
- [30] Jang, J.-S. R. ANFIS:Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems. In T. Robbins (ed.), Neuro-Fuzzy and Soft Computing, pp.335-441. USA: Prentice-Hall, 1997.
- [31] Jang, J.-S. R., Mizutani, E. Supervised Learning Neural Networks. In T. Robbins (ed.), Neuro_Fuzzy and Soft Computing, pp.226-251. USA: Prentice-Hall, 1997.
- [32] Jang, J.-S. R. Least-Squares Methods for System Identification. In T. Robbins (ed.), Neuro-Fuzzy and Soft Computing, pp.95-110. USA: Prentice-Hall, 1997.
- [33] Jang, J.-S. R. Adaptive Networks. In T. Robbins (ed.), Neuro-Fuzzy and Soft Computing, pp.199-225. USA: Prentice-Hall, 1997.
- [34] John J. Grainger, William D. Stevenson, Jr. Power System Analysis. International Edition. Singapore : McGraw-Hill, 1994
- [35] Zimmerman, R.D.; Carlos, E.; Sánchez, M.; and Gan, D. Matpower3.0[Computer program]. PSerc, 2005. Available from: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower> [2006, June 10]
- [36] The MathWorks, Inc. MATLAB Fuzzy Logic Toolbox 2 User's Guide[online]. MA: The MathWorks, Inc., 2007. Available from: http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy.pdf [2007, March 1]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ระบบจำหน่ายสถานี นวนนคร 3

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสในระบบ

bus no.	type	ที่ตั้ง
1	3	ฝั่งขดลวด Primary หม้อแปลงจำหน่าย
2	1	ฝั่งขดลวด Secondary หม้อแปลงจำหน่าย
3	1	จุดแยกจ่ายไฟตามสายป้อน
4	1	สายป้อนที่ 1 กลางสาย
5	1	สายป้อนที่ 1 ปลายสาย
6	1	สายป้อนที่ 2 ปลายสาย
7	1	สายป้อนที่ 3 กลางสาย
8	1	สายป้อนที่ 3 ปลายสาย
9	1	สายป้อนที่ 4 กลางสาย
10	1	สายป้อนที่ 4 ปลายสาย
11	1	สายป้อนที่ 5 กลางสาย
12	1	สายป้อนที่ 5 ปลายสาย

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าในระบบ

from bus	to bus	R (p.u.)	X (p.u.)
1	2	0.015250	0.371590
2	3	0.007650	0.068830
3	4	0.075008	0.147556
4	5	0.092378	0.181726
3	6	0.077376	0.152215
3	7	0.072639	0.142896
7	8	0.112906	0.222110
3	9	0.113696	0.223663

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าในระบบ (ต่อ)

from bus	to bus	R (p.u.)	X (p.u.)
9	10	0.147647	0.290452
3	11	0.068691	0.135130
11	12	0.101063	0.198812



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลแรงดันและโหลดในระบบจำหน่าย

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลอัตราส่วนแรงดันตามตำแหน่งแท๊ปของหม้อแปลง TP1 ในระบบ

ตำแหน่ง แท๊ป	แรงดันด้าน Primary	แรงดันด้าน Secondary
1	115.0	25.4
2	115.0	25.1
3	115.0	24.8
4	115.0	24.5
5	115.0	24.3
6	115.0	24.0
7	115.0	23.7
8	115.0	23.4
9	115.0	23.1
10	115.0	22.8
11	115.0	22.5
12	115.0	22.2
13	115.0	21.9
14	115.0	21.7
15	115.0	21.4
16	115.0	21.1
17	115.0	20.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลโหลดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	สายป้อน 1		สายป้อน 2		สายป้อน 3		สายป้อน 4		สายป้อน 5	
	MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar
1	1.9	0.8	1.0	0.5	3.1	1.8	6.2	2.9	3.6	1.2
2	2.2	0.8	1.1	0.5	3.2	1.8	6.0	2.9	3.5	1.1
3	2.1	0.8	1.1	0.4	3.2	1.7	6.2	2.8	3.5	1.3
4	2.1	0.8	1.1	0.4	2.9	1.3	6.0	2.8	3.3	1.1
5	1.4	0.5	1.1	0.4	3.1	1.4	5.2	2.3	3.4	1.2
6	2.0	0.7	1.1	0.4	3.0	1.6	6.3	3.0	3.4	1.1
7	1.9	0.7	1.0	0.4	2.7	1.2	6.4	2.8	3.5	1.1
8	1.7	0.7	1.4	0.5	2.9	1.5	7.0	3.4	3.4	1.0
9	2.1	0.9	1.9	0.8	4.0	2.3	8.6	4.3	4.6	1.5
10	2.3	1.3	2.1	1.0	4.2	2.6	8.1	4.7	4.9	1.7
11	2.6	1.5	2.1	0.9	3.8	2.3	8.1	4.3	4.6	1.5
12	2.5	1.3	2.0	0.9	3.8	2.2	8.1	4.4	4.5	1.5
13	2.5	1.2	1.7	0.8	3.6	1.8	7.3	3.9	3.8	1.2
14	2.8	1.5	2.0	0.9	3.9	2.4	8.2	4.4	4.5	1.3
15	2.5	1.1	2.1	1.0	4.1	2.4	8.7	4.5	4.7	1.5
16	2.6	1.2	2.1	1.0	4.0	2.3	8.2	4.3	4.8	1.5
17	2.0	1.0	1.6	0.7	3.9	2.2	6.7	3.2	4.6	1.4
18	1.8	0.9	1.3	0.5	3.3	1.8	7.2	3.9	4.6	1.4
19	1.9	0.9	1.5	0.7	3.4	1.7	6.6	3.5	4.3	1.3
20	1.7	0.8	1.5	0.7	3.7	2.1	6.0	3.1	4.3	1.4
21	2.4	1.1	1.2	0.5	3.5	1.9	5.8	3.1	4.2	1.3
22	2.3	1.1	1.2	0.5	3.3	1.9	6.2	3.3	4.3	1.3
23	2.2	1.1	1.1	0.6	3.3	1.9	6.1	3.3	4.3	1.3
24	2.3	1.1	1.1	0.5	2.9	1.5	5.6	2.7	4.0	1.3

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลโหลดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	สายป้อน 1		สายป้อน 2		สายป้อน 3		สายป้อน 4		สายป้อน 5	
	MW	MVar	MW	MVar	MW	Mvar	MW	MVar	MW	MVar
1	1.8	0.9	0.9	0.3	3.0	1.5	5.7	2.8	3.4	1.2
2	2.3	1.3	1.0	0.5	3.2	1.8	5.7	2.6	3.1	1.1
3	1.8	0.9	1.1	0.5	3.2	1.6	5.8	2.7	3.2	1.1
4	1.9	0.9	1.0	0.4	2.8	1.2	5.6	2.6	3.0	1.0
5	1.6	0.7	1.0	5.0	3.2	1.5	5.6	2.5	2.9	0.9
6	1.9	0.9	1.1	0.4	3.0	1.4	6.3	2.9	3.1	1.0
7	1.8	0.8	1.0	0.4	2.5	1.1	6.3	3.0	2.9	1.0
8	1.5	0.7	0.9	0.3	2.9	1.5	7.4	3.5	2.9	0.9
9	1.7	0.7	0.9	0.3	3.3	1.7	7.9	4.0	3.1	0.9
10	2.1	1.1	1.0	0.4	3.4	1.9	7.9	4.2	3.1	1.0
11	1.7	0.9	1.1	0.5	3.5	1.9	7.8	4.2	3.1	1.1
12	1.8	1.0	1.1	0.5	3.3	1.8	7.6	4.3	3.3	1.1
13	2.0	1.0	0.8	0.3	2.9	1.4	7.4	3.6	2.9	0.9
14	2.1	1.0	1.0	0.5	3.5	1.9	8.0	4.3	3.4	1.2
15	2.1	1.1	1.1	0.5	3.5	1.9	7.6	3.8	3.3	1.1
16	1.9	0.9	1.1	0.5	3.4	1.8	7.5	4.0	3.2	1.1
17	1.5	0.6	1.1	0.5	3.0	1.6	6.5	3.2	2.9	0.9
18	1.5	0.7	0.9	0.4	3.1	1.5	7.0	3.7	2.9	1.0
19	1.5	0.8	1.0	0.5	2.7	1.3	7.1	3.6	3.0	1.0
20	1.3	0.6	1.1	0.4	3.0	1.5	6.8	3.2	3.2	1.1
21	1.4	0.6	0.9	0.4	2.8	1.4	6.3	3.2	3.3	1.1
22	1.5	0.7	0.9	4.0	3.1	1.5	6.5	3.5	3.4	1.2
23	1.4	0.6	0.9	0.3	2.7	1.3	6.5	3.2	3.3	1.2
24	1.5	0.6	0.8	0.3	2.6	1.1	6.1	2.9	3.1	1.1

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลโหลดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2551

ชั่วโมงที่	สายป้อน 1		สายป้อน 2		สายป้อน 3		สายป้อน 4		สายป้อน 5	
	MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar
1	1.9	0.8	0.8	0.3	2.7	1.2	4.3	1.7	3.3	1.3
2	2.0	0.9	1.0	0.4	2.7	1.3	4.2	1.7	3.2	1.3
3	2.0	0.8	0.9	4.0	2.6	1.2	4.1	1.8	3.1	1.3
4	1.8	0.8	0.9	0.3	2.3	1.1	4.1	1.8	2.9	1.1
5	1.3	0.6	0.8	0.3	2.5	1.1	4.2	1.8	2.8	1.1
6	1.4	0.5	0.8	0.3	2.3	1.0	4.3	1.8	3.0	1.0
7	1.4	0.6	0.7	0.2	2.2	0.9	4.3	1.7	2.7	1.0
8	1.2	0.5	0.6	0.1	2.7	1.3	4.3	1.8	2.5	1.0
9	1.2	0.5	0.8	0.3	3.1	1.5	4.9	2.4	2.8	0.9
10	1.4	0.6	0.9	0.4	3.1	1.6	5.2	2.6	2.9	1.0
11	1.1	0.4	1.0	0.4	3.0	1.5	5.3	2.7	2.9	1.0
12	1.0	0.5	0.9	0.4	2.7	1.4	5.3	2.8	3.1	1.2
13	1.0	0.5	0.7	0.2	2.8	1.3	5.3	2.7	2.9	1.2
14	1.0	0.5	0.9	0.4	3.0	1.6	5.3	2.8	3.2	1.3
15	1.1	0.4	1.0	0.4	2.9	1.6	5.3	2.6	3.3	1.2
16	1.0	0.4	0.9	0.4	2.8	1.4	4.7	2.2	3.3	1.3
17	0.8	0.3	0.8	0.3	2.5	1.2	4.3	1.9	3.3	1.2
18	0.7	0.4	0.6	0.3	2.6	1.1	4.1	1.8	3.3	1.2
19	0.6	0.4	0.6	0.3	2.4	1.0	4.2	1.8	3.1	1.2
20	0.5	0.3	0.6	0.3	2.2	1.1	4.2	2.0	3.3	1.3
21	0.6	0.3	0.6	0.3	2.5	1.2	4.0	1.8	3.3	1.2
22	0.5	0.3	0.5	0.3	2.4	1.2	4.2	1.8	3.5	1.3
23	0.5	0.3	0.5	0.3	2.4	1.2	4.1	1.8	3.3	1.2
24	0.6	0.3	0.6	0.3	2.1	1.1	4.3	1.8	3.4	1.3

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลแรงดันที่สถานีแต่ละวัน

ชั่วโมงที่	วันที่		
	20-ก.พ.-51	21-ก.พ.-51	24-ก.พ.-51
	แรงดัน (p.u.)	แรงดัน (p.u.)	แรงดัน (p.u.)
1	0.98087	0.97739	0.98464
2	0.97739	0.98319	0.99420
3	0.98290	0.98522	0.98899
4	0.98928	0.98087	0.99072
5	0.98348	0.98493	0.99623
6	0.98812	0.98667	0.99246
7	0.98174	0.98464	0.99652
8	0.98232	0.98232	0.99159
9	0.97942	0.98087	0.98812
10	0.98145	0.98667	0.98348
11	0.97217	0.98319	0.98609
12	0.98087	0.98174	0.98174
13	0.98812	0.98493	0.98957
14	0.97391	0.98029	0.98899
15	0.97565	0.98145	0.98754
16	0.97217	0.98580	0.99015
17	0.97797	0.98754	0.98899
18	0.98464	0.97594	0.98870
19	0.97072	0.97971	0.98406
20	0.98261	0.98087	0.99362
21	0.98029	0.98348	0.99101
22	0.97768	0.97710	0.99304
23	0.98754	0.97594	0.99101
24	0.98290	0.97942	0.99884

ตารางที่ ข.6 ขนาดหม้อแปลงจำหน่ายที่บัสในระบบ

บัสที่	ขนาดหม้อแปลงจำหน่ายที่บัสรวม (kVA)
4	8,500
5	9,430
6	3,000
7	1,250
8	5,315
9	12,875
10	9,440
11	1,965
12	4,550

ตารางที่ ข.7 ตัวอย่างการเฉลี่ยโหลดตามขนาดหม้อแปลงเพื่อใช้เป็นข้อมูลผู้ใช้ไฟ

สาย ป้อน	ข้อมูลโหลด ที่สถานี		บัสที่	หม้อแปลงรวม (kVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง แต่ละสายป้อน	โหลดผู้ใช้ไฟ	
	MW	MVar				MW	MVar
1	2.4	1.1	4	8,500	47.41%	1.1378	0.5215
			5	9,430	52.59%	1.2622	0.5785
2	1.2	0.5	6	3,000	100.00%	1.2000	0.5000
3	3.5	1.9	7	1,250	19.04%	0.6664	0.3618
			8	5,315	80.96%	2.8336	1.5382
4	5.8	3.1	9	12,875	57.70%	3.3464	1.7886
			10	9,440	42.30%	2.4536	1.3114
5	4.2	1.3	11	1,965	30.16%	1.2668	0.3921
			12	4,550	69.84%	2.9332	0.9079

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลโหลดสูงสุด ต่ำสุด ที่ใช้สร้างข้อมูลฝึกสอน

บัสที่	โหลดสูงสุด		โหลดต่ำสุด	
	MW	MVar	MW	MVar
4	1.706637	0.853318	0.331846	0.237033
5	1.893363	0.946682	0.368154	0.262967
6	2.400000	1.100000	0.500000	0.200000
7	0.875857	0.495050	0.114242	0.057121
8	3.724143	2.104950	0.485758	0.242879
9	5.885055	2.884831	1.211629	0.576966
10	4.314945	2.115169	0.888371	0.423034
11	1.628703	0.573062	0.331773	0.150806
12	3.771297	1.326938	0.768227	0.349194

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบตี กอวัฒนา เกิดวันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2526 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2547 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกรประจำส่วนซ่อมบำรุง บริษัทเหล็กสยามยามาโตะ จำกัด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย