

การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับการวิเคราะห์
กระแสผิดพ่วงในระบบไฟฟ้ากำลัง

A COMPARATIVE STUDY BETWEEN ANN AND ANFIS FOR
FAULT CURRENT ANALYSIS IN POWER SYSTEMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๕๖

KMITL-2013-EN-M-020-167

การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับการวิเคราะห์
กระแสผิดพ่วงในระบบไฟฟ้ากำลัง

A COMPARATIVE STUDY BETWEEN ANN AND ANFIS FOR
FAULT CURRENT ANALYSIS IN POWER SYSTEMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-020-167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A COMPARATIVE STUDY BETWEEN ANN AND ANFIS FOR
FAULT CURRENT ANALYSIS IN POWER SYSTEMS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013
KMITL-2013-EN-M-020-167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับการวิเคราะห์กระแสผิดปกติพ่วงในระบบไฟฟ้ากำลัง

Thesis Title A Comparative Study between ANN and ANFIS for Fault Current Analysis in Power Systems

นักศึกษา นายชาญชัย จิตรชู

รหัสประจำตัว 53610506

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-M-020 167

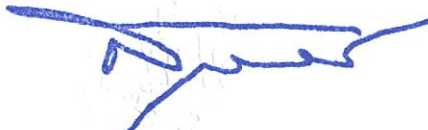
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชาย	ชมภูอินไหว	
ดร.นิรุช	จิรสวรรณกุล	
ผศ.ดร.ปานจิต	ดำรงกุลกำจร	
ดร.วรวรรณ	นาคะวิโร	
รศ.ดร.สมชาติ	จิริวิภากร	จ. สมชาติ

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2556 เวลา 13.30-15.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุขชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2556
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับการวิเคราะห์กระแสผิดพลาดในระบบไฟฟ้ากำลัง
นักศึกษา	นายชาญชัย จิตรชู
รหัสประจำตัว	53610506
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมชาติ จิรวិภากร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวเกี่ยวกับการวิเคราะห์กระแสผิดพลาดแบบสมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยวิเคราะห์กระแสฟอลต์ที่ตำแหน่งของบัสและสายส่ง โดยใช้ ANFIS ได้ประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยสร้างกฎเกณฑ์ฟัซซี่ เปรียบเทียบกับทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมแบบมีหลายชั้นซ่อน ชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ ลักษณะการเรียนรู้แบบมีผู้สอน ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาจาก การจำลองระบบ 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ระบบ 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบ IEEE 14 บัส โดยใช้ระบบทดสอบจากโปรแกรม PowerWorld การใช้ ANFIS สามารถหาคำตอบได้รวดเร็วกว่าโครงข่ายประสาทเทียม

Thesis	A Comparative Study Between ANN and ANFIS For Fault Current Analysis in Power Systems
Student	Mr.Chanchai Jitchoo
Student ID.	53610506
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somchat Jiriwibhkorn

ABSTRACT

This thesis discusses the balance fault analysis in the power system. The analysis of the fault is at the location of buses and lines. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) is compared with Artificial Neural Networks typed Multi Layer Neural Networks with Back-Propagation learning algorithm and supervised learning. The data used in this thesis came from 3 bus 3 generator system, 7 bus 5 generator system and IEEE 14-bus system in PowerWorld program. The ANFIS obtains the solutions faster than Artificial Neural Networks.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชาติ จิรวิภากร ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สุดท้ายผู้วิจัยต้องขอขอบคุณเพื่อนของข้าพเจ้า คุณชัยโย ตระกูลไทยรักษ์ และ คุณอรรถกร เสียงใส ที่เป็นเสมือนคูคิดและเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าที่ติดลุดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้ บิดา มารดา และคุณตา คุณยาย ซึ่งเป็นที่รักและเคารพอย่างยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ชาญชัย จิตรชู



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	3
บทที่ 2 การเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง	4
2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง	4
2.1.1 การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง	5
2.1.2 อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง	5
2.2 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง	6
2.2.1 ชนิดของการลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง	7
2.3 การคำนวณกระแสลัดวงจรในทางปฏิบัติ	8
บทที่ 3 การวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบสมมาตร	11
3.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์ฟอลต์แบบสมมาตร	11
3.2 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบสมมาตรโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	15
บทที่ 4 โครงข่ายประสาทเทียม	16
4.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบมีผู้ฝึกสอน	17
4.1.1 โครงข่ายประสาทป้อนไปข้างหน้าแบบหลายชั้น	17
4.1.1.1 โมเดลพื้นฐานของนิเวรอน	17
4.1.1.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1.1.3 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม	21
4.1.1.4 ขั้นตอนการเรียนรู้	22
4.2 การเลือกชนิดของอินพุทและเอาต์พุท	25
4.3 การเลือกรูปแทนของอินพุทและเอาต์พุท	25
4.4 การนอร์มอลไลซ์ของข้อมูลสำหรับสอนโครงข่ายประสาทเทียม	26
4.5 การเลือกขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม	29
4.6 วิธีสอนโครงข่ายประสาทเทียม	30
บทที่ 5 ระบบอนุमानฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้	31
5.1 พื้นฐานแนวคิดแบบฟัซซี	31
5.2 เซตแบบฉบับ	33
5.3 ฟัซซีเซต	34
5.4 การดำเนินการทางฟัซซี	37
5.4.1 ยูเนียน	37
5.4.2 อินเตอร์เซกชัน	38
5.4.3 คอมพลีเมนต์	38
5.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	39
5.5.1 ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	39
5.6 ตัวแปรเชิงภาษา	43
5.7 กฎของฟัซซี	44
5.8 ระบบอนุमानฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้	45
5.8.1 โครงสร้างระบบอนุमानฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้	45
5.8.2 ขั้นตอนการเรียนรู้แบบไฮบริด	48
บทที่ 6 การหาค่าตอบของกระแสฟอลต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและ	
ระบบอนุमानฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้	49
6.1 เงื่อนไขในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	49
6.1.1 เงื่อนไขในการฝึกสอน	49
6.1.1.1 Performance Gradient Factor	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.1.1.2 μ Factor	49
6.1.1.3 ปริมาณข้อมูลฝึกสอน	50
6.1.1.4 คุณภาพของข้อมูลฝึกสอน	50
6.1.2 เงื่อนไขในการทดสอบ	50
6.1.2.1 ประสิทธิภาพในการทดสอบ	50
6.1.3 ตัวแปรในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	51
6.1.4 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดสอบ	51
6.1.5 ขั้นตอนการฝึกสอนและทดสอบ	51
6.1.5.1 เงื่อนไขโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ	51
6.1.5.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ	53
6.2 เงื่อนไขในการฝึกสอนและทดสอบระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้	55
6.2.1 เงื่อนไขในการฝึกสอน	55
6.2.1.1 ปริมาณข้อมูลฝึกสอน	55
6.2.1.2 คุณภาพของข้อมูลฝึกสอน	55
6.2.2 เงื่อนไขในการทดสอบ	56
6.2.2.1 ประสิทธิภาพในการทดสอบ	56
6.2.3 ตัวแปรในการฝึกสอนและทดสอบระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้	56
6.2.3.1 ระบบทดสอบ 3 บัสดู 3 เครื่องกำเนิด,ระบบ 7 บัสดู 5 เครื่องกำเนิด และระบบทดสอบ IEEE 14 บัสดู	56
6.2.4 โครงสร้างและเงื่อนไขของระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ ใช้ในการทดสอบ	56
6.2.5 ขั้นตอนการฝึกสอนและการทดสอบ	59
6.2.5.1 เงื่อนไขต่างๆภายในระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้	59
6.2.5.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้	60
บทที่ 7 ผลการทดลอง	62
7.1 การทดสอบระบบไฟฟ้า 3 บัสดู 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	62
7.2 การทดสอบระบบไฟฟ้า 7 บัสดู 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	66
7.3 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัสดู	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	80
8.1 การประยุกต์ใช้ระบบอนุমানฟิซซีโครงข่ายปรับตัวได้	80
8.2 ข้อดีและข้อเสียของการประยุกต์ใช้ระบบอนุমানฟิซซีโครงข่ายปรับตัวได้ใน การวิเคราะห์หากกระแสฟอลต์	81
เอกสารอ้างอิง	82
ภาคผนวก ก. ระบบไฟฟ้าที่ใช้ทำการศึกษา	83
ก.1 ระบบไฟฟ้า 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	84
ก.2 ระบบไฟฟ้า 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	89
ก.3 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส	96
ประวัติผู้เขียน	106

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 การส่งผ่านในกระบวนการเรียนรู้แบบผสมสำหรับ ANFIS	48
7.1 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่บัสของระบบ 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	63
7.2 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่สายส่งของระบบ 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	64
7.3 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่บัสของระบบ 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	67
7.4 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่สายส่งของระบบ 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	69
7.5 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่บัสของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส	73
7.6 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่สายส่งของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส	76



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balanced Three Phase Fault)	7
2.2 การลัดวงจรแบบเฟส-เฟส (Line to Line Fault)	7
2.3 การลัดวงจรแบบเฟส-เฟส-ดิน (Line to line to Ground Fault)	8
2.4 การลัดวงจรแบบเฟส-ดิน (Single Line to Ground Fault)	8
2.5 กระแสลัดวงจรสลับตามช่วงเวลา	9
3.1 ตัวอย่างซึ่งมีทั้งหมด 6 บัส และสมมุติว่าเกิดลัดวงจรที่บัส 2	12
3.2 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 3.1	13
3.3 ระบบ IEEE 14 บัส	15
4.1 ประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม	16
4.2 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งนิวรอนหนึ่งอินพุทแบบไม่มีไบแอส	17
4.3 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งนิวรอนหนึ่งอินพุทแบบมีไบแอส	17
4.4 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งนิวรอนแบบหลายอินพุท	18
4.5 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำกัดเชิง	19
4.6 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น	19
4.7 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอกซิกมอยด์	20
4.8 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์	20
4.9 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหนึ่งชั้น	21
4.10 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น	21
5.1 เหตุผลแบบจริงเท็จ (บูลีนลอจิก) กับเหตุผลแบบฟัซซี (ฟัซซีลอจิก)	32
5.2 ความไม่แน่นอน (uncertainty)	33
5.3 ตัวอย่างเซตแบบฉบับ	33
5.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในเซตผู้ที่ไม่แต่งงาน	34
5.5 การความเป็นสมาชิกของเซตแบบฉบับและเซตแบบฟัซซี	35
5.6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซีแบบวิยุต A	36
5.7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซีแบบต่อเนื่อง A	36
5.8 ยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B	37
5.9 Intersection ของฟัซซีเซต A และ B	38
5.10 คอมพลีเมนต์ของฟัซซีเซต A	38
5.11 กราฟฟังก์ชันสามเหลี่ยม	40

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 กราฟฟังก์ชันสามเหลี่ยมคางหมู	41
5.13 กราฟฟังก์ชันเกาส์เซียน	41
5.14 กราฟฟังก์ชันระฆังคว่ำ	42
5.15 กราฟฟังก์ชันซิกมอยด์	43
5.16 ตัวอย่างตัวแปรเชิงภาษา	44
5.17 ตัวอย่างปริภูมิรูปแบบการจัดกลุ่มด้วยกฎฟuzzy	44
5.18 โครงสร้างของ ANFIS	46
5.19 โครงสร้าง ANFIS รูปแบบอื่น ที่มี 2 อินพุต 2 หลักปฏิบัติการกระทำ โมเดลฟuzzy Sugeno ...	47
6.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในระบบไฟฟ้า	51
6.2 โพล์วชาร์ตแสดงการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ	54
6.3 โปรแกรมแสดงการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ	55
6.4 โปรแกรมแสดงการฝึกสอนของระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้	57
6.5 โครงสร้างของระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ที่ใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ในบัส	58
6.6 โครงสร้างของระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ที่ใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ในสายส่ง	58
6.7 ชนิดและจำนวนของเมมเบอร์ชิพที่ใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ในบัส	59
6.8 ชนิดและจำนวนของเมมเบอร์ชิพที่ใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ในสายส่ง	60
6.9 โพล์วชาร์ตแสดงการทดสอบของระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้	61
7.1 การแสดงค่า MSE ของชุดฝึกสอนเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที).....	63
7.2 การแสดงค่า MSE ของชุดทดสอบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที).....	64
7.3 การแสดงค่า MSE ของชุดฝึกสอนเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที).....	65
7.4 การแสดงค่า MSE ของชุดทดสอบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที).....	65
7.5 การแสดงค่า MSE ของชุดฝึกสอนเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที).....	68
7.6 การแสดงค่า MSE ของชุดทดสอบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที).....	68
7.7 การแสดงค่า MSE ของชุดฝึกสอนเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที).....	70
7.8 การแสดงค่า MSE ของชุดทดสอบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที).....	71
7.9 การแสดงค่า MSE ของชุดฝึกสอนเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที).....	75
7.10 การแสดงค่า MSE ของชุดทดสอบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที).....	75
7.11 การแสดงค่า MSE ของชุดฝึกสอนเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที).....	78
7.12 การแสดงค่า MSE ของชุดทดสอบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที).....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา \times ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการศึกษาเรื่องการลัดวงจรเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากธรรมชาติ ความผิดพลาดหรือความตั้งใจของมนุษย์ ทุกครั้งที่เกิดการลัดวงจรจะมีกระแสไหลมากผิดปกติ และถ้าไม่มีการป้องกันหรือกำจัดจุดที่เกิดการลัดวงจรออกจากระบบให้เร็วที่สุดจะทำให้ อุปกรณ์ต่างๆภายในระบบเสียหายได้ ดังนั้นอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกัน [1]

การคำนวณขนาดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นไม่จำเป็นต้องมีความรุนแรงมากนักเพียงใดเพื่อหาขนาดของอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม อุปกรณ์ป้องกันต้องมีความสามารถตัดวงจรออกจากระบบ และป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ให้เกิดความเสียหาย มีการคำนวณหากระแสลัดวงจรเพื่อใช้ประกอบในการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งได้มีการนำโครงข่ายประสาทยูนิฟิเคชันมาประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งฟอลต์ [2] และมีการใช้ระบบอนุมานฟัซซีที่มีการปรับตัวสำหรับแยกแยะชนิดของฟอลต์ (Fault) มาบ้างแล้ว

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการนำเสนอสถิติระบบอนุมานฟัซซีที่มีการปรับตัว (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems: ANFIS) มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณขนาดกระแสลัดวงจร ซึ่งทำการคำนวณการลัดวงจรแบบสมมาตรที่บัส และสายส่ง ทำการศึกษาระบบ 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ระบบ 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบทดสอบ IEEE 14 bus โดยการจำลองจากโปรแกรม PowerWorld และได้มีการเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างโครงข่ายประสาทยูนิฟิเคชัน (ANN) กับระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS)

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ปัจจุบันปัญหากระแสลัดวงจร เป็นสิ่งสำคัญที่ควรทำการศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบระบบป้องกันหรือเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันและทำการกำจัดกระแสลัดวงจรอย่างรวดเร็ว ปัญหากระแสลัดวงจรเป็นปัญหาต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง คือเกิดการลัดวงจร ระบบป้องกันสามารถตัดจุดลัดวงจรออกจากระบบได้อย่างรวดเร็วและระบบที่เหลือสามารถจ่ายไฟฟ้าต่อไปได้เรียกว่าระบบมีเสถียรภาพ

ประโยชน์ของการศึกษากระแสลัดวงจรและเสถียรภาพของระบบ เพื่อออกแบบระบบป้องกันในระบบไฟฟ้าและคู่มือจำกัดการทำงานของอุปกรณ์หรือใช้ในการเลือกอุปกรณ์ เช่น เบรกเกอร์ถ้าเลือกความเร็วในการตัดช้าเกินไปทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายได้และทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากเบรกเกอร์ตัดจุดลัดวงจรออกจากระบบ ระบบที่ต้องการเสถียรภาพสูงก็ต้องลงทุนในเรื่องของอุปกรณ์มากซึ่งต้องพิจารณาเป็นกรณีไปโดยพิจารณาถึงความจำเป็นและความเสียหายที่เกิดขึ้นตามมาเป็นเกณฑ์ การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรและคำนวณขนาดกระแสลัดวงจรอย่างถูกต้องและรวดเร็ว เพื่อทำการกำจัดกระแสลัดวงจรอย่างรวดเร็วและทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือนำเสนอวิธีการหากระแสฟอลต์แบบสมมาตรที่บัสและสายส่งที่มีความถูกต้องและใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธีการของโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้ระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้มาทำการวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบสมมาตร ที่ต้องการใช้ข้อมูลจำนวนมากหรือต้องการหาคำตอบของกระแสฟอลต์แบบทันทีทันใดตามเวลาจริง (Real time) และยังสามารถนำคำตอบที่ได้จากการคำนวณไปเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันได้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากคุณสมบัติของระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ที่สามารถเรียนรู้การคำนวณฟังก์ชันลักษณะต่างๆและข้อมูลที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยมาก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงตั้งสมมุติฐานว่า สามารถนำระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ มาใช้หาคำตอบของกระแสฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Fault) หรือที่เรียกว่าการลัดวงจรสามเฟส (Three Phase Fault) อย่างถูกต้องได้ โดยระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ที่ได้รับการฝึกสอนจากชุดข้อมูลที่มีปริมาณ และคุณภาพเพียงพอ จะสามารถหาคำตอบได้แม่นยำ และใช้นเวลาน้อยกว่าวิธีการคำนวณดั้งเดิม

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาวิธีการคำนวณหากระแสฟอลต์แบบสมมาตร
2. ศึกษาโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการคำนวณหากระแสฟอลต์แบบสมมาตรที่บัสและสายส่งอย่างถูกต้อง สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยึดถือโปรแกรม PowerWorld เป็นวิธีการหาคำตอบมาตรฐาน และถือว่าคำตอบของกระแสฟอลต์แบบสมมาตรที่บัสและสายส่ง จาก PowerWorld ถูกต้อง โดยไม่มีเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบ
3. ศึกษาการใช้ระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ในการแก้ปัญหาต่างๆ
4. ศึกษาการใช้ระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้และโครงข่ายประสาทเทียม ในการคำนวณกระแสฟอลต์แบบสมมาตรที่บัสและสายส่งอย่างถูกต้อง โดยพิจารณาระบบไฟฟ้า 3 ระบบ คือ ระบบ 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ระบบ 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

5. เปรียบเทียบการใช้ระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ โดยเลือกใช้โมเดลฟuzzy Sugeno อันดับที่ 1 และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบไฮบริด และโครงข่ายประสาทเทียมใช้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt ในระบบ 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ระบบ 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้

- 1.ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่ต้องใช้ในการศึกษากระแสฟลด์แบบสมมาตรอย่างถูกต้องในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2.ศึกษาการใช้งานโปรแกรม PowerWorld เพื่อใช้ในการเตรียมข้อมูลฝึกสอนและทดสอบระบบอนุমানพีชซีโครงข่ายปรับตัวได้และโครงข่ายประสาทเทียม
- 3.ทำการจำลองเหตุในระบบ 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ระบบ 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบทดสอบ IEEE 14 บัส โดยเปลี่ยนแปลงโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 4.นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองการหากระแสฟลด์แบบสมมาตรที่บัสและสายส่ง มาหาคำตอบ
- 5.ศึกษาการทำงานของระบบอนุমানพีชซีโครงข่ายปรับตัวได้และโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้เพื่อเปรียบเทียบการหาคำตอบของกระแสฟลด์แบบสมมาตร ซึ่งระบบอนุমানพีชซีโครงข่ายปรับตัวได้ ใช้โมเดลพีชซี Sugeno อันดับที่ 1 และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบไฮบริดสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมใช้แบบแพร่ค้ำย้อนกลับและใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt
- 6.นำข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม PowerWorld ไปฝึกสอนและทดสอบระบบอนุমানพีชซีโครงข่ายปรับตัวได้และโครงข่ายประสาทเทียม
- 7.หาโครงสร้างของระบบอนุমানพีชซีโครงข่ายปรับตัวได้และโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาสูงสุดโดยใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error)
- 8.วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

Fault in the Power Systems

2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลัง หมายถึงการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าตามประเภทการใช้งาน โดยส่งจากสถานีไฟฟ้าผ่านสายไฟฟ้าแรงสูง สถานีไฟฟ้าย่อย หม้อแปลงแปลงไฟฟ้าให้ต่ำลง ไปยังบ้านที่พักอาศัย สำนักงานหรือโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บ้านเรือนทั่วไปนั้นก็ใช้หลักการไหลแบบเดียวกัน คือเริ่มจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โรงงานผลิตไฟฟ้า จ่ายกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงมาตามสายไฟฟ้า มาจนกระทั่งถึงสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งมีหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือต่ำลงได้ตามความต้องการใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากการส่งกระแสไฟฟ้าได้ผ่านมาตามสายไฟฟ้าในระยะทางไกล จะทำให้มีการสูญเสียแรงดันไฟฟ้าส่วนหนึ่ง เมื่อส่งไฟฟ้ามาถึงพื้นที่ที่ต้องการใช้ไฟฟ้าก็จะต้องลดแรงดันไฟฟ้าลงระดับหนึ่งเพื่อลดอันตราย เมื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าให้พอเหมาะแล้วก็จะส่งตามสายไฟฟ้ามายังหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ติดอยู่ตามเสาไฟฟ้าในแหล่งชุมชนนั้นๆ เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าอีกครั้งก่อนส่งผ่านเข้าสู่อาคารบ้านเรือน เมื่อมีการใช้ไฟฟ้าจากกิจกรรมต่างๆ ในอาคารบ้านเรือนก็จะไหลกลับไปตามสายไฟฟ้าอีกเส้นหนึ่งสู่แหล่งกำเนิดอีกครั้ง ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการครบวงจรการไหลของกระแสไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฯ ส่งจ่ายไปยังบ้านเรือนทั่วไปเรียกว่าระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระบบด้วยกัน ในการใช้งานนั้น การไฟฟ้าฯ จะพิจารณาให้เหมาะสมตามความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าว่าจะใช้ระบบใด โดยพิจารณาจากปัจจัยสำคัญ 2 ประการ คือ ปริมาณการใช้ไฟฟ้า ประเภทและจำนวนของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้ภายในบ้าน ระบบไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ ดังนี้

1. ระบบไฟฟ้า 1 เฟส คือระบบไฟฟ้าที่มีสายไฟฟ้าจำนวน 2 เส้น เส้นที่มีไฟเรียกว่าสายไฟหรือสายเฟสหรือสายไลน์ เขียนแทนด้วยตัวอักษร L (Line) เส้นที่ไม่มีไฟเรียกว่านิวทรัลหรือสายศูนย์ เขียนแทนด้วยตัวอักษร N (Neutral) ทดสอบได้โดยใช้ไขควงวัดไฟ เมื่อใช้ไขควงวัดไฟแตะสายเฟสหรือสายไลน์หลอดไฟจะเรืองแสงที่อยู่ภายในไขควงจะติด สำหรับสายนิวทรัลหรือสายศูนย์จะไม่ติด แรงดันไฟฟ้าที่มีขนาด 220 โวลต์ (Volt) ใช้สำหรับบ้านที่พักอาศัยทั่วไปที่มีการใช้ไฟฟ้าไม่มากนัก

2. ระบบไฟฟ้า 3 เฟส คือระบบไฟฟ้าที่มีสายเส้นไฟจำนวน 3 เส้น และสายนิวทรัล 1 เส้น จึงมีสายรวม 4 เส้น ระบบไฟฟ้า 3 เฟส สามารถต่อใช้งานเป็นระบบไฟฟ้า 1 เฟส ได้ โดยการต่อจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟสใดเฟสหนึ่งและสายนิวทรอลอีกเส้นหนึ่ง แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายเฟสเส้นใดเส้นหนึ่งกับสายนิวทรอลมีค่า 220 โวลต์ (Volt) และแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายเฟสด้วยกันมีค่า 380 โวลต์ (Volt) ระบบนี้จึงเรียกว่าระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย 380/220 โวลต์ (Volt) ระบบนี้มีข้อดีคือสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าระบบ 1 เฟส ถึง 3 เท่า จึงเหมาะสมกับสถานที่ที่ต้องการใช้ไฟฟ้ามกๆ เช่น อาคารพาณิชย์ โรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เป็นต้น

2.1.1 การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง

พลังงานไฟฟ้ากลายเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งของการดำเนินชีวิตและการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้าน การพัฒนาอุตสาหกรรม เมื่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าขยายตัวมากยิ่งขึ้น ในขณะที่เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ย่อมเกิดผลเสียหายต่อระบบการผลิตในภาคอุตสาหกรรมและอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบไฟฟ้าใหญ่ขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลขณะลัดวงจรจะสูงมาก เพื่อที่จะป้องกันระบบไฟฟ้าให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น แก่ระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้ากรณีระบบผิดปกติ ระบบป้องกันไฟฟ้าที่ดีย่อมไม่มีผลกระทบต่อระบบการส่งและจ่ายไฟฟ้า ดังนั้นหน้าที่ของระบบป้องกันไฟฟ้าที่ดี คือต้องสามารถตัดระบบไฟฟ้าออกจากวงจรให้รวดเร็วที่สุดกรณีเกิดภาวะผิดปกติในระบบไฟฟ้า นอกจากนี้คุณสมบัติที่ดีของระบบป้องกันคือ มีความเชื่อถือได้ดี ทำงานถูกต้อง ทำงานโดยรวดเร็ว จึงต้องมีการหากระแสฟอลต์ให้ถูกต้องและมีความรวดเร็วที่สุดเพื่อออกแบบระบบป้องกันไฟฟ้าที่มีความเชื่อถือสูง

2.1.2 อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง

อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินหรือกระแสลัดวงจร ได้แก่ ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์และรีเลย์ป้องกัน

1.ฟิวส์ เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินและป้องกันการลัดวงจร ฟิวส์จะต่ออันดับอยู่กับวงจรไฟฟ้าและจะหลอมละลายเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเกินพิกัดหรือลัดวงจร ฟิวส์มีคุณสมบัติที่ตัดกระแสลัดวงจรได้พิกัดสูงสุดอีกทั้งมีคุณสมบัติสามารถจำกัดค่ากระแสลัดวงจร โดยให้กระแสไหลผ่านฟิวส์ต่ำกว่าค่ากระแสลัดวงจรที่จะขึ้นถึงสูงสุดนั้นคือฟิวส์จำกัดกระแส

2.เซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินและป้องกันการลัดวงจร เช่นเดียวกับฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานด้วยกลไกการตัดวงจรโดยอัตโนมัติ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ กลไกการตัดวงจรจะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรออกจากระบบโดยอัตโนมัติ ส่วนการสับเข้าอาจบังคับด้วยมือหรือสับเข้าโดยอัตโนมัติด้วยรีเลย์ชนิดสับเข้า

3.รีเลย์ป้องกัน ในขณะที่ระบบไฟฟ้าเกิดฟอลต์ขึ้น จำเป็นต้องตัดวงจรไฟฟ้าออกจากระบบด้วยความเร็วสูง ทั้งนี้เพื่อลดอันตรายและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์ป้องกันพร้อมทั้งค้นหาสภาพผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ เพื่อสั่งการให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรด้วยความเร็วสูงโดยอัตโนมัติ เราเรียกอุปกรณ์ควบคุมการป้องกันนี้ว่า รีเลย์ป้องกัน

2.2 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้าที่ดีไม่ได้หมายถึงระบบที่มีการผลิตและจ่ายไฟฟ้าได้อย่างเดียวเมื่อต้องการโหลด แต่ต้องมีการเลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถป้องกันหรือทนต่อเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นได้โดยไม่เสียหาย ด้วย การเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นเรื่องปกติที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้หมดและมีสาเหตุของการเกิดได้หลายประการ เช่น ฟ้าผ่าลงเสาส่งและสายส่ง กิ่งไม้พาดสายในระบบจำหน่าย ชาวบ้านยิงลูกกล้วยเล่น การเสื่อมของฉนวนไฟฟ้า อุบัติเหตุ เป็นต้น

เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้าอุปกรณ์ป้องกันประเภทเซอร์กิตเบรกเกอร์หรือฟิวส์ควรสามารถตัดไฟได้อย่างปลอดภัย โดยอุปกรณ์ไม่เสียหาย กรณีที่เลือกขนาดของอุปกรณ์ผิดเมื่อเกิดลัดวงจรรุนแรงขึ้น อุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวอาจเสียหายและไม่สามารถนำมาใช้งานได้อีก ดังนั้น การศึกษาและวิเคราะห์การลัดวงจรไฟฟ้าในระบบก็เพื่อเลือกอุปกรณ์ให้สามารถตัดกระแสลัดวงจรได้อย่างปลอดภัย

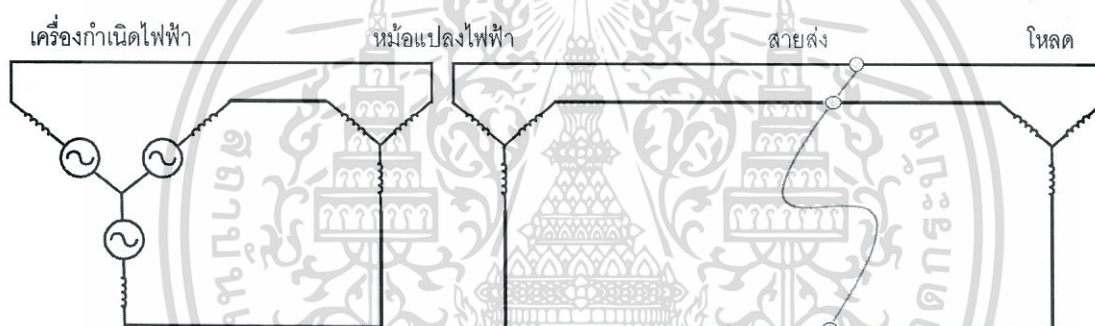
ฟอลต์เป็นปรากฏการณ์ของสภาวะผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็น 2 หัวข้อ คือ ฟอลต์อนุกรม (Series Fault) และฟอลต์ขนาน (Shunt Fault) ฟอลต์อนุกรมเป็นสภาวะผิดปกติในเฟสของระบบ เช่น สายส่งขาด หรือไม่สามารถจ่ายไฟได้หนึ่งเฟสหรือสองเฟส เป็นต้น ส่วนฟอลต์ขนานเป็นสภาวะผิดปกติที่เกิดระหว่างเฟสหรือระหว่างเฟสกับดิน ซึ่งได้แก่ การลัดวงจรแบบต่างๆ ฟอลต์ขนานมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์มากกว่าฟอลต์อนุกรมเพราะกระแสที่เกิดขึ้นในฟอลต์ขนานมีขนาดสูงมากและทำให้เกิดอุณหภูมิสูงมากในอุปกรณ์ ถ้าหากไม่รีบกำจัดฟอลต์ออกจากระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์ระบบส่วนใหญ่จึงเน้นหนักไปทางด้าน การลัดวงจรเมื่อพูดถึงเรื่องของฟอลต์ แต่ความจริงแล้วควรจะคำนึงถึงฟอลต์ทั้งสองอย่างเพราะฟอลต์อนุกรมก็มีผลทำให้การส่งจ่ายไฟทำได้น้อยลงหรือต้องหยุดชะงัก การศึกษาฟอลต์ขนานก็เพื่อหาขนาดของกระแสลัดวงจรและขนาดของอุปกรณ์ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ และระบบการป้องกัน เช่น ระบบรีเลย์ต่างๆ ส่วนการศึกษาฟอลต์อนุกรมนี้มีประโยชน์เมื่อต้องการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

การเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังอาจเกิดขึ้นช่วงไหนของระบบก็ได้แต่ส่วนใหญ่เกิดในสายส่งเหนือดิน (Overhead) ประมาณ 50-70% ส่วนที่เหลือจะเป็นฟอลต์ในสายส่งใต้ดิน หม้อแปลงสถานีไฟฟ้าย่อย ฟอลต์ที่เกิดขึ้นเริ่มแรกเกือบทั้งหมดเป็นฟอลต์แบบขนานหรือการลัดวงจร การเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้ามีทั้งการลัดวงจรแบบสมมาตร (Symmetrical fault) จะเรียกว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balanced Three Phase Fault) และการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร

(Unsymmetrical fault) ซึ่งได้แก่ การลัดวงจรแบบเฟส-เฟส (Line to Line Fault) แบบเฟส-เฟส-ดิน (Line to Line to Ground Fault) และเฟส-ดิน (Single Line to Ground Fault) ในระบบจำหน่ายและแรงต่ำ การลัดวงจรแบบสมมาตรให้กระแสลัดวงจรรุนแรงกว่าการลัดวงจรแบบไม่สมมาตรแต่ทั้งนี้การวิเคราะห์การลัดวงจรแบบไม่สมมาตรก็ยังคงมีความจำเป็นอยู่เหมือนกัน เพราะการพิจารณาเรื่องอาร์กฟอลต์ (Arcing Fault) หรือการป้องกันเพลิงไหม้อันเนื่องมาจากฟอลต์ลงดินก็ยังต้องใช้การคำนวณกระแสลัดวงจรลงดินเหมือนกัน

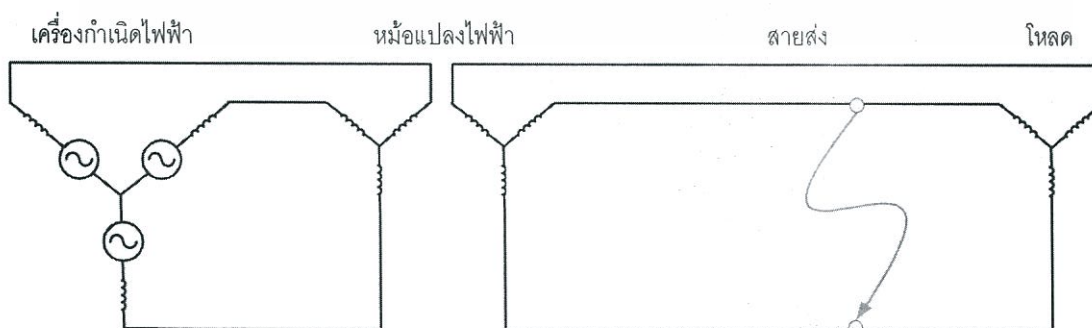
2.2.1 ชนิดของการลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง

การลัดวงจรแบบสมมาตร (Symmetrical fault) จะเรียกว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balanced Three Phase Fault) เป็นการลัดวงจรทั้งสามเฟส ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balanced Three Phase Fault)

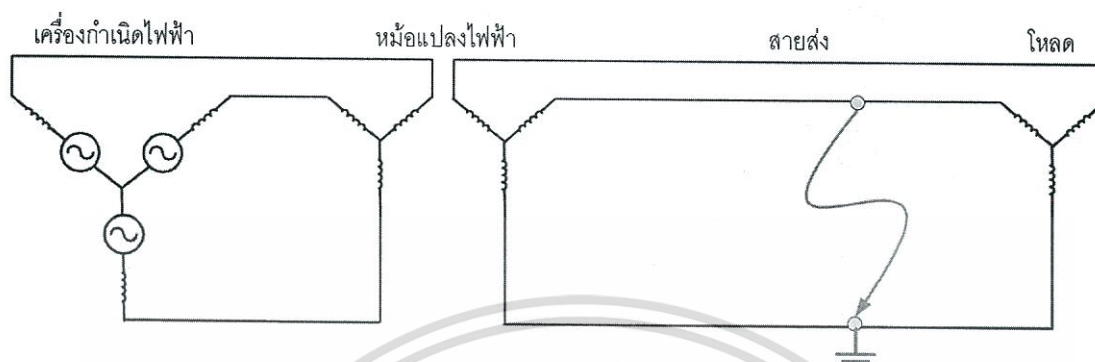
การลัดวงจรแบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical fault) ได้แก่ การลัดวงจรแบบเฟส-เฟส (Line to Line Fault) เป็นการลัดวงจรระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่ง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การลัดวงจรแบบเฟส-เฟส (Line to Line Fault)

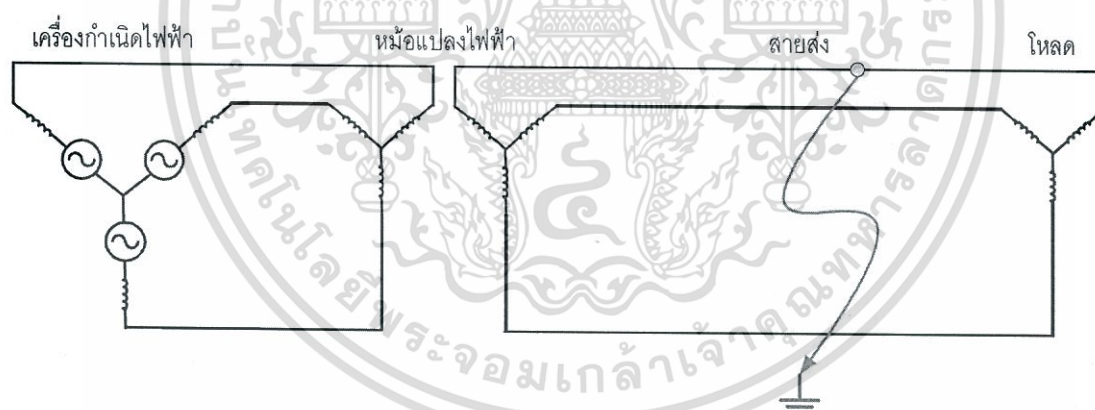
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลัดวงจรแบบเฟส-เฟส-ดิน (Line to Line to Ground Fault) เป็นการลัดวงจรระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่งและลงดิน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การลัดวงจรแบบเฟส-เฟส-ดิน (Line to Line to Ground Fault)

การลัดวงจรแบบเฟส-ดิน (Single Line to Ground Fault) เป็นการลัดวงจรเฟสใดเฟสหนึ่งและลงดิน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การลัดวงจรแบบเฟส-ดิน (Single Line to Ground Fault)

2.3 การคำนวณกระแสลัดวงจรในทางปฏิบัติ

ในทางปฏิบัติเราคำนวณหากระแสลัดวงจรจากวงจรสมมูลจะทำได้อย่างไร เพราะกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นมีกระแสลัดวงจรตรงและกระแสลัดวงจรสลับ กระแสลัดวงจรสลับไม่ใช่สัญญาณไซน์ และในส่วนของกระแสลัดวงจรตรงมีค่าไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับจังหวะการเกิดลัดวงจรว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเกิดในช่วงสัญญาณใดของแหล่งจ่ายไฟและกระแสลัดวงจรตรงนี้มีค่าลดลงตามเวลาจนเป็นศูนย์
วิธีการพิจารณาคำนวณกระแสลัดวงจรในทางปฏิบัติจึงทำดังนี้

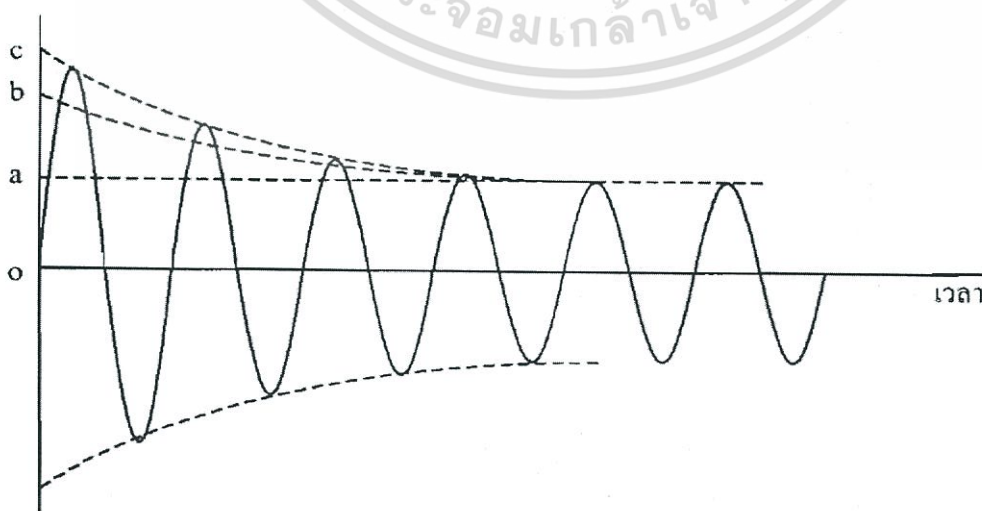
1. ส่วนของกระแสลัดวงจรตรงให้ใช้ตัวประกอบคูณแทนที่จะหาค่ากระแสตรงที่แท้จริง
ซึ่งอาจจะเป็น 1.6, 1.4 หรืออื่นๆ ขึ้นอยู่กับระบบ

2. ส่วนของกระแสลัดวงจรกระแสสลับนั้นค่ากระแสเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา แต่ช่วงที่สำคัญ
และนำมาใช้ในทางปฏิบัติจริงๆ นั้นมีอยู่ 3 ช่วงเท่านั้น คือ ช่วงที่ 1 ช่วงเกิดลัดวงจรเริ่มแรง อุปกรณ์
ป้องกัน เช่น เบรกเกอร์หรือฟิวส์ยังไม่เปิดวงจรออก กระแสลัดวงจรมีค่าสูงมากและอุปกรณ์ป้องกัน
สามารถทนได้ในช่วงเริ่มแรกนี้หรือไม่ ช่วงที่ 2 ช่วงอุปกรณ์ป้องกันเปิดวงจรออก ช่วงนี้จะเกิดอาร์กที่
หน้าสัมผัสของอุปกรณ์ กระแสลัดวงจรในช่วงนี้มีค่าน้อยกว่าตอนเกิดเริ่มแรกและอุปกรณ์ป้องกัน
สามารถตัดกระแสลัดวงจรในช่วงนี้ได้หรือไม่ ช่วงที่ 3 ช่วงเกิดลัดวงจรคงที่ถ้าอุปกรณ์ป้องกันไม่เปิด
วงจร ต้องพิจารณาถึงกระแสดังกล่าวเพื่อดูว่าก่อความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบอย่างไร ถ้ามี
กระแสลัดวงจรคงที่ขนาดดังกล่าวไหลผ่านตลอดเวลา

ดังนั้น แทนที่จะต้องหาค่ากระแสลัดวงจรกระแสสลับตามเวลาซึ่งเป็นเรื่องยุ่งยากพอสมควรก็
เหลือเพียงการหากระแสลัดวงจรใน 3 ช่วงดังกล่าวเท่านั้นที่จะนำค่ากระแสที่คำนวณได้มาใช้ในการ
เลือกอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมต่อไป

วิธีการหากระแสลัดวงจรมี 3 ช่วง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน
พิจารณากระแสลัดวงจรสลับตามช่วงเวลา รูปที่ 2.5 กระแสลัดวงจรมีค่าสูงในช่วงแรกและลดลงจนมี
ค่าคงที่ กระแสลัดวงจรในช่วงที่มีค่าคงที่ คือมียอดสัญญาณ oa ส่วนในช่วงที่เบรกเกอร์หรือฟิวส์เปิด
วงจร คือหลังการเกิดกระแสลัดวงจรไปแล้ว 2-3 ไซเคิล จากการเขียนแนวเส้นเอกซ์โพเนนเชียล
(Exponential) ต่อจากกระแสคงที่ ไปยังแกนกระแสได้ค่าที่จุด b และส่วนยอดสัญญาณของกระแส
ลัดวงจรเริ่มแรก คือ oc ดังนั้นกระแส rms ที่แบ่งเป็น 3 ช่วงดังกล่าวเรียกว่า

กระแส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{กระแสลัดวงจรสับทรานเซียน (Sudtransient)} \quad |I''| = \frac{oc}{\sqrt{2}} \quad (2.1)$$

$$\text{กระแสลัดวงจรทรานเซียน (Transient)} \quad |I'| = \frac{ob}{\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

$$\text{กระแสลัดวงจรคงที่ (Steady State)} \quad |I| = \frac{oa}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

เพื่อให้การคำนวณลัดวงจรสามารถทำได้ง่ายเราอาจสมมุติแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในเครื่องจักรมีค่าคงที่และรีแอกแตนซ์ของกระแสลัดวงจรใน 3 ช่วงดังกล่าวมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเพื่อให้ได้กระแสลัดวงจรเป็นไปตามที่เกิดขึ้นจริง สมการของกระแสลัดวงจรสลับสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$|I| = \frac{oa}{\sqrt{2}} = \frac{|E_{go}|}{X_d} \quad (2.4)$$

$$|I'| = \frac{ob}{\sqrt{2}} = \frac{|E_{go}|}{X'_d} \quad (2.5)$$

$$|I''| = \frac{oc}{\sqrt{2}} = \frac{|E_{go}|}{X''_d} \quad (2.6)$$

เมื่อ E_{go} แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องจักรตอนยังไม่ได้จ่ายโหลด

X_d รีแอกแตนซ์แนวแกนขั้วแม่เหล็ก

X'_d ทรานเซียนรีแอกแตนซ์แนวแกนขั้วแม่เหล็ก

X''_d สับทรานเซียนรีแอกแตนซ์แนวแกนขั้วแม่เหล็ก

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การวิเคราะห์ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Faults) เรียกว่า การลัดวงจรแบบสามเฟส (Three Phase Fault) เท่านั้น

บทที่ 3

การวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบสมมาตร Symmetrical Fault Current Analysis

การลัดวงจรแบบสมมาตร (Symmetrical Faults) เป็นการลัดวงจรที่เกิดขึ้นก็ต่อเมื่อตัวนำไฟฟ้า 3 เฟส ลัดวงจรเข้าด้วยกัน อาจมีการลัดวงจรลงกราวด์ เมื่อเกิดการลัดวงจรแล้วระบบยังคงรักษาสมดุลของระบบได้ เรียกการลัดวงจรชนิดนี้ว่า การลัดวงจรสามเฟส (Three Phase Fault)

3.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์ฟอลต์แบบสมมาตร [1]

การคำนวณกระแสลัดวงจรโดยใช้อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยแก้ไขปัญหาคำนวณและต้องจัดรูปของระบบให้อยู่ในฟอร์มที่จะใช้คอมพิวเตอร์ได้ คือ จัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ เมตริกซ์ที่นิยมใช้กันมากและสะดวกที่สุดในการคำนวณกระแสลัดวงจร ได้แก่ Z_{BUS} วิธีการคำนวณหา Z_{BUS} มักใช้กันมี 2 วิธี คือ การอินเวอร์ส (Inverse) ของ Y_{BUS} และการเพิ่มอุปกรณ์เข้าไปที่ละอุปกรณ์เพื่อฟอร์ม Z_{BUS} (Add Branch-Add Link) ในทางปฏิบัติมักใช้แบบหลังมากกว่าเพราะเสียเนื้อที่และเวลาในการคำนวณของคอมพิวเตอร์น้อยกว่า สำหรับในระบบไฟฟ้ากำลังมักฟอร์ม Z_{BUS} แล้วเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์

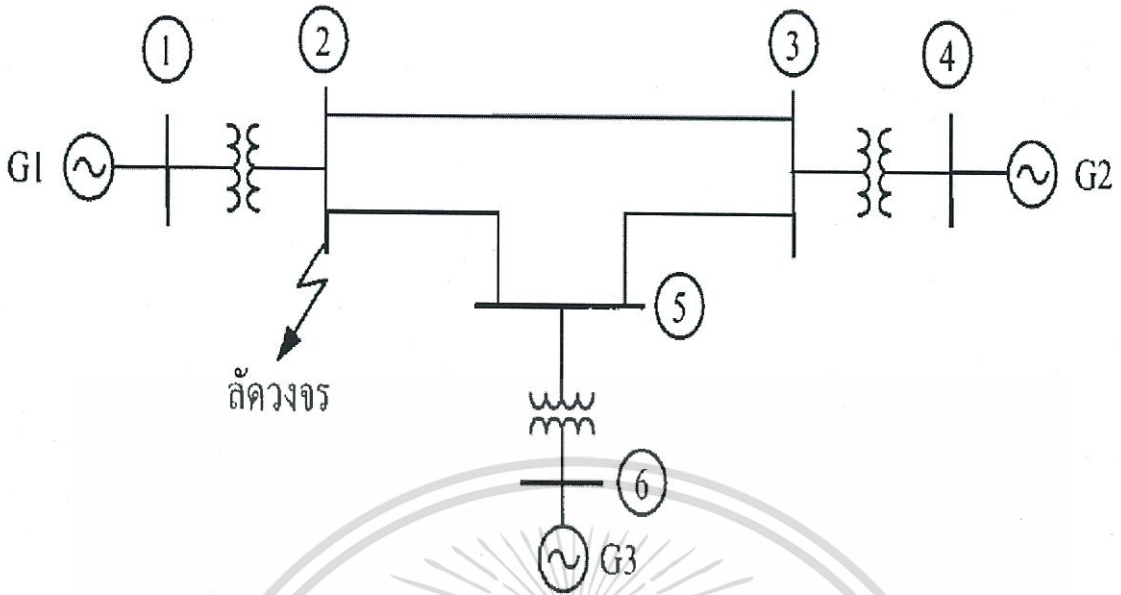
ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสบัสสามารถแสดงเป็น

$$V_{BUS} = Z_{BUS} I_{BUS} \quad (3.1)$$

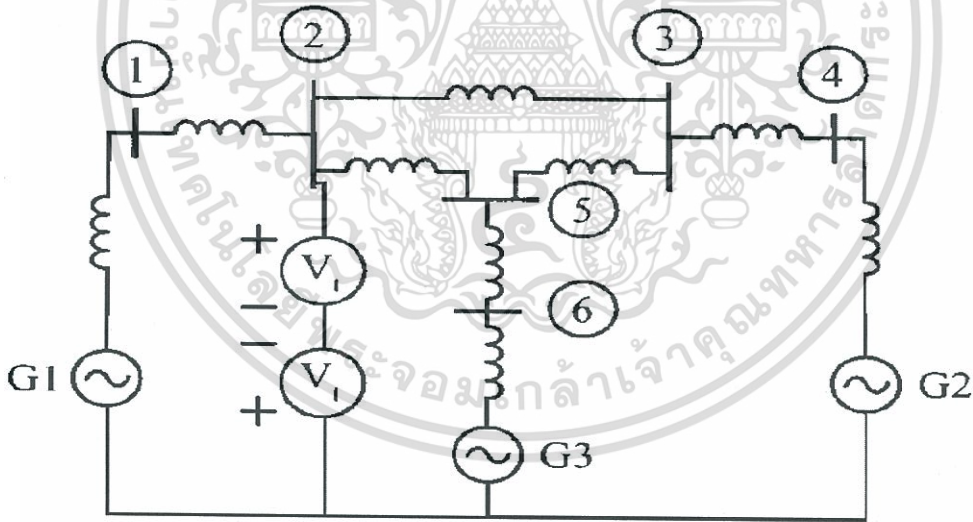
เมื่อ V_{BUS} แรงดันไฟฟ้าที่บัส

I_{BUS} กระแสจากแหล่งจ่ายไฟเข้าที่บัส บัสใดไม่มีแหล่งจ่ายไฟบัสนั้น $I_{BUS} = 0$

พิจารณาทิศทางกระแสลัดวงจรจากบัสอิมพีแดนซ์ใช้ตัวอย่างซึ่งมีทั้งหมด 6 บัส และสมมุติว่าเกิดลัดวงจรที่บัส 2 ดังรูปที่ 3.1

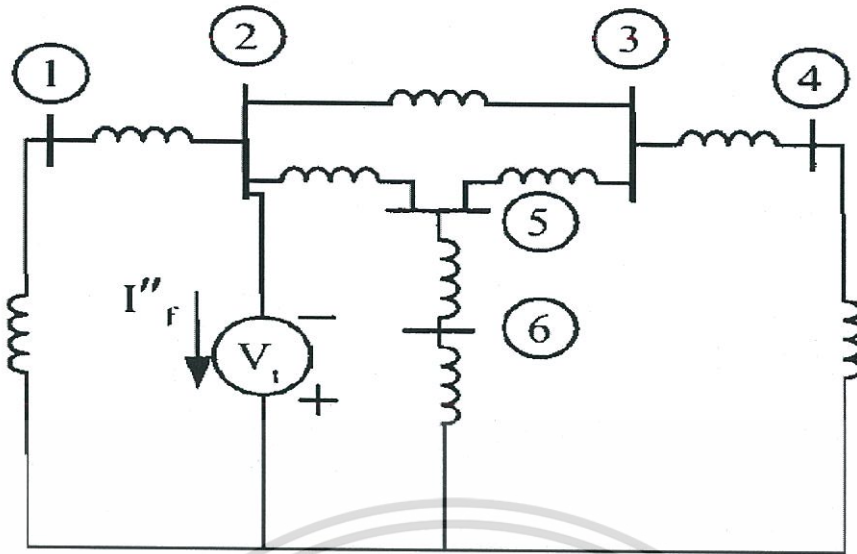


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างซึ่งมีทั้งหมด 6 บัส และสมมุติว่าเกิดลัดวงจรที่บัส 2



(ก) วงจรสมมูลของระบบขณะเกิดการลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) วงจรสมมูลเทวินิน

รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 3.1

จะเห็นว่าแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียว คือ $-V_t$ ที่บัส 2 และกระแสลัดวงจร I_f'' ในเมตริกซ์ I_{BUS} เพราะสมการที่ (3.1) นั้นกระแสถูกนิยามว่าเป็นกระแสที่ไหลเข้าบัส ส่วนกระแสในบัสอื่นๆเป็นศูนย์ เพราะไม่มีแหล่งจ่ายไฟในวงจรเทวินิน เมื่อใช้สมการที่ (3.1) กับระบบ ในรูปที่ (3.2) จะได้สมการที่ 3.2

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ -V_t \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \cdots & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & Z_{BUS} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{61} & \cdots & \cdots & \cdots & Z_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_f'' \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

ในสมการที่ (3.2) ค่าที่ทราบ คือ Z_{BUS} และ V_t สิ่งที่ต้องการหาคือ ΔV_i ของบัสต่างๆ I_f'' จากสมการที่ (3.2)

เราสามารถหาค่าต่างๆได้ดังนี้

$$-V_t = -Z_{22} I_f'' \quad (3.3)$$

$$I_f'' = \frac{V_t}{Z_{22}} \quad (3.4)$$

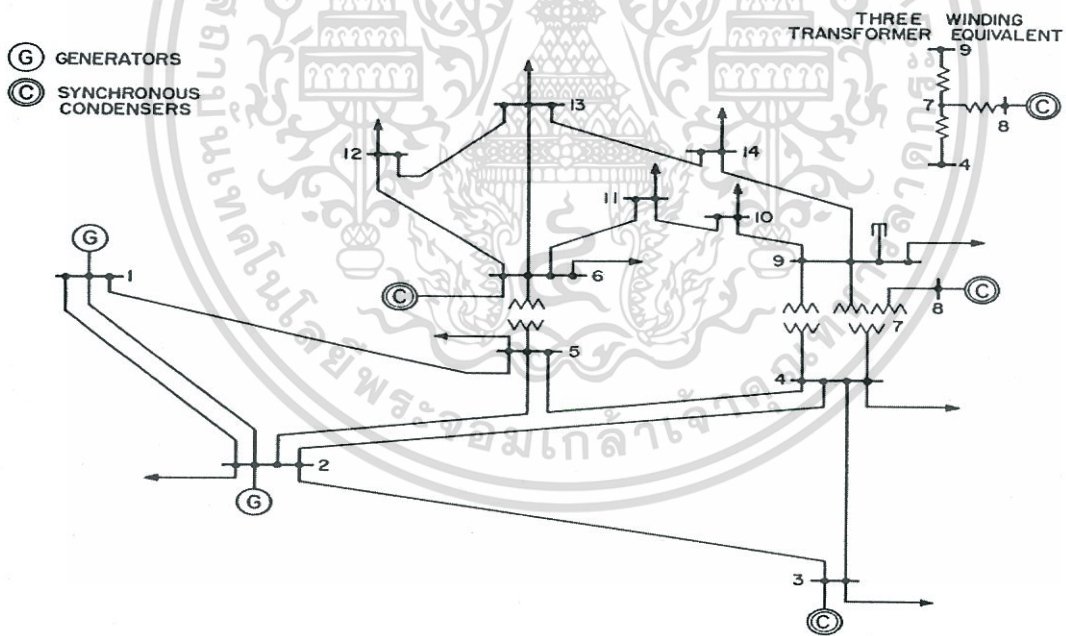
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta V_i = \frac{-Z_{ik}}{Z_{kk}} \times V_t = -I_f'' Z_{ik} \quad (3.14)$$

$$I_f'' = \frac{V_t}{Z_{kk}} \quad (3.15)$$

3.2 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบสมมาตรโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรสามเฟส (Three Phase Fault) และใช้โปรแกรม (PowerWorld) แสดงผลเป็นแผนภาพเส้นเดียว (Single Line Diagram) ทำให้ผู้ใช้สามารถทำความเข้าใจและนำเสนอได้โดยง่าย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การจำลองการหากระแสลัดวงจรสามเฟส 3 บัส และ 7 บัส ในโปรแกรม (PowerWorld) ส่วน 14 บัส นำมาจาก IEEE 14 บัส ดังรูปที่ 3.3 ระบบ IEEE 14 บัส[6] และนำมาเขียนแผนภาพเส้นเดียว (Single Line Diagram) ในโปรแกรม (PowerWorld) โดยทั้งหมดจะหากระแสลัดวงจรสามเฟสที่บัสและที่สายส่งเพื่อนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์



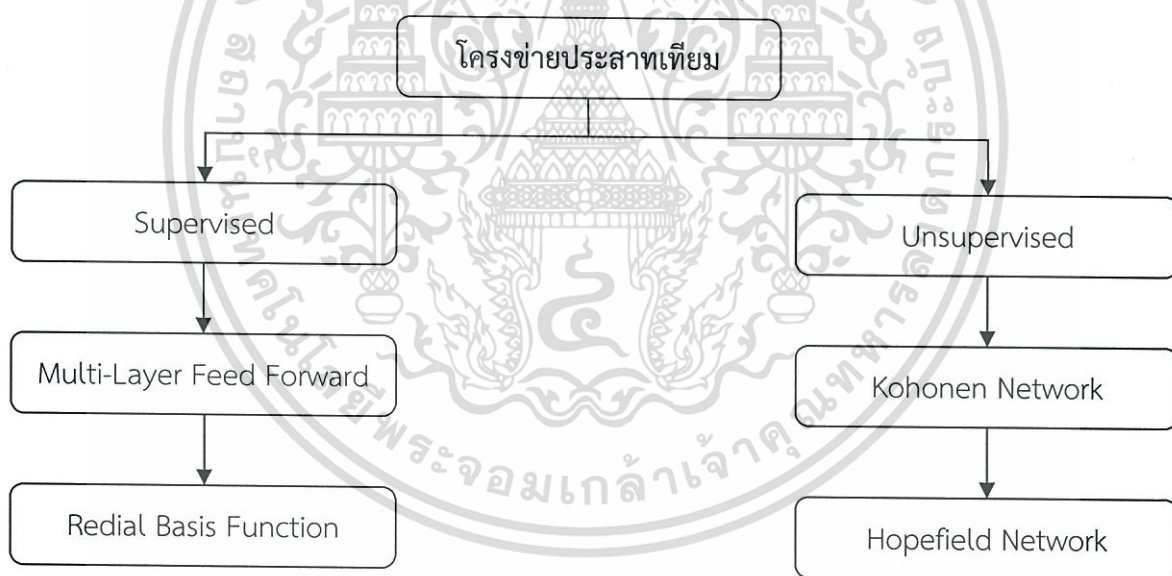
รูปที่ 3.3 ระบบ IEEE 14 บัส [6]

บทที่ 4

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks)

โครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยหน่วยพื้นฐานที่เรียกว่า เซลล์ประสาท (neuron) ที่ต่อกันในลักษณะอนุกรมและขนาน หน่วยพื้นฐานนี้จำลองหรือลอกแบบมาจากการทำงานของสมองมนุษย์ ฟังก์ชันการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม โดยส่วนมากจะหาได้จากการเชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยพื้นฐาน เราสามารถสอนโครงข่ายประสาทเทียมในการเรียนรู้และจดจำข้อมูลหรือฟังก์ชันซับซ้อนต่างๆ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เชื่อมต่อระหว่างหน่วยพื้นฐานเหล่านั้น โครงข่ายประสาทเทียมถูกนำมาใช้ประยุกต์ในการแก้ปัญหาต่างๆ หลายสาขา เช่น Pattern Recognition, Identification, Classification, Speech, Vision และ Control Systems

เราสามารถแบ่งประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมได้ดังรูปที่ 4.1 [2]



รูปที่ 4.1 ประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นเฉพาะโครงข่ายประสาทเทียมแบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised Neural Network) ชนิด Multi-Layer Feed Forward เนื่องจากมีการนำไปใช้งานมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง (Power Systems)

4.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised Neural Network)

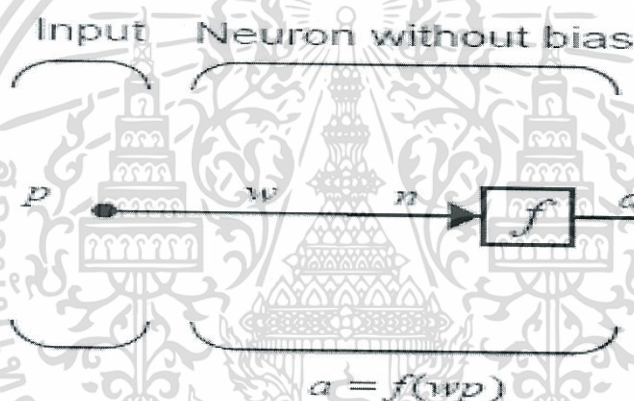
ลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมแบบมีผู้ฝึกสอน คือช่วงระหว่างการเรียนรู้(training) จะต้องใช้ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต ที่เตรียมไว้ในช่วงแรกมาใช้ในการเรียนรู้และจดจำรูปแบบความสัมพันธ์ต่างๆ ของข้อมูลเหล่านั้น

4.1.1 โครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้าแบบหลายชั้น (Multi-Layer Feed Forward Neural Networks)

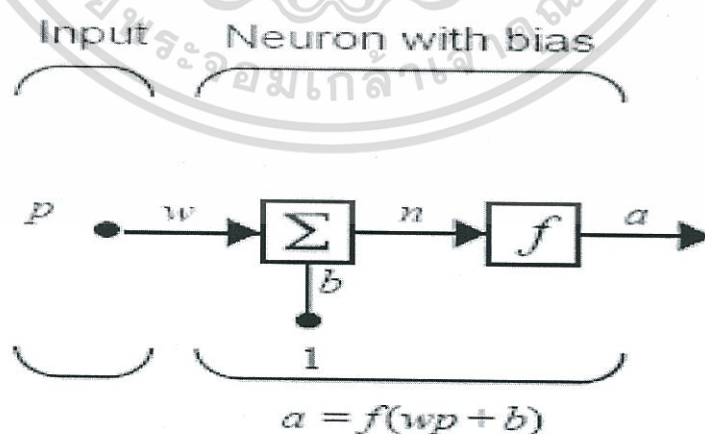
โครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้าแบบหลายชั้น เป็นที่นิยมนำมาใช้งานเป็นส่วนมาก ส่วนต่างๆ ของโครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้าแบบหลายชั้นประกอบด้วย

4.1.1.1 โมเดลพื้นฐานของนิวรอน

นิวรอนพื้นฐานที่มีหนึ่งอินพุตตามรูปที่ 4.2 เป็นแบบไม่มีค่าไบแอส รูปที่ 4.3 เป็นแบบมีค่าไบแอส และนิวรอนที่มีหลายอินพุตดังแสดงในรูปที่ 4.4

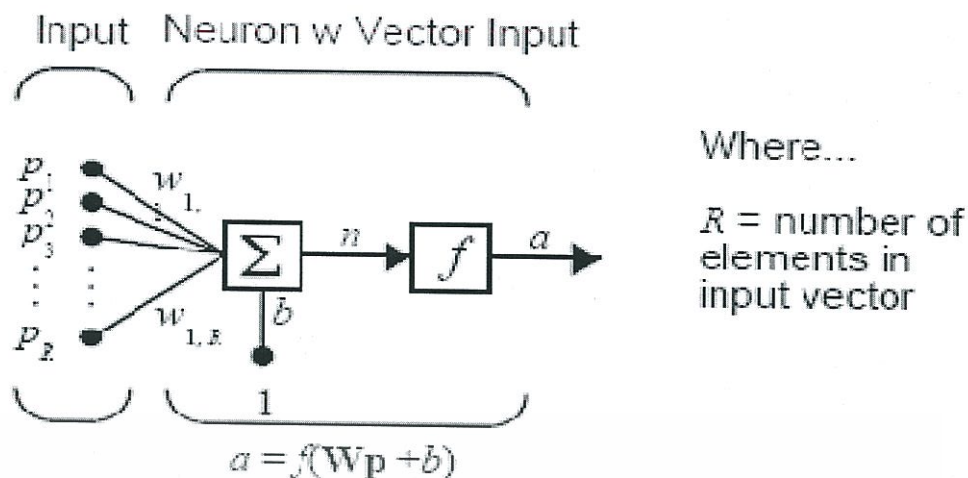


รูปที่ 4.2 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งนิวรอนหนึ่งอินพุตแบบไม่มีไบแอส [8]



รูปที่ 4.3 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งนิวรอนหนึ่งอินพุตแบบมีไบแอส [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งนิวรอนแบบหลายอินพุต [8]

โดยที่

p คืออินพุต (Input)

w คือค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight)

b คือค่าไบแอส (Bias)

f คือฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)

ในรูปที่ 4.4 แสดงรูปของนิวรอน 1 นิวรอน ที่ประกอบด้วย R อินพุต ซึ่งสมการความสัมพันธ์ของ n , p , w และ b สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.1

$$n = p_1 w_{1,1} + p_2 w_{1,2} + \dots + p_R w_{1,R} + b \quad (4.1)$$

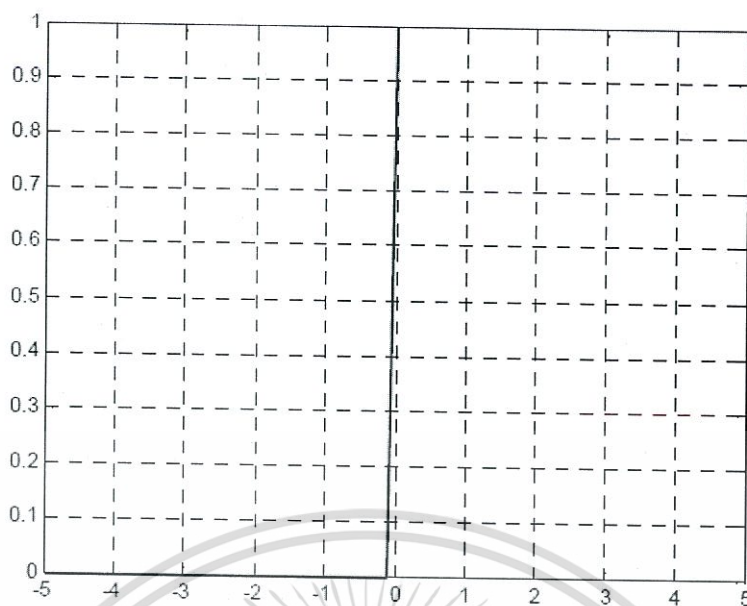
4.1.1.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)

ฟังก์ชันถ่ายโอนมีอยู่มากมายหลาย ๆ ชนิดด้วยกัน เช่น ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำกัดเชิง (Hard-limit) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น (linear) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอจิสติกมอยด์ (Log-Sigmoid) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์ (Tan-Sigmoid) และอื่นๆ

1) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำกัดเชิง (Hardlim) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.2

$$f(n) = \begin{cases} 0 & ;n \leq 0 \\ 1 & ;n \geq 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

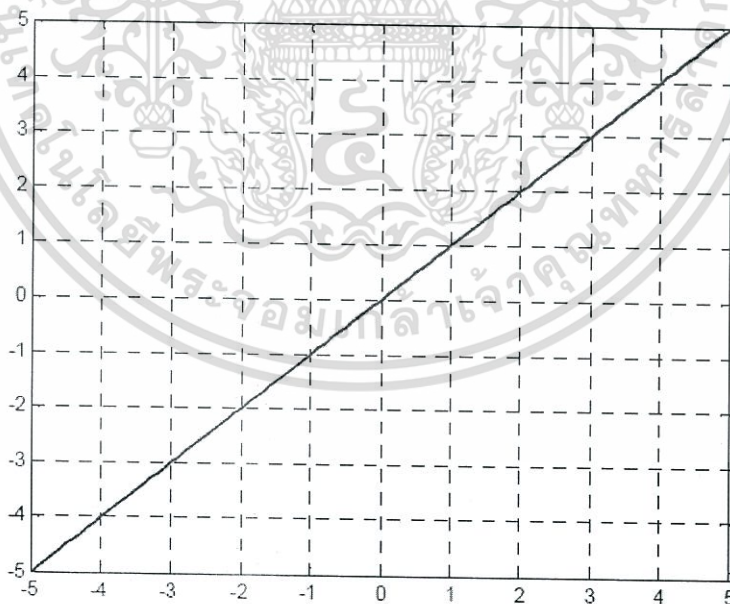
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำกัดเชิง [3]

- 2) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น (Purelin) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.3

$$f(n) = n \quad (4.3)$$

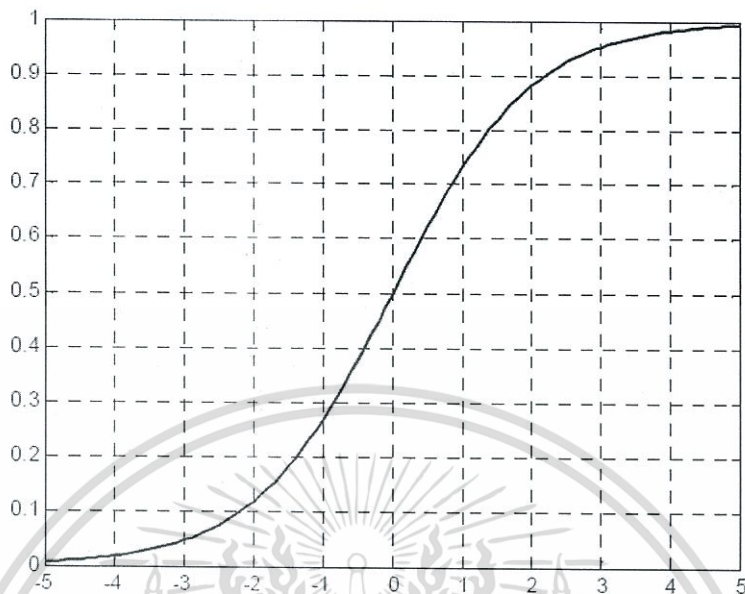


รูปที่ 4.6 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น [3]

- 3) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอกซิกมอยด์ (log-Sigmoid) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

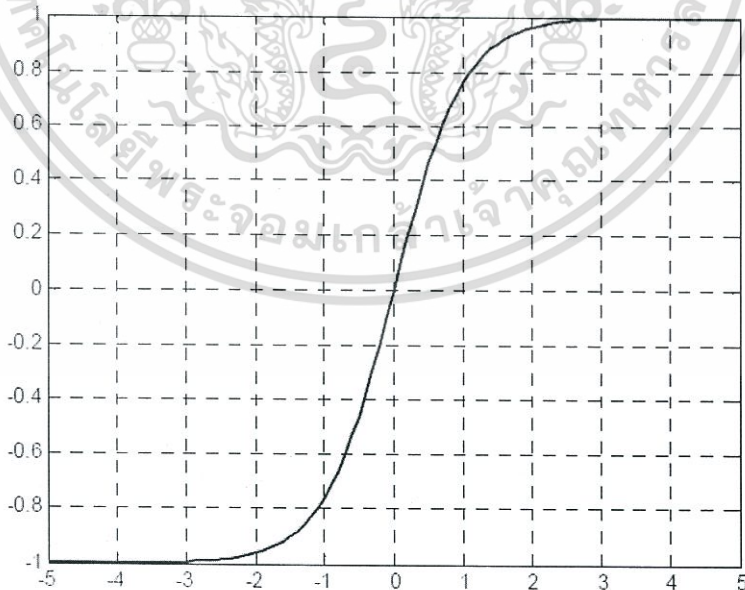
$$f(n) = \frac{1}{1 + \exp(-n)} \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.7 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอคซิกมอยด์ [3]

- 4) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์ (Tan-Sigmoid) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.5

$$f(n) = \frac{2}{1 + \exp(-2n)} - 1 \quad (4.5)$$

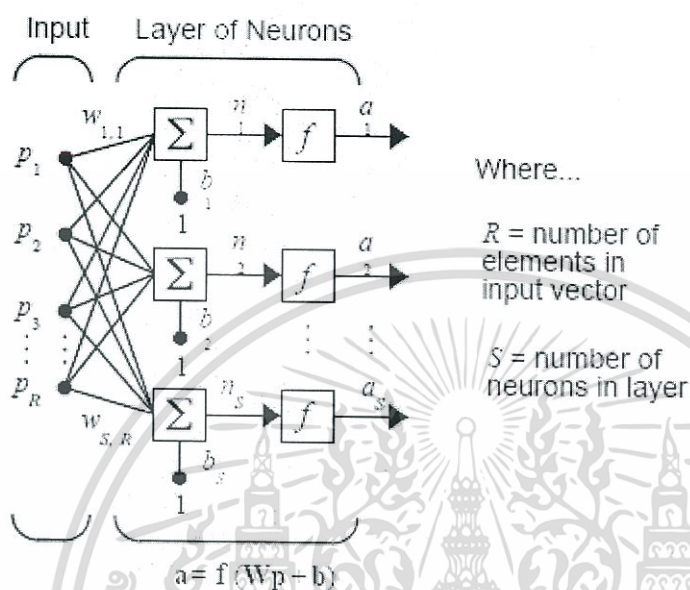


รูปที่ 4.8 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์ [3]

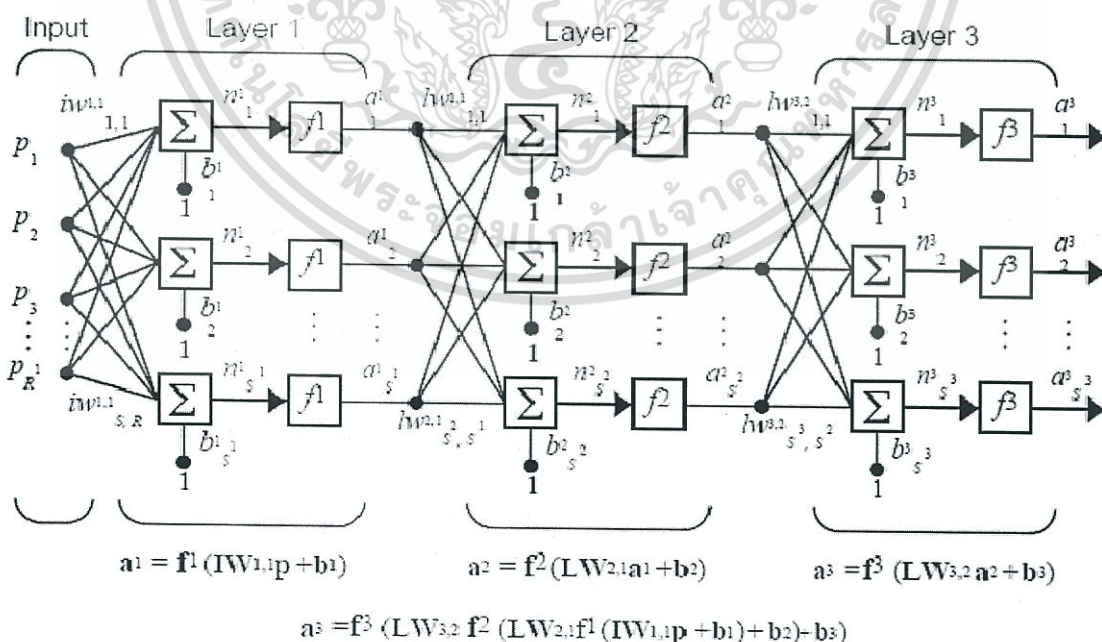
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.3 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อนำนิเวรอนหลายๆ ตัวมาเรียงขนานกันก็ประกอบขึ้นเป็นชั้น (Layer) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และถ้านำแต่ละชั้นมาเรียงอนุกรมกันก็จะกลายเป็น Multi-Layer Feed-Forward Neural Network ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหนึ่งชั้น [9]



รูปที่ 4.10 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.9 จะแสดงนิเวรอนจำนวน s ตัวที่ต่อขนานกันประกอบขึ้นเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 1 ชั้น ส่วนในรูปที่ 4.10 จะแสดงข่ายโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ที่ประกอบด้วยชั้นอินพุท ชั้นซ่อน (Hidden Layer) ที่ 1, 2 และชั้นเอาต์พุท โดยจะสังเกตได้ว่าในแต่ละชั้นจะมีการเชื่อมโยงด้วย weight (w) และ bias (b) a^1, a^2, a^3 คือเอาต์พุท ของชั้นซ่อนที่ 1, ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นเอาต์พุท ตามลำดับ f^1, f^2, f^3 คือฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer functions) ของชั้นซ่อนที่ 1, ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นเอาต์พุท ตามลำดับ

ค่า Error $e(i)$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, S^1$ ที่ชั้นเอาต์พุท คือผลต่างของเอาต์พุท $a^3(i)$ ของโครงข่ายประสาทเทียม และค่าเป้าหมาย (target), $t(i)$ ดังแสดงในสมการที่ 4.6

$$e(i) = t(i) - a^3(i); i = 1, 2, 3, \dots, S^1 \quad (4.6)$$

4.1.1.4 ขั้นตอนการเรียนรู้

ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะต้องเตรียมข้อมูลฝึกสอน (Training Data, Training Pattern) ไว้และต้องอาศัยขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ เพื่อมาปรับพารามิเตอร์ 2 ตัวที่สำคัญในกระบวนการเรียนรู้ได้แก่ค่าถ่วงน้ำหนัก (weight, w) และไบแอส (bias, b) สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นซ่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 มักจะนิยมใช้ กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation Learning) หรืออาจเรียกย่อ ๆ ว่า Back-prop

ในกระบวนการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบที่นิยมใช้คือ Log-Sigmoid และ Tan-Sigmoid โดยเฉพาะข้อมูลฝึกสอนที่มีจำนวนมากและมีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นซ่อน ที่ฝึกสอนแบบแพร่ค่าย้อนกลับ จะนิยมนำไปใช้ในการประมาณค่าฟังก์ชันเช่น Function Approximation, Pattern Association, Pattern Classification

หลักการของการแพร่ค่าย้อนกลับ คือการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ตามสมการ (4.7) และ (4.8) ตามลำดับของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อที่จะทำให้ค่า Sum-Squared Error (SSE) ตามสมการ (4.9) มีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์

$$w_{new} = w_{old} + \Delta w \quad (4.7)$$

$$b_{new} = b_{old} + \Delta b \quad (4.8)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2 \quad (4.9)$$

โดย N คือจำนวนของข้อมูลฝึกสอน

การฝึกสอนด้วยการแพร่ค่าย้อนกลับ อาจจะทำให้เกิด Local Minimum มากกว่า Global Minimum ซึ่งถ้า Local Minimum ที่พบเป็นที่พอใจในการแก้ปัญหา นั้นได้ก็ไม่มีปัญหาอะไร แต่ถ้ายังไม่สามารถแก้ปัญหานั้นเป็นที่น่าพอใจเราก็สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) หรืออาจเพิ่มจำนวนชั้นซ่อนจาก 1 ชั้นเป็น 2 ชั้น ซึ่งแน่นอนว่าการเพิ่มจำนวนนิวรอน หรือจำนวนชั้นซ่อนจะทำให้เวลาในการฝึกสอนเพิ่มขึ้นด้วย ในที่นี้จะแนะนำขั้นตอนการเรียนรู้สำหรับการแพร่ค่าย้อนกลับ 2 วิธีคือ

1) The Generalised Delta Rule หรือ Gradient Descent Algorithm

จะมีตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัว คือ Adaptive Learning Rat (η) และ Momentum Term (m) ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอส จะถูกปรับโดยสมการ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

$$\Delta w_{i,j,t} = (1 - m) \cdot \eta \cdot \frac{\partial SSE}{\partial w_{i,j,t}} + m \cdot \Delta w_{i,j,t-1} \quad (4.10)$$

$$\Delta b_{j,t} = (1 - m) \cdot \eta \cdot \frac{\partial SSE}{\partial b_{j,t}} + m \cdot \Delta b_{j,t-1} \quad (4.11)$$

โดยที่ m มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และมักจะต้องค่าเริ่มต้นไว้ที่ 0.9 ส่วน η จะตั้งค่าเริ่มต้นไว้ที่ค่าต่างๆ เช่น 0.01 และค่าตัวแปรทั้งสองจะถูกปรับระหว่างกระบวนการฝึกสอนดังนี้

ถ้า $SSE_{new} > SSE_{old \cdot er}$ แล้ว

1. ลดค่า η
2. ตั้งค่า $m = 0$

ถ้า $SSE_{new} < SSE_{old \cdot er}$ แล้ว

1. เพิ่มค่า η
2. m ใช้ค่าเดิม

ถ้า $SSE_{old} \leq SSE_{new} \leq SSE_{old \cdot er}$ แล้ว

1. η ใช้ค่าเดิม
2. m ใช้ค่าเดิม

2) Levenberg-Marquardt Algorithm

ระหว่างการฝึกสอนค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอส จะถูกปรับโดยสมการ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

$$\Delta w = [J^T(w)J(w) + \mu I]^{-1} J^T(w).e \quad (4.12)$$

$$\Delta b = [J^T(b)J(b) + \mu I]^{-1} J^T(b).e \quad (4.13)$$

โดย

$J(w)$ คือ Jacobian Matrix ของอนุพันธ์ ของ Error เทียบกับค่าถ่วงน้ำหนัก (w) ซึ่งนิยามตามสมการ 4.14

$J(b)$ คือ Jacobian Matrix ของอนุพันธ์ ของ Error เทียบกับค่าไบแอส (b) ซึ่งนิยามตามสมการ 4.15

e คือ เมตริกซ์ ของ Errors ระหว่างข้อมูลเป้าหมาย (Target Data) และเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม

μ คือ ค่าคงที่ ซึ่งค่าเริ่มต้นจะถูกตั้งไว้ต่ำๆ เช่น 0.001

$$J(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e(1)}{\partial w_3(1,1)} & \frac{\partial e(1)}{\partial w_3(1,2)} & \dots & \frac{\partial e(1)}{\partial w_3(1,S2)} \\ \frac{\partial e(2)}{\partial w_3(2,1)} & \frac{\partial e(2)}{\partial w_3(2,2)} & \dots & \frac{\partial e(2)}{\partial w_3(2,S2)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial e(S3)}{\partial w_3(S3,1)} & \frac{\partial e(S3)}{\partial w_3(S3,2)} & \dots & \frac{\partial e(S3)}{\partial w_3(S3,S2)} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$J(b) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e(1)}{\partial b_3(1)} \\ \frac{\partial e(2)}{\partial b_3(2)} \\ \vdots \\ \frac{\partial e(S3)}{\partial b_3(S3)} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างการฝึกสอน μ จะถูกปรับค่าดังนี้คือ μ จะถูกคูณด้วยค่าคงที่เช่น 10 ถ้า SSE ใหม่มีค่าเพิ่มขึ้นและถูกหารด้วย 10 ถ้า SSE ใหม่มีค่าลดลง

ถ้าการ normalization ของ $J^T(w).e$ หรือ $J^T(b).e$ มีค่าน้อยกว่าค่าต่ำสุดที่กำหนดไว้ หรือ μ มีค่ามากกว่าค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ โปรแกรมที่ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะหยุดการฝึกสอนทันที

ข้อแตกต่างระหว่าง The Gradient Descent Algorithm และ Levenberg – Marquardt Algorithm

สำหรับ Levenberg-Marquardt Algorithm ทุกอินพุทจะถูกป้อนเข้าไปในโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละรอบของการคำนวณ (Epoch หรือ Iteration) ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสจะถูกปรับเปลี่ยนค่าโดยสมการที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ ในแต่ละรอบของการคำนวณ จะใช้เวลาในการคำนวณนานและใช้หน่วยความจำมากกว่า The Generalised Delta Rule Algorithm แต่ Levenberg-Marquardt Algorithm จะมีประสิทธิภาพดีกว่าและใช้จำนวนรอบของการคำนวณในการฝึกสอนน้อยกว่าทำให้ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่า

ส่วน The Generalised Delta Rule Algorithm ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสสำหรับแต่ละ Input Pattern ในทุกๆ epoch จะถูกปรับเปลี่ยนค่าโดยสมการที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

4.2 การเลือกชนิดของอินพุทและเอาต์พุท

ลักษณะอินพุทและเอาต์พุท มีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือแบบต่อเนื่อง (Continuous) และแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงของระดับโพลตเป็นลักษณะแบบต่อเนื่อง ส่วนการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ (Fault) เป็นลักษณะแบบไม่ต่อเนื่อง

4.3 การเลือกรูปแทนของอินพุทและเอาต์พุท

ในกรณีที่ลักษณะของอินพุท และเอาต์พุทเป็นแบบต่อเนื่องเราสามารถแทนค่าได้ด้วยจำนวนจริง (Real Number) ส่วนในกรณีที่ลักษณะของอินพุทและเอาต์พุทเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง เราสามารถแทนค่าได้ด้วย จำนวนเต็ม ตัวเลขแบบฐานสอง (binary) หรือเกรย์โค้ด (Gray code)

4.4 การนอร์มอลไลซ์ของข้อมูลสำหรับสอนโครงข่ายประสาทเทียม

วิธีการดั้งเดิมของการ normalization ของข้อมูลฝึกสอนก็เพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้

- ลดเวลาในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม
- เพิ่ม Accuracy ให้กับเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม

โดยการ Normalize ค่าอินพุต และเอาต์พุตก่อนกระบวนการฝึกสอน (Training) การ normalization ของค่าอินพุต จะขึ้นอยู่กับการทำ Zero Mean ($\mu = 0$) และ Unity Variance ($\sigma = 1$) ดังแสดงในรูป [2] ซึ่งสามารถเขียนได้ด้วยสมการที่ (4.15)

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.15)$$

สำหรับอินพุตหรือเอาต์พุตใดๆ ถ้าแต่ละอินพุตและเอาต์พุตประกอบด้วย “ n ” Patterns (x_1, x_2, \dots, x_n) ใด ๆ แล้วเราสามารถทำการ Normalized โดยสมการที่ (4.16) ถึง (4.19)

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}, \mu_X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4.16)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 - \mu_X \\ X_2 - \mu_X \\ \vdots \\ X_n - \mu_X \end{bmatrix}, \mu_Y = 0 \quad (4.17)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i)^2}{n}} \quad (4.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix} = Y \frac{1}{\sigma_Y} = \begin{bmatrix} \frac{X_1 - \mu_X}{\sigma_Y} \\ \frac{X_2 - \mu_X}{\sigma_Y} \\ \vdots \\ \frac{X_n - \mu_X}{\sigma_Y} \end{bmatrix}, \sigma_Z = 1 \text{ and } \mu_Z = 0 \quad (4.19)$$

และทำการ Scaling หรือ Bounding โดยสมการที่ 4.20 ถึง 4.21 และเอาท์พุทหลังจากทำการ Scaling ตามสมการที่ 4.22

$$mx = \text{ค่าสูงสุดของ } [Z]$$

$$mn = \text{ค่าต่ำสุดของ } [Z]$$

$$aw = \frac{b - a}{mx - mn} \quad (4.20)$$

$$bw = b - (aw \times mx) \quad (4.21)$$

$$\text{เอาท์พุท} = aw \cdot Zi + bw ; i = 1, 2, \dots, n \quad (4.22)$$

โดย a และ b คือช่วงของขอบเขต

ซึ่งเป็นการ Mapping แบบเชิงเส้น (linear) ระหว่าง $[0.1, 0.9]$ สำหรับ “ n ” patterns ของแต่ละข้อมูลอินพุท และ $[-0.9, 0.9]$ สำหรับ “ n ” patterns ของแต่ละข้อมูลเอาท์พุท ในแต่ละนิวรอน ในชั้นซ่อนที่ 1 (Single Hidden Layer) หรือชั้นซ่อนที่ 2 (Two Hidden Layers) จะนิยมใช้

- ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ log-sigmoid
- ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ tan-sigmoid

สำหรับเอาท์พุทแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่เอาท์พุท (output layer) ควรจะใช้

- ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ tan-sigmoid

การ scaling หรือ bounding ของข้อมูลฝึกสอน

- ไม่มีความจำเป็นแต่ควรจะทำเมื่อนิวรอนที่ชั้นซ่อนที่เอาท์พุทมีฟังก์ชันถ่ายโอนภายใน rang ที่มีลักษณะ bounded

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถ้าโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า ไม่มีขีดจำกัดอินพุทที่แน่นอน การ scaling ตัวแปรของอินพุทไม่มีความจำเป็น
- มีความสำคัญเมื่อข้อมูลถูกเรียนรู้โดยใช้เอาต์พุทของนิวรอน สามารถทำให้กระบวนการเรียนรู้ง่ายขึ้น ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนัก (Weights) ทั้งหมดยังคงมีค่าน้อยๆ
- เพื่อการปรับปรุง interpretability ของค่าถ่วงน้ำหนักในโครงข่าย

เพื่อที่จะได้ชุดของ “bias” และ “weight” ที่ดีที่สุด ค่า SSE ที่ถูกเลือก ของเอาต์พุทสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม และเป้าหมายของเอาต์พุท ระหว่างการฝึกสอน (Training) และทดสอบ (Testing) จะถูกใช้ในการเลือกค่า “weight” และ “bias” สุดท้าย

เมตริกซ์ $[O]$ คือแต่ละเอาต์พุท ที่ถูก normalized และ bounded ระหว่างการ training

เมตริกซ์ $[Q]$ คือ “ m ” patterns ที่ถูก interpolated ของแต่ละ NNs output ที่จะถูกเปรียบเทียบกับแต่ละ target output ดังแสดงในสมการที่ 4.23 ถึง 4.24

$$[L] = \begin{bmatrix} \frac{O_1 - bw}{aw} \\ \frac{O_2 - bw}{aw} \\ \vdots \\ \frac{O_n - bw}{aw} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} L_1 \cdot \sigma_Y + \mu_X \\ L_2 \cdot \sigma_Y + \mu_X \\ \vdots \\ L_n \cdot \sigma_Y + \mu_X \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

สำหรับการทดสอบข้อมูลอินพุทชุดใหม่นั้น เมื่อมีข้อมูลใหม่ถูก tested หรือ recalled แล้ว “ m ” patterns ของแต่ละอินพุทใหม่จำเป็นต้องถูก normalized ด้วยการทำให้ zero mean และ unity variance และ bounded ในช่วง $[0.1, 0.9]$

เมตริกซ์ $[T]$ แทนด้วยแต่ละ normalized และ unity variance และ bounded ของ test output ดังนั้นแต่ละค่าของ test output สำหรับ NNs จะถูก interpolated โดย เมตริกซ์

$[R]$ และเมตริกซ์ $[H]$ “ m ” patterns ของแต่ละ test output สำหรับ NNs ที่จะถูกเปรียบเทียบกับแต่ละ target test output จะสามารถแสดงในสมการที่ 4.25 ถึง 4.26

$$[R] = \begin{bmatrix} \frac{T_1 - bw}{aw} \\ \frac{T_2 - bw}{aw} \\ \vdots \\ \frac{T_m - bw}{aw} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$[H] = \begin{bmatrix} R_1 \cdot \sigma_Y + \mu_X \\ R_2 \cdot \sigma_Y + \mu_X \\ \vdots \\ R_m \cdot \sigma_Y + \mu_X \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

4.5 การเลือกขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

Guideline อื่นหนึ่งสำหรับการเลือกจำนวนของนิวรอนในชั้นซ่อน ในหลายๆ ปัญหา คือ กฎของ “geometric pyramid” [2] [10]

โดยที่จำนวนของนิวรอนเป็นลักษณะคล้ายรูปปิรามิด ซึ่งมีจำนวนลดลงจากอินพุตไปยังเอาต์พุต สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า (feed-forward) ที่ประกอบด้วย 1 ชั้นซ่อน จำนวนของนิวรอนในชั้นซ่อนจะคำนวณได้จากสมการที่ 4.27 [2] [10]

$$\text{จำนวนของนิวรอนในชั้นซ่อน} = \sqrt{c \cdot d} \quad (4.27)$$

c = จำนวนของตัวแปรอินพุต

d = จำนวนของตัวแปรเอาต์พุต

สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า ที่ประกอบด้วย 2 ชั้นซ่อน จำนวนของนิวรอนในชั้นซ่อนในแต่ละชั้นซ่อน จะคำนวณได้จากสมการที่ 4.28 ถึง 4.29 [2] [10]

$$\text{จำนวนของนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1} = d \cdot r^2 \quad (4.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่ควรนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ การนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ดำเนินการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r = \sqrt[3]{\frac{c}{d}}$$

c = จำนวนของตัวแปรอินพุท

d = จำนวนของตัวแปรเอาต์พุท

นอกจากนี้ขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม จะสามารถหาได้โดยวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยจะเริ่มจากจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนน้อยๆ และถูกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าสูงสุดที่ตั้งไว้ ซึ่งในแต่ละชั้นตอนจะถูกตรวจสอบโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละกลุ่มของ ข้อมูลฝึกสอนโดยกำหนดให้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนแรกมากกว่าชั้นซ่อนที่สองอยู่หนึ่งหรือสามนิวรอน

สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยกำหนดให้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนแรกมากกว่าจำนวนนิวรอนในชั้นที่สองอยู่หนึ่งนิวรอน

ส่วนเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม นั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนของนิวรอน ซึ่งอยู่ในชั้นซ่อน และมีความสัมพันธ์กันในลักษณะกราฟ Exponential [2] [10]

4.6 วิธีการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

ลักษณะทั่วไปที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม ด้วยวิธีการฝึกสอนที่ใช้มีความสำคัญที่ต้องแน่ใจว่าโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม มีขนาดไม่ใหญ่จนเกินความจำเป็นซึ่งขึ้นอยู่กับความไม่เป็นเชิงเส้นของการประยุกต์ใช้ที่ถูกพิจารณา

ในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมนั้นอาจจะใช้ข้อมูลที่แตกต่างกัน 3 ชุด ได้แก่ ข้อมูลสำหรับฝึกสอน (training) ข้อมูลสำหรับตรวจสอบความก้าวหน้าในการเรียนรู้ (validation) และข้อมูลสำหรับทดสอบ (test) ซึ่งจะเป็นข้อมูลชุดใหม่ที่โครงข่ายประสาทเทียมไม่เคยเห็นมาก่อน (unseen data) ซึ่งหลังจากการเรียนรู้สิ้นสุดลงโครงข่ายประสาทเทียม จะประมาณค่าเอาต์พุทของข้อมูลชุดทดสอบ

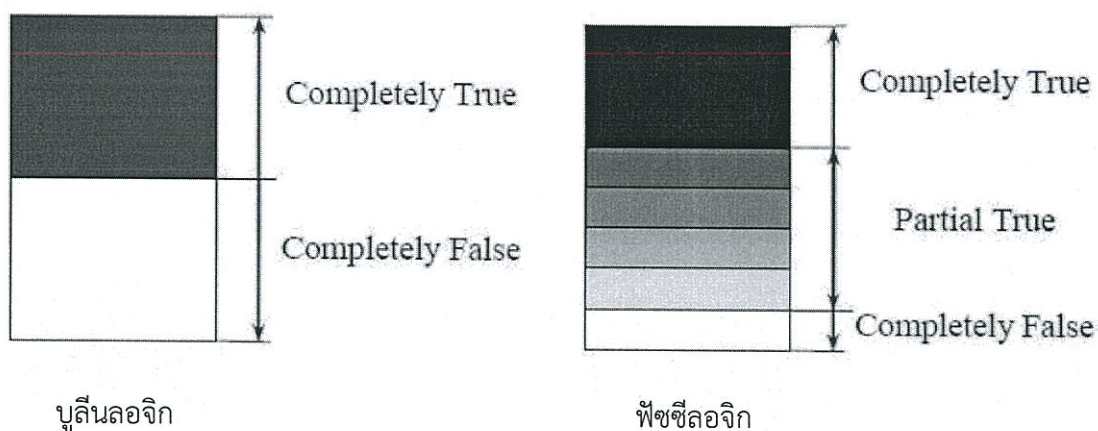
สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อความสะดวกและง่ายในการนำไปใช้งานเฉพาะข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทดสอบจะนำมาใช้กับโครงข่ายประสาทเทียม โดยจำนวนที่เหมาะสมสำหรับนิวรอนในชั้นซ่อนจะอยู่แถวใกล้กับค่า Global Minimum ของ Testing Error

ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems)

เทคโนโลยีเชิงอัจฉริยะทั้งหลายจะมีคุณสมบัติในการคำนวณ ซึ่งทำให้แก้ปัญหาเฉพาะบางอย่างไม่ใช่แก้ได้ทั้งหมด เช่น โครงข่ายประสาทเทียมมีคุณสมบัติในการเรียน ไม่สามารถใช้สำหรับการอธิบายถึงการได้มาซึ่งสิ่งที่ตัดสินใจ ในขณะที่ระบบฟัซซีสามารถให้เหตุผลด้วยข้อมูลที่คลุมเครือและมีคุณสมบัติของการทำงานด้านการอธิบายการตัดสินใจด้วยกฎฟัซซี แต่ระบบฟัซซีเองก็ไม่มีความสามารถในการเรียนรู้กฎโดยอัตโนมัติจากข้อมูล ข้อจำกัดต่างๆ เหล่านี้จึงทำให้มีนักวิจัยให้ความสนใจคิดค้นวิธีการผสมระบบหลายระบบเข้าด้วยกัน กลายเป็นระบบประสานแบบอัจฉริยะ (hybrid intelligent system: HIS) ขึ้นมาเป็นจำนวนมาก เช่น ระบบฟัซซีผสมเข้ากับโครงข่ายประสาทเทียม จึงได้ชื่อใหม่เป็นระบบฟัซซีนิวรัลเน็ตเวิร์ค (fuzzy neural network) ทั้งนี้ก็เพื่อจะแก้ปัญหาจากข้อด้อยทั้งของแต่ละวิธี ระบบผสมนิวรัลฟัซซีที่มีชื่อเสียงเป็นที่รู้จักกันมาก ได้แก่ ANFIS หรือ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems เป็นระบบอนุมานฟัซซีบนฐานโครงข่ายปรับตัวได้ด้วยวิธีการเรียนรู้แบบไฮบริด

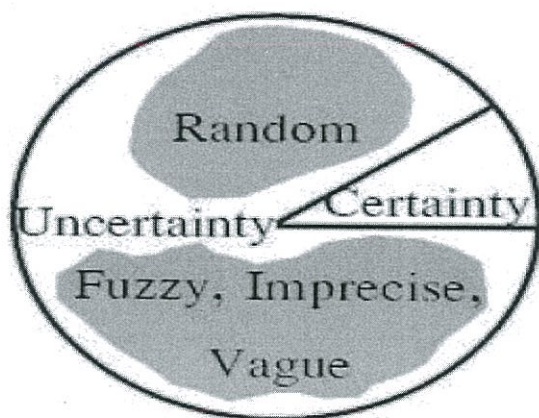
5.1 พื้นฐานแนวคิดแบบฟัซซี [3]

เหตุผลแบบฟัซซี (Fuzzy Logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายในได้ความไม่แน่นอนของข้อมูล โดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิธีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ฟัซซีลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่าเหตุผลแบบจริงเท็จ (Boolean Logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial True) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (Completely True) กับเท็จ (completely false) ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 เหตุผลแบบจริงเท็จ (บูลีนลอจิก) กับเหตุผลแบบฟัซซี (ฟัซซีลอจิก)

ความเป็นฟัซซี (Fuzziness) มีชื่อเรียกว่า มัลติวาลานซ์ (Multivalence) ซึ่งมีค่าที่ความเป็นสมาชิกมากกว่า 2 ค่า และแตกต่างกับไบวาลานซ์ (Bivalence) ที่มีความเป็นสมาชิกเพียง 2 ค่า ฟัซซีเซต (Fuzzy Set) เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่สื่อถึง “ความไม่แน่นอน (Uncertainty)” สามารถที่จะสร้างและกำหนดรูปแบบ (Modeling) ของลักษณะความไม่แน่นอนที่เป็นความคลุมเครือ ความไม่ตายตัว รวมถึงความขาดข้อมูลบางส่วน โดยทฤษฎีของฟัซซีเซตจะใช้ลักษณะความหมายของตัวแปร (Linguistic) มากกว่าปริมาณ (Quantitative) ของตัวแปร เช่น การหาความหมายของ “คนที่อ้วน” เราไม่สามารถนิยามค่าความอ้วนที่ตรงกันและระบุเป็นหนึ่งเดียว (Identical) สำหรับคนที่อ้วน นาย ก. จะให้ความหมายของ “คนอ้วน” ซึ่งทั้งสองคนต่างแสดงความหมายของคำว่าคนที่อ้วนโดยเปรียบเทียบและในมุมมองของตัวเองตามน้ำหนักของตน ในการทำงานในมุมมองแบบฐานสอง (Binary Sense) จะได้ผลเป็น ใช่ หรือ ไม่ใช่ เพียง 2 กรณี ซึ่งหากกำหนดว่า คนที่อ้วนคือคนที่มีน้ำหนักมากกว่า 75 กิโลกรัม คอมพิวเตอร์จะให้ผลว่าคนที่น้ำหนัก 74.50 กิโลกรัม ไม่จัดเป็นคนที่อ้วน แต่จะเห็นว่าบุคคลนี้เป็นคนอ้วนน้ำหนักเกือบจะ 75 กิโลกรัม และถึงแม้ว่าบุคคลนี้จะมีน้ำหนัก 75 กิโลกรัม แต่หากพิจารณาจากกลุ่มคนที่น้ำหนักเฉลี่ย 90 กิโลกรัม บุคคลนี้ก็จะไม่จัดอยู่ในกลุ่มคนที่อ้วน แสดงให้เห็นว่า ความอ้วนไม่ได้มีลักษณะความไม่แน่นอนแบบสุ่ม จากการศึกษาปัญหาทั่ว ๆ ไปจะแสดงถึงรูปแบบลักษณะการกระจายของปัญหา รูปที่ 5.2 เป็นการแสดงให้เห็นว่าแนวทางในการตัดสินใจของปัญหาทั้งหมดมีเพียงส่วนน้อยที่เป็นสิ่งแน่นอน (certainty) ที่เหลือคือสิ่งที่ไม่แน่นอน ซึ่งประกอบด้วยความไม่แน่นอนที่มีลักษณะแบบสุ่ม และความไม่แน่นอนที่มีลักษณะเป็นฟัซซี หรือคลุมเครือ ซึ่งมีมากกว่าร้อยละ 40 เพราะปัญหาส่วนมากเกี่ยวข้องกับการตัดสินใจของมนุษย์ซึ่งจะตัดสินใจตามพื้นฐานความคิดของตนเป็นหลัก



รูปที่ 5.2 ความไม่แน่นอน (uncertainty)

พีชชีจะสร้างวิธีทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความคลุมเครือ ความไม่แน่นอนของระบบที่เกี่ยวข้องกับความคิดความรู้สึกของมนุษย์ เมื่อพิจารณาส่วนประกอบต่าง ๆ ในความไม่แน่นอนเพื่อกำหนดเงื่อนไขในการตัดสินใจ (Decision Making) โดยอาศัยเซตของความไม่แน่นอนเป็นสมาชิก

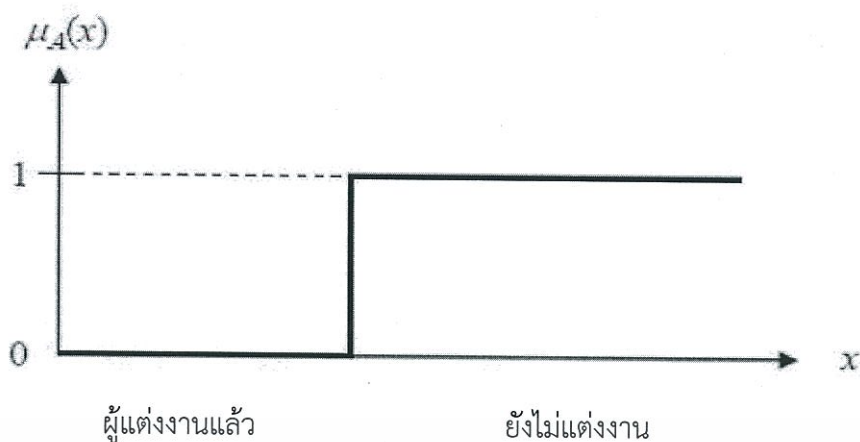
5.2 เซตแบบฉบับ (Classical Set)

เซตแบบฉบับเป็นเซตที่มีความเป็นสมาชิกเป็น 0 หรือ 1 $\{0,1\}$ เท่านั้น เซตในทฤษฎีเซตแบบฉบับจะมีขอบเขตแบบแข็ง (Sharp Boundary) ซึ่งเป็นขอบเขตที่ตัดขาดจากกันแบบทันทีทันใด เซตแบบฉบับมีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกตามแนวคิดเลขฐานสอง โดยที่ตัวแปรหนึ่ง ๆ จะมีค่าความเป็นสมาชิกเพียงสองค่า คือ 0 ไม่เป็นสมาชิก และ 1 เป็นสมาชิก ตัวอย่างเช่น เซตของคู่แต่งงานจะสามารถบอกได้อย่างแน่ชัดว่าเป็นกลุ่มผู้แต่งงานหรือไม่แต่งงาน



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างเซตแบบฉบับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในเซตผู้ที่ไม่แต่งงาน

จากรูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างของเซตอย่างย่อสองเซต คือเซตของผู้ที่แต่งงานและเซตของผู้ที่ไม่แต่งงาน จะเห็นได้ว่าคนหนึ่งคนจะเป็นสมาชิกภาพได้เพียงเซตเดียวเท่านั้น แต่งานหรือไม่แต่งงาน ในรูปแบบที่ 5.4 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตผู้ที่ไม่แต่งงาน จากรูปจะเห็นได้ว่า ผู้ที่แต่งงานแล้วจะมีค่าความเป็นสมาชิกในเซตของผู้ที่ไม่แต่งงานเป็น 0 ส่วนผู้ที่ไม่แต่งงานมีค่าความเป็นสมาชิกภาพของเซตผู้ที่ไม่แต่งงานเป็น 1 ค่าความเป็นสมาชิกของทั้งสองเซตจะตัดขาดจากกันอย่างทันทีทันใด รูปแบบคณิตศาสตร์ของเซตแบบฉบับมีสมการตาม 5.1 ดังนี้

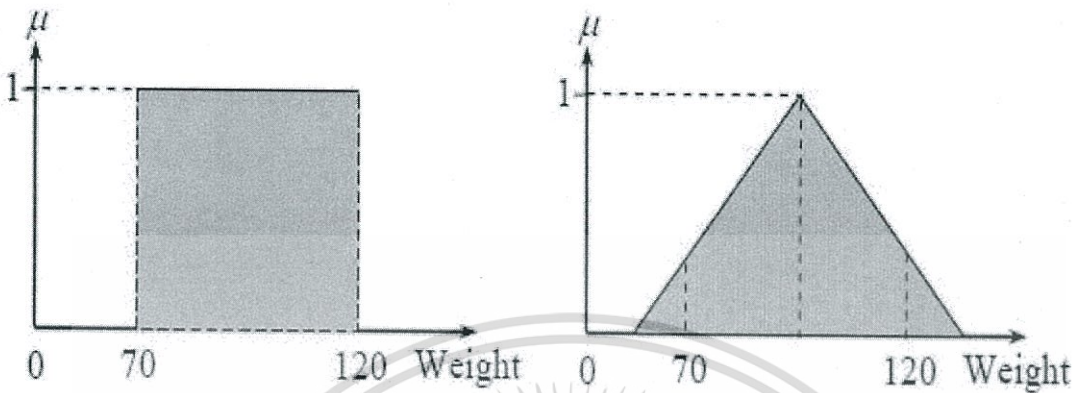
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (5.1)$$

เมื่อ A เป็นเซตแบบฉบับ x เป็นสมาชิกในเซต μ_A เป็นค่าความเป็นสมาชิกในเซตและ $\mu_A(x)$ เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในเซต A

5.3 ฟัชซีเซต (Fuzzy Set)

ฟัชซีเซตเป็นเซตที่มีขอบเขตที่ราบเรียบ ทฤษฎีฟัชซีเซตจะครอบคลุมทฤษฎีเซตแบบฉบับ โดยฟัชซีเซตยอมให้มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตระหว่าง 0 และ 1 ในโลกแห่งความเป็นจริงเซตไม่ใช่มีเฉพาะเซตแบบฉบับเท่านั้น จะมีเซตแบบฟัชซีด้วย ฟัชซีเซตจะมีขอบเขตแบบฟัชซีไม่ใช่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากขาวเป็นดำ ตัวอย่างเช่น เซตของคู่แต่งงานที่มีความสุข จะเห็นได้ว่าสมาชิกในเซตนี้จะไม่เฉพาะคู่แต่งงานที่มีความสุขระดับเดียวกันหมด บางคู่จะมีความสุขมาก บางคู่จะมีความสุขน้อยแตกต่างกันไป การใช้เซตแบบดั้งเดิมจึงไม่เหมาะสม

ยกตัวอย่างเกี่ยวกับความอ้วน นิยามคำว่าคนอ้วนในเซตแบบฉบับอาจกำหนดเป็นคนที่น้ำหนักตั้งแต่ 70 ถึง 120 กิโลกรัม โดยนิยามแบบฟัซซีเซตอาจกำหนดเป็นคนที่มีความอ้วนประมาณ 80 กิโลกรัม ซึ่งเป็นการให้นิยามที่ไม่แสดงถึงขอบเขตที่แน่นอนดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การความเป็นสมาชิกของเซตแบบฉบับและเซตแบบฟัซซี

นิยามของฟัซซีเซต กำหนดให้ X เป็นเซตที่ไม่ว่าง ฟัซซีเซต A สามารถแสดงลักษณะเฉพาะได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกตามสมการ 5.2

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

เมื่อ $\mu_A(x)$ สามารถตีความเป็นค่าของความเป็นสมาชิกภาพของตัวประกอบ x ในฟัซซีเซต A สำหรับแต่ละ $x \in X$ (อ่านว่า “ x เป็นสมาชิกของ X ”) ฟัซซีเซต A สามารถเขียนเป็นเซตของคู่อันดับ (Tuples) ตามสมการ 5.3

$$A = \{[x, \mu_A(x)] | x \in X\} \quad (5.3)$$

เมื่อ A คือฟัซซีเซต A

x คือสมาชิกของเซต (Set Membership)

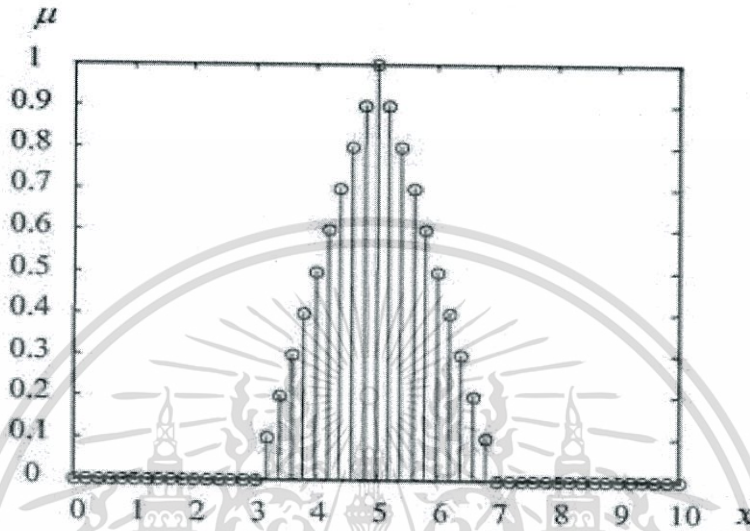
$\mu_A(x)$ คือฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function)

X คือเอกภพสัมพัทธ์ (Universe) หรือประชากร

ถ้า $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ เป็นเซตจำกัด และเซต A เป็นฟัซซีเซตใน X ซึ่งเป็นชนิดวิฤตหรือ *discrete* และจำกัดสัญลักษณ์ (*notation*) ของฟัซซีเซต A เขียนได้เป็นสมการ 5.4

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x)}{x_1} + \frac{\mu_A(x)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} \right\} = \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x)}{x_i} \right\} \quad (5.4)$$

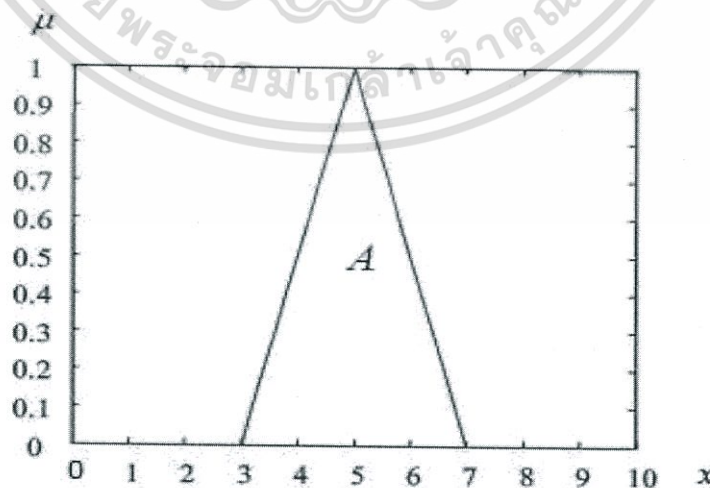
เมื่อพจน์ $\mu_A(x_i) / x_i, i = 1, 2, \dots, n$ หมายถึงค่าความเป็นสมาชิก $\mu_A(x_i)$ ของ x_i ในเซต A และเครื่องหมายบวก “+” หมายถึงยูเนียน (union)



รูปที่ 5.6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซีแบบวิยุต A

ถ้าเอกภพสัมพัทธ์ X เป็นต่อเนื่อง (Continuous) ของฟัซซีเซต A เขียนได้เป็นสมการที่ 5.5

$$A = \left\{ \int \frac{\mu_A(x)}{x} \right\} \quad (5.5)$$



รูปที่ 5.7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซีแบบต่อเนื่อง A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีฟัซซีเซตสามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดของเซตแบบดั้งเดิมได้ โดยฟัซซีเซตยอมให้มีค่าหรือ ดีกรีความเป็นสมาชิก (Degree of Membership) ซึ่งแสดงด้วยค่าตัวเลขระหว่าง 0 และ 1 หรือ เขียนเป็นสัญลักษณ์ $[0,1]$ โดย 0 หมายถึง ไม่เป็นสมาชิกในเซต 1 หมายถึง เป็นสมาชิกในเซต และค่า ระหว่าง 0 กับ 1 เป็นสมาชิกบางส่วนในเซต การทำเช่นนี้ทำให้เกิดความราบเรียบในการเปลี่ยนจาก พื้นที่นอกเซตไปอยู่ในเซตไปอยู่ในเซตของสมาชิกต่าง ๆ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) วัตถุในโดเมนใด ๆ ให้เป็นค่าความเป็นสมาชิกในฟัซซีเซต

ความเป็นสมาชิกสำหรับฟัซซีเซต มีจำนวนระดับความเป็นสมาชิกเป็นอนันต์ คือค่าต่อเนื่อง ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งครอบคลุมการกำหนดสมาชิกแบบฉบับ และเซตแบบฉบับจะกำหนดตามต้ง สมการที่ (5.6)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (5.6)$$

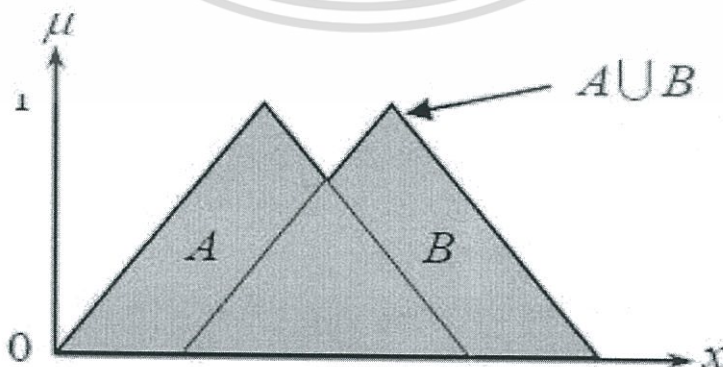
เมื่อ x หมายถึงสมาชิกในเซต (Set member) $\mu_A(x)$ หมายถึงฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) และ A หมายถึงฟัซซีเซต A

5.4 การดำเนินการทางฟัซซีเซต

การดำเนินการของฟัซซีเซต มีการดำเนินการ คือ ยูเนียน (Union), อินเตอร์เซกชัน (Intersection) และ คอมพลีเมนต์ (Complement)

5.4.1 ยูเนียน (Union) ของฟัซซีเซต จะเป็น OR Operation ในสมการที่ 5.7 และรูปที่ 5.8

$$\begin{aligned} \mu_{A \cup B}(x) &= \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \\ &= \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \end{aligned} \quad (5.7)$$

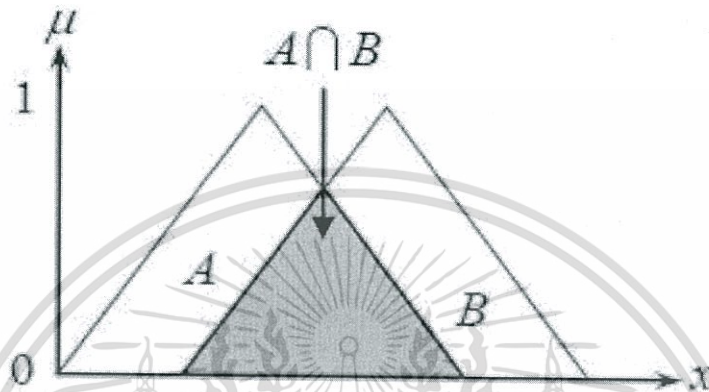


รูปที่ 5.8 ยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 อินเตอร์เซกชัน (Intersection) ของฟัซซีเซต จะเป็น AND Operation ในสมการที่ 5.8 และรูปที่ 5.9

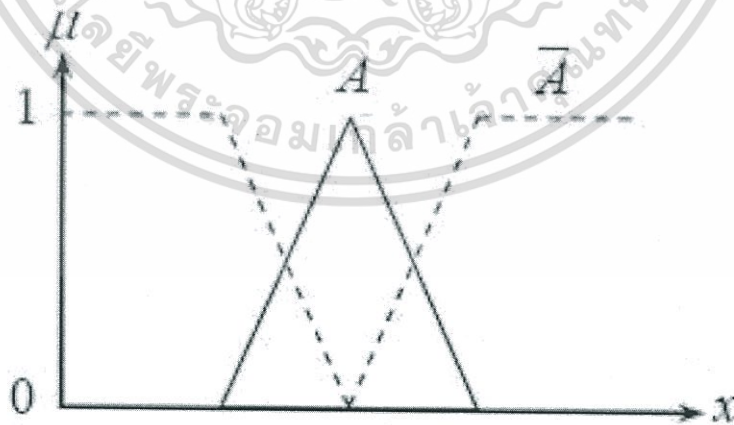
$$\begin{aligned}\mu_{A \cap B}(x) &= \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \\ &= \min(\mu_A(x), \mu_B(x))\end{aligned}\quad (5.8)$$



รูปที่ 5.9 Intersection ของฟัซซีเซต A และ B

5.4.3 คอมพลิเมนต์ (Complement) ของฟัซซีเซต ในสมการที่ 5.9 และรูปที่ 5.10

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (5.9)$$



รูปที่ 5.10 คอมพลิเมนต์ของฟัซซีเซต A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของเซตฟัซซี

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

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

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

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

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

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

Idempency $A \cup A = A$ และ $A \cap A = A$

Identity $A \cup 0 = A$ และ $A \cap X = A$

$$A \cap 0 = 0$$

$$A \cup X = X$$

Tansitivity ถ้า $A \subseteq B, B \subseteq C$ แล้ว $A \subseteq C$

Involution $A \subseteq A$

5.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี เพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรกันหรือสมมาตรกันทุกประการก็ได้

5.5.1 ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function)

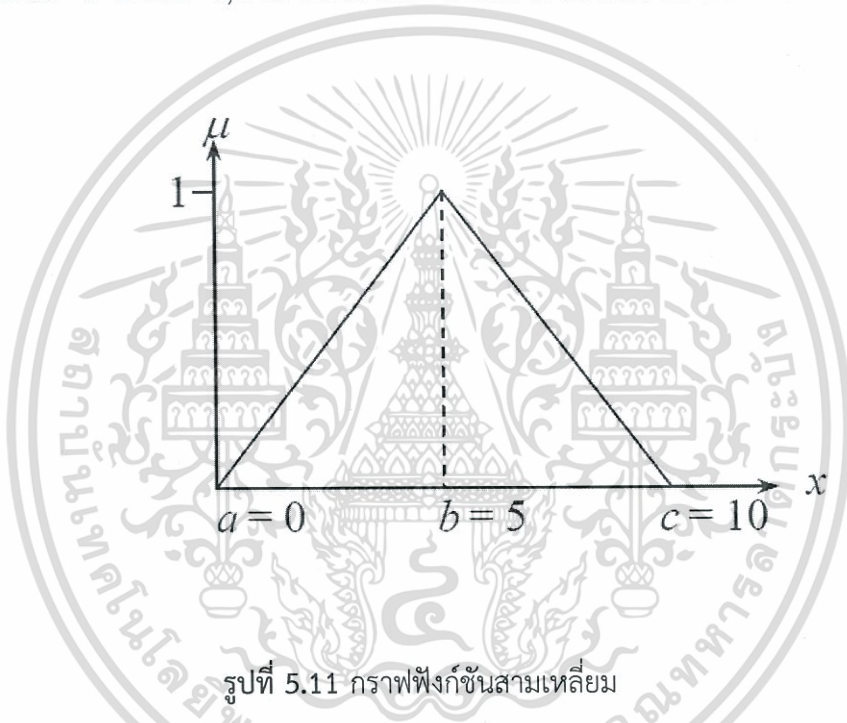
ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีหลายชนิด แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 5 ชนิด ดังนี้

1) ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (triangular membership function)

ฟังก์ชันสามเหลี่ยมมีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ $\{a, b, c\}$ ตามสมการที่ 5.10

$$\text{triangular}(x : a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a) / (b - a) & a \leq x \leq b \\ (c - x) / (c - b) & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (5.10)$$

ตัวอย่างกำหนดให้ a เท่ากับ 0, b เท่ากับ 5 และ c เท่ากับ 10 แสดงกราฟฟังก์ชันสามเหลี่ยมดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กราฟฟังก์ชันสามเหลี่ยม

2) ฟังก์ชันสามเหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function)

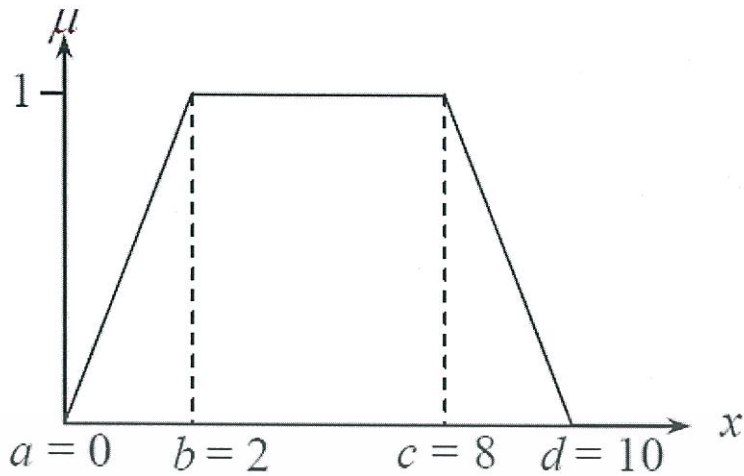
ฟังก์ชันสามเหลี่ยมคางหมูมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ $\{a, b, c, d\}$ ตามสมการที่ 5.11

$$\text{trapezoidal}(x : a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a) / (b - a) & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ (d - x) / (d - c) & c \leq x < d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (5.11)$$

ตัวอย่างกำหนดให้ $a=0$, $b=2$, $c=8$ และ $d=10$ กราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.12

$$a=0 \quad b=2 \quad c=8 \quad d=10$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 กราฟฟังก์ชันสามเหลี่ยมคางหมู

3) ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian membership function)

ฟังก์ชันเกาส์เซียนมีทั้งหมด 2 พารามิเตอร์ $\{m, \sigma\}$ ซึ่ง m หมายถึงค่าเฉลี่ย และ σ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตามสมการที่ 5.12

$$\text{gaussian}(x : m, \sigma) = \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.12)$$

ตัวอย่างเมื่อกำหนดให้ $m = 5$ และ $\sigma = 1$ ฟังก์ชันเกาส์เซียนแสดงดังรูปที่ 5.13



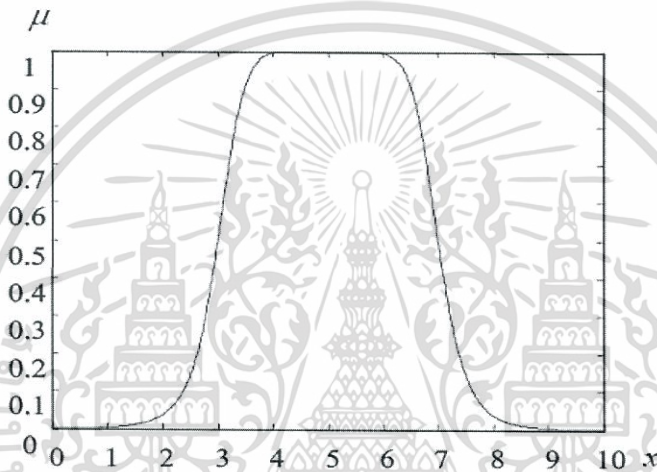
รูปที่ 5.13 กราฟฟังก์ชันเกาส์เซียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-shaped membership function)
ฟังก์ชันรูประฆังคว่ำมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ค่า คือ $\{a, b, c\}$

$$\text{bell-shaped}(x : a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} \quad (5.13)$$

ตัวอย่างเมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ $a=2$, $b=4$ และ $c=5$ จะได้กราฟดังรูปที่ 5.14



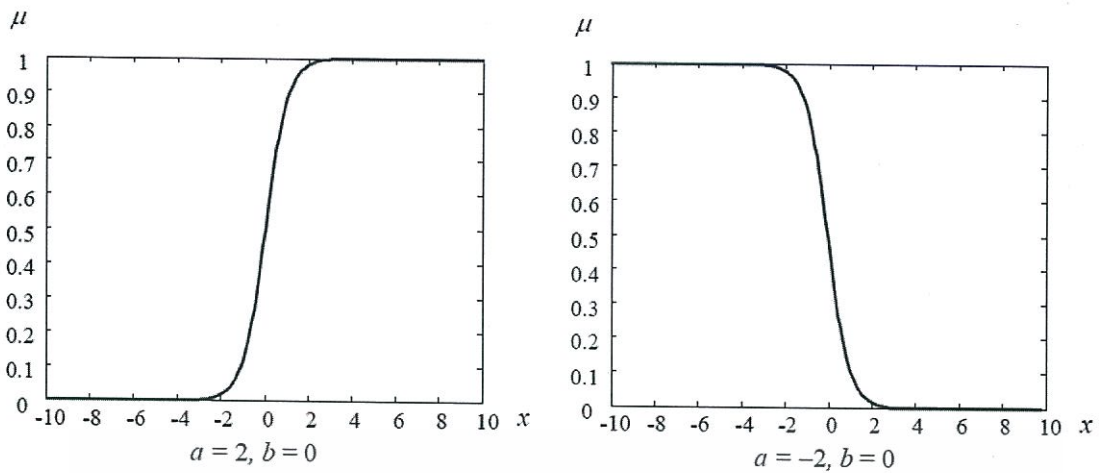
รูปที่ 5.14 กราฟฟังก์ชันระฆังคว่ำ

- 5) ฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoidal membership function)
ฟังก์ชันซิกมอยด์มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่า คือ $\{a, b\}$

$$\text{sigmoid}(x : a, b) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x - b))} \quad (5.14)$$

โดย a เป็นพารามิเตอร์ควบคุมความชัน ถ้าเลือกค่า a ที่มีขนาดน้อยทำให้ความชันต่ำ และถ้า a ขนาดสูงจะให้ความชันสูงตาม ส่วน b เป็นค่ากลางที่ค่าความเป็นสมาชิกที่ 0.5

ตัวอย่างกราฟแสดงความเป็นสมาชิกเมื่อกำหนดพารามิเตอร์ $a = 2$ และ $b = 0$ จะได้กราฟดังภาพที่ 5.15 ก) และเมื่อกำหนดพารามิเตอร์ $a = 2$ และ $b = 0$ จะได้กราฟดังรูปที่ 5.15 ข)



รูปที่ 5.15 กราฟฟังก์ชันซิกมอยด์

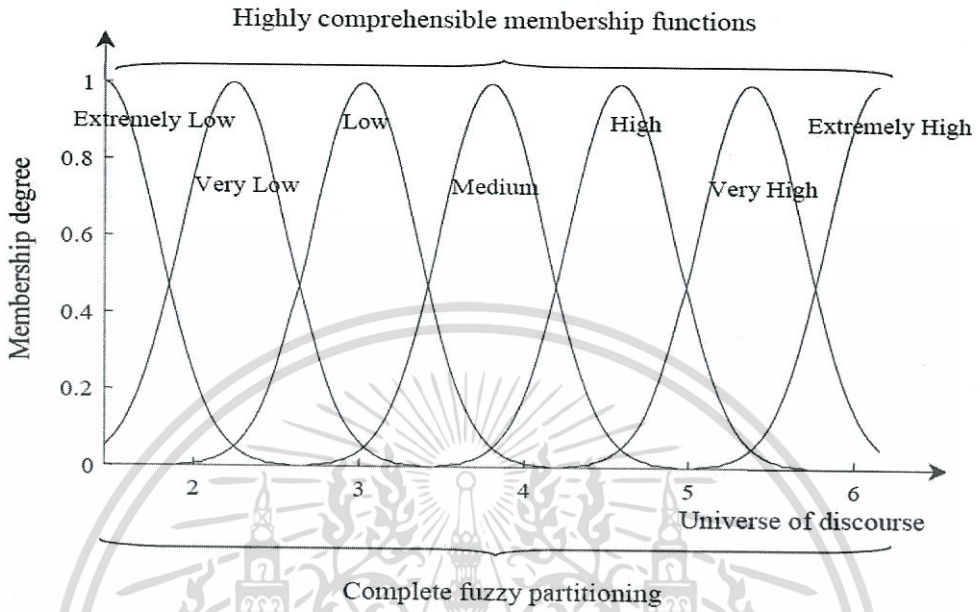
การเลือกฟังก์ชันของความเป็นสมาชิก จะต้องเลือกตามความเหมาะสมครอบคลุมของข้อมูลที่จะรับเข้ามา โดยสามารถที่ทับซ้อนกันเพื่อให้การดำเนินงานราบเรียบ ซึ่งมีความเป็นสมาชิกหลายค่าได้และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเปลี่ยนแปลงแก้ไขให้เหมาะกับงานที่กำลังปฏิบัติงานหรือตามความต้องการ

5.6 ตัวแปรเชิงภาษา (Linguistic Variable)

เซตแบบฟัซซีสามารถประยุกต์ใช้ในการอธิบายค่าของตัวแปรเช่นเดียวกับเซตมี แบบดั้งเดิม เช่นประโยค “อุณหภูมิในห้องเย็น” คำว่า “เย็น” เป็นคำที่ใช้แสดงปริมาณอุณหภูมิ ในทางรูปนัยสามารถเขียนได้เป็น ปริมาณอุณหภูมิในห้องเย็น หรือ Temperature Quantity is Cold ตัวแปร Temperature Quantity เป็นตัวแปรเชิงภาษา ซึ่งเป็นแนวคิดที่สำคัญมากในตรรกะแบบฟัซซี ตัวแปรเชิงภาษาช่วยกำหนดค่าของสิ่งที่จะอธิบายทั้งในรูปคุณภาพโดยใช้พจน์ภาษา (Linguistic Term) และในรูปปริมาณ โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ซึ่งแสดงความของเซตแบบฟัซซี พจน์ภาษาใช้สำหรับการแสดงแนวคิดและองค์ความรู้ในการสื่อสารของมนุษย์ ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีประโยชน์ในการจัดการกับอินพุตที่เป็นข้อมูลเชิงตัวเลขตัวแปรเชิงภาษาเป็นการประกอบกัน (composition) ของตัวแปรสัญลักษณ์ (Symbolic Variable) และตัวแปรเชิงเลข (Numerical Variable) ตัวอย่างแปรสัญลักษณ์ เช่น “รูปร่าง เป็นทรงกระบอก” (Shape = Cylinder) คำว่า “รูปร่าง” เป็นตัวแปรที่บอกถึงรูปร่างของวัตถุ ตัวอย่างตัวแปรเชิงเลข เช่น “ความสูงเท่ากับ 4 ฟุต” (Height = 4') ตัวแปรเชิงเลขจะมีใช้กันในสาขางานด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ คณิตศาสตร์ การแพทย์ และอื่น ๆ ส่วนตัวแปรสัญลักษณ์มีความสำคัญในวิทยาการเกี่ยวกับปัญญาประดิษฐ์และการตัดสินใจ การใช้ตัวแปรเชิงภาษาเป็นการรวมตัวแปรเชิงเลขกับตัวแปรสัญลักษณ์เข้าด้วยกัน รูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

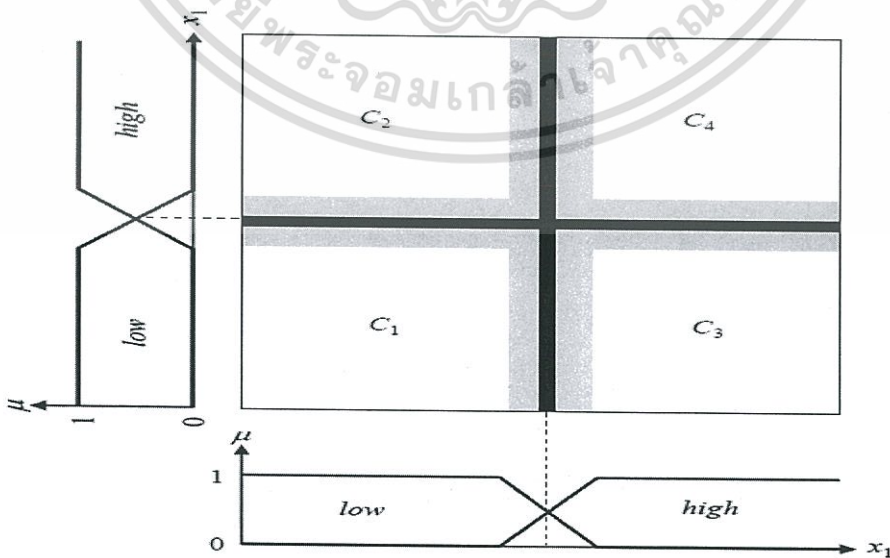
5.16 แสดงตัวอย่างเซตตัวแปรภาษาของเซตฟัซซี ได้แก่ Extremely Low, Very Low, Low, Medium, High, Very High และ Extremely High



รูปที่ 5.16 ตัวอย่างตัวแปรเชิงภาษา

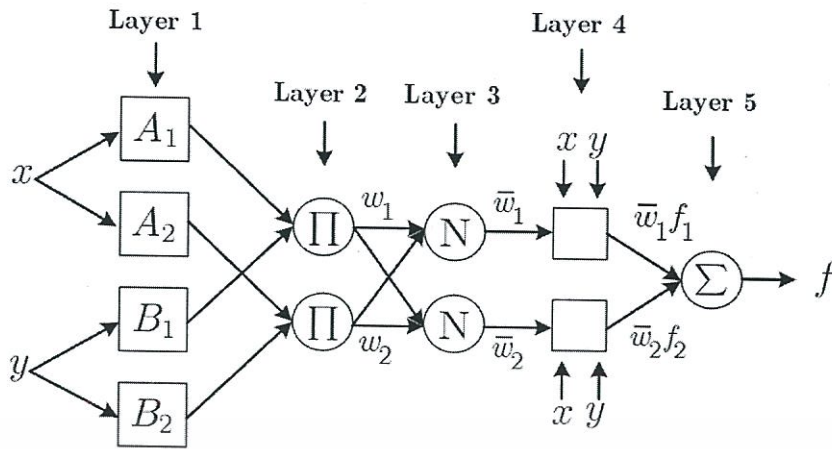
5.7 กฎของฟัซซี (Fuzzy Rules)

วิทยาการเกี่ยวกับฟัซซีลอจิกมีจำนวนมาก แต่ที่นิยมและการประยุกต์ใช้งานมากที่สุดน่าจะเป็นกฎฟัซซีแบบ if-then ตัวอย่างการใช้กฎในการแยกกลุ่มดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ตัวอย่างปริภูมิรูปแบบการจัดกลุ่มด้วยกฎฟัซซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 โครงสร้างของ ANFIS

ชั้นที่ 1 ทุกโหนด i ในชั้นนี้คือการปรับโหนด โหนดเอาต์พุตกำหนดโดย

$$\begin{aligned} O_{l,i} &= \mu_{A_i}(x), & \text{for } i = 1, 2 \text{ or} \\ O_{l,i} &= \mu_{B_{i-2}}(y), & \text{for } i = 3, 4 \end{aligned} \quad (5.15)$$

เมื่อ x หรือ y คือ อินพุตของโหนด และ A_i หรือ B_{i-2} เป็นเซตของฟัซซีที่เกี่ยวข้องกับโหนด กล่าวคือ เอาต์พุตของชั้นนี้คือค่าเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของส่วนหลักฐาน สำหรับตัวอย่าง A_i มีคุณลักษณะ โดย gaussian function

$$\mu_{A_i}(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.16)$$

เมื่อ c_i, σ_i คือเซตพารามิเตอร์ พารามิเตอร์ในชั้นนี้เรียกว่า พารามิเตอร์หลักฐาน (premise parameters)

ชั้นที่ 2 ทุกโหนดในชั้นนี้ถูกกำหนดด้วย Π ซึ่งคือการคูณกันของสัญญาณที่เข้ามาและเป็นเอาต์พุตตัวอย่างเช่น

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2. \quad (5.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นที่ 3 ทุกโหนดในชั้นนี้ถูกกำหนดโดย N เพื่อทำการนอร์มอลไลซ์ค่าน้ำหนัก

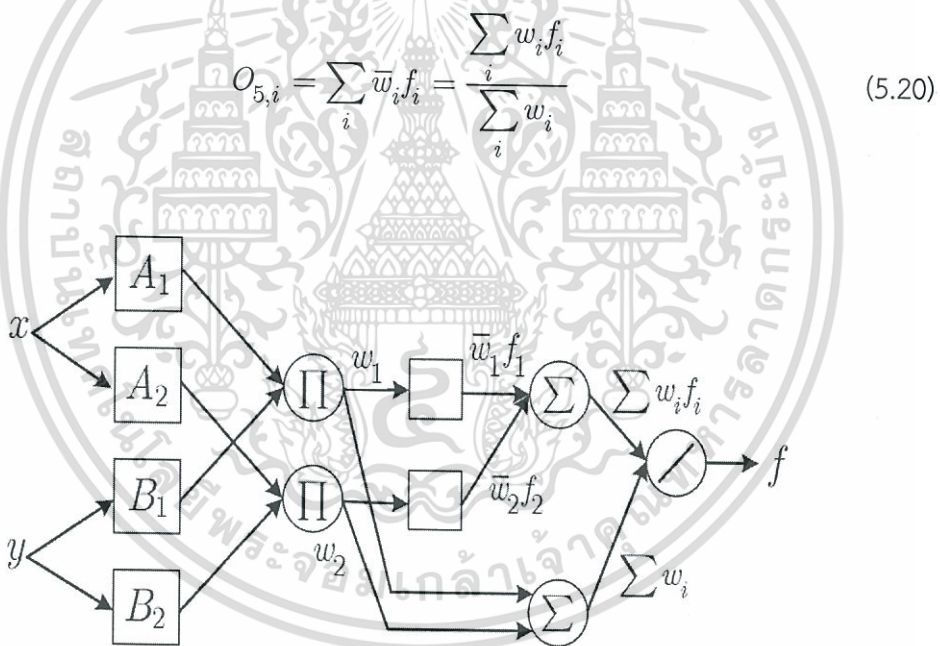
$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2. \quad (5.18)$$

ชั้นที่ 4 ทุกโหนด i ในชั้นนี้ คือโหนดที่มีการปรับตัวกับฟังก์ชันโหนด

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (5.19)$$

เมื่อ \bar{w}_i คือ เอ้าท์พุทของชั้นที่ 3 และ $\{p_i, q_i, r_i\}$ เป็นเซตพารามิเตอร์ พารามิเตอร์ในชั้นนี้ เรียกว่า พารามิเตอร์ผลลัพธ์ (consequent parameters)

ชั้นที่ 5 ชั้นนี้จะมีอยู่โหนดเดียว กำหนดโดย Σ ซึ่งเอ้าท์พุทที่ได้คือการรวมกันของสัญญาณเข้ามาทั้งหมด



รูปที่ 5.19 โครงสร้าง ANFIS รูปแบบอื่น ที่มี 2 อินพุต 2 หลักปฏิบัติการกระทำ โมเดลฟuzzy Sugeno

โครงสร้างที่มีการปรับตัว ไม่ได้มีลักษณะเฉพาะ เราสามารถรวมชั้นที่ 3 และชั้นที่ 4 เอาไว้ด้วยกัน โครงข่ายก็จะมีเพียง 4 ชั้นเท่านั้น ทำนองเดียวกันสามารถกระทำการนอร์มอลไลซ์ค่าน้ำหนักในชั้นสุดท้าย รูปที่ 5.19 แสดงถึง ANFIS ชนิดนี้

5.8.2 ขั้นตอนวิธีการเรียนรู้แบบผสม

จากโครงสร้างของ ANFIS เมื่อค่า พารามิเตอร์หลักฐานถูกกำหนดไม่ให้เปลี่ยนแปลง เออร์พุดทั้งหมดสามารถแสดงในรูปของผลรวมเชิงเส้นของพารามิเตอร์ผลลัพธ์ ในสัญลักษณ์เออร์พุด f ใน รูปที่ 5.18 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น [4], [6]

$$\begin{aligned} f &= \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 \\ &= \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 \\ &= (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + r_1 \\ &\quad + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + r_2 \end{aligned} \quad (5.21)$$

ซึ่งคือเส้นตรงใน พารามิเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์ p_1, q_1, r_1, p_2, q_2 และ r_2 ดังนั้นขั้นตอนวิธีการเรียนรู้แบบผสมมีการพัฒนาในส่วนก่อนหน้านี้ สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงมากขึ้น โดยเฉพาะในส่วนคำนวณไปข้างหน้าของขั้นตอนวิธีการเรียนรู้แบบผสม โหนดเออร์พุดส่งผ่านไปข้างหน้าจนกระทั่ง ชั้นที่ 4 และ พารามิเตอร์ผลลัพธ์ถูกตรวจสอบโดยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method) ในส่วนการคำนวณค่าย้อนกลับสัญญาณค่าผิดพลาดถูกแพร่กลับมา และพารามิเตอร์หลักฐานถูกอัปเดตโดย gradient descent ตารางที่ 5.1 สรุปกิจกรรมในแต่ละส่วนที่ผ่าน

ตารางที่ 5.1 การส่งผ่านในกระบวนการเรียนรู้แบบผสมสำหรับ ANFIS

	ส่งผ่านไปข้างหน้า	ส่งผ่านย้อนกลับ
พารามิเตอร์หลักฐาน	คงที่	ปรับด้วยวิธีความลาดชันที่สุด
พารามิเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์	ปรับด้วยวิธีประเมินค่ากำลังสองน้อยที่สุด	คงที่
สัญญาณ	โหนดเออร์พุด	สัญญาณความผิดพลาด

ดังกล่าวก่อนหน้านี้ พารามิเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์ ถูกตรวจสอบให้เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขที่ พารามิเตอร์หลักฐานถูกกำหนดให้คงที่นั้น วิธีการแบบผสมจะลู่เข้าหาคำตอบได้เร็วขึ้นมาก เนื่องจาก ช่วยลดมิติของพื้นที่ว่างในการค้นหาของวิธีการแพร่ค่าย้อนกลับแบบดั้งเดิม

บทที่ 6

การหาคำตอบของกระแสฟอลต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม และระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้

Fault Current Solutions Using Artificial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems

6.1 เงื่อนไขในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

6.1.1 เงื่อนไขในการฝึกสอน

ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมใช้กระบวนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสด้วยวิธี Levenberg-Marquardt Algorithm นั้นจะมีเงื่อนไขพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการฝึกสอนดังนี้

6.1.1.1 Performance Gradient Factor

ค่า Gradient Factor เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาถึงการสิ้นสุดของการฝึกสอนในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละรอบนั้น ค่า Performance Gradient Factor จะเปลี่ยนแปลง ขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาด (e) ที่เกิดขึ้นใน Epoch นั้นๆ โดยการฝึกสอนจะสิ้นสุดลงเมื่อค่า Performance Gradient Factor มีค่าน้อยกว่า $1e-10$

6.1.1.2 μ Factor

μ หรือ Learning Factor เป็นค่าคงที่ ที่ใช้เร่งปรับค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอสให้ลู่เข้าหาคำตอบ ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละรอบนั้นหากค่า Gradient Factor มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีการปรับค่า μ ให้เพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่า Gradient Factor มีแนวโน้มที่จะลดลง จากนั้นค่า μ จะถูกปรับลงเรื่อยๆ และมีการปรับเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อค่า Gradient Factor มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า μ เริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 0.001 การปรับค่า μ เพิ่มขึ้นนั้นจะทำโดยการคูณด้วย Decreased Factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 และการฝึกสอนจะสิ้นสุดลงเมื่อค่า μ มีค่ามากกว่า $1e10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.1.3 ปริมาณข้อมูลฝึกสอน

ปริมาณข้อมูลที่นำมาใช้ในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะเป็นเงื่อนไขหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการหาคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม โดยทั่วไปปัญหาที่ซับซ้อนและการใช้ข้อมูลฝึกสอนจำนวนมาก จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพการหาคำตอบที่ดีขึ้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลฝึกสอน

6.1.1.4 คุณภาพของข้อมูลฝึกสอน

ชุดข้อมูลฝึกสอนที่กระจายจะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลฝึกสอนที่กระจายอย่างพอดีและข้อมูลทดสอบควรอยู่ในช่องระหว่างการกระจายของข้อมูลฝึกสอน

6.1.2 เงื่อนไขในการทดสอบ

6.1.2.1 ประสิทธิภาพในการทดสอบ

การวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประเทียมนั้น จะวัดค่าผิดพลาดของคำตอบข้อมูลทดสอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วเป็นเกณฑ์

สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมนี้ใช้ค่าผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) และค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error : MAE) ตามสมการ 6.1 และ 6.2

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Output_{t\ arg et(i)} - Output_{ANN(i)}}{Output_{t\ arg et(i)}} \right| \times 100\% \quad (6.1)$$

$Output_{t\ arg et(i)}$ คือค่าที่ได้จากโปรแกรม PowerWorld

$Output_{ANN(i)}$ คือค่าที่ได้จากโปรแกรม ANN

n คือจำนวนชุดทดสอบ

$$APE = \left| \frac{Output_{t\ arg et} - Output_{ANN}}{Output_{t\ arg et}} \right| \times 100\% \quad (6.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Output_{target}$ คือค่าที่ได้จากโปรแกรม PowerWorld

$Output_{ANN}$ คือค่าที่ได้จากโปรแกรม ANN

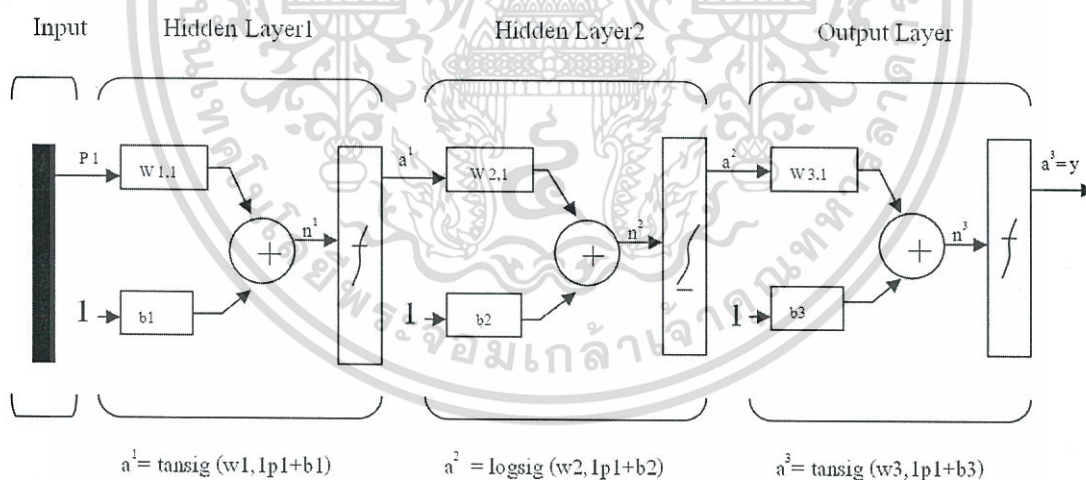
n คือจำนวนชุดทดสอบ

6.1.3 ตัวแปรในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

ระบบไฟฟ้าที่ใช้กำหนดให้ตัวแปรอินพุทของบัสมี 2 และ 1 เอาท์พุท โดยอินพุทคือค่ากำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดและโหลด ส่วนเอาท์พุทคือค่ากระแสฟอลต์ และตัวแปรอินพุทของสายส่งมี 3 และ 1 เอาท์พุท โดยอินพุทคือค่ากำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิด, โหลดและตำแหน่งฟอลต์ ส่วนเอาท์พุทคือค่ากระแสฟอลต์

6.1.4 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation Neural Network) ในการทดลองประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 3 ระบบ ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในระบบไฟฟ้า

6.1.5 ขั้นตอนการฝึกสอนและทดสอบ

6.1.5.1 เงื่อนไขโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ

- 1) ค่าเริ่มต้นที่ใช้เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือกค่าเริ่มต้นที่ใช้เป็นค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในโครงข่ายประเทียบบแบบแพร่ค่าย้อนกลับนี้ โดยทั่วไปจะมี 2 วิธี คือกำหนดค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสด้วยตนเองหรืออีกวิธีคือให้โปรแกรมทำการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสด้วยวิธีการสุ่มเลือก สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการสุ่มเลือกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเนื่องจากการฝึกสอนในแต่ละรอบนั้นมีทิศทางกรลู่เข้าสู่คำตอบที่แตกต่างกันออกไป

2) ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส

การปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกันสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสด้วยวิธี Levenberg-Marquardt Algorithm ซึ่งมีประสิทธิภาพและมีความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงที่สุด โดยในการทดสอบกำหนดให้มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นจำนวน 100 ครั้ง (Epoch) ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในแต่ละรอบนั้นจะคำนวณหาค่าผิดพลาดของคำตอบที่ข้อมูลชุดฝึกสอนและข้อมูลชุดทดสอบแต่ละชุดเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error : MSE) ของชุดข้อมูลทดสอบในรอบการคำนวณปัจจุบันกับค่า MSE ของข้อมูลทดสอบที่ได้จากการคำนวณในรอบก่อนหน้านี้ และทำการบันทึกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในรอบที่ทำให้ค่า MSE ของชุดข้อมูลทดสอบมีค่าต่ำสุด

3) จำนวนรอบของการฝึกสอน

เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสจบครบ ถือว่าเป็นหนึ่งรอบของการฝึกสอน ซึ่งหลังจากจบหนึ่งรอบของการฝึกสอนก็จะทำการสุ่มเลือกค่าถ่วงน้ำหนักขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะเป็นค่าที่ต่างจากค่าเริ่มต้นที่ผ่านมาและจะทำจนครบจำนวนรอบที่เราได้กำหนดไว้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้จำนวนรอบของการฝึกสอนในแต่ละโครงข่ายของโครงข่ายประสาทเทียมเท่ากับ 10 รอบต่อโครงข่าย และเลือกรอบของการฝึกสอนที่ทำให้ค่า MAPE ของชุดทดสอบมีค่าต่ำสุด

4) จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียม

จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน คือถ้าจำนวนนิรอนมากการใช้เวลาในการฝึกสอนจะมากตามไปด้วย แต่จำนวนนิรอนนั้นไม่ได้เป็นสิ่งที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีคุณภาพ คือจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่มากไม่ได้เป็นตัวชี้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมจะมีประสิทธิภาพดี ในบางปัญหาจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่น้อยอาจมีประสิทธิภาพดีกว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่มาก

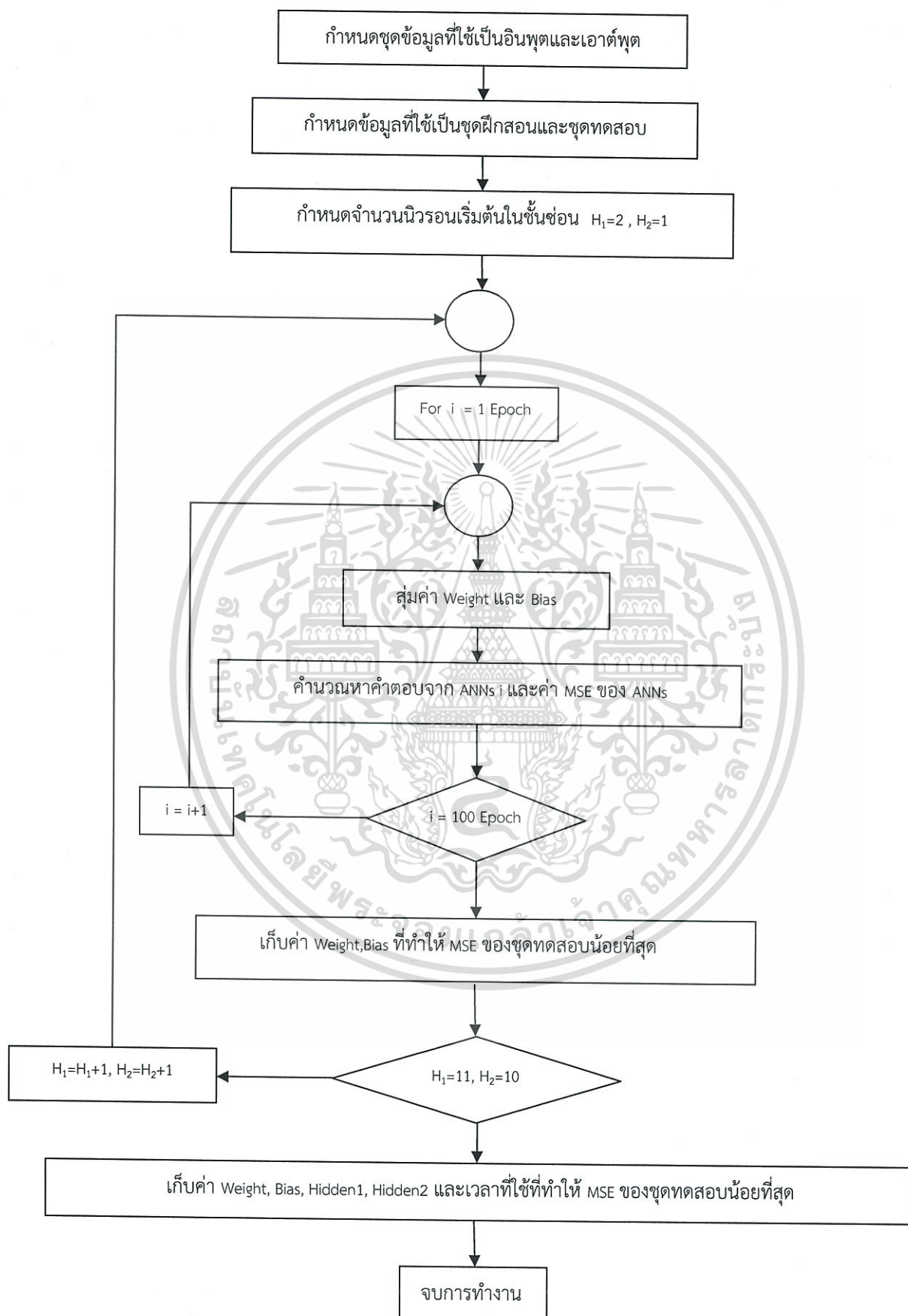
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับตามรูปที่ 6.1 โดยกำหนดให้จำนวนนิวรอนของชั้นซ่อนที่ 1 มากกว่าจำนวนนิวรอนของชั้นซ่อนที่ 2 อยู่จำนวน 1 นิวรอน

6.1.5.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ

การเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในชั้นซ่อนที่ 1 ใช้แบบ Log-Sigmoid, ชั้นซ่อนที่ 2 ใช้แบบ Tan-Sigmoid ส่วนเอาต์พุตใช้แบบ Log-Sigmoid และทำการเปรียบเทียบว่าโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมระบบไหนที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดที่สุดดูจากค่า MSE ของชุดทดสอบ มีขั้นตอนดังรูปที่ 6.2 และแสดงโปรแกรมการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ ดังรูปที่ 6.3

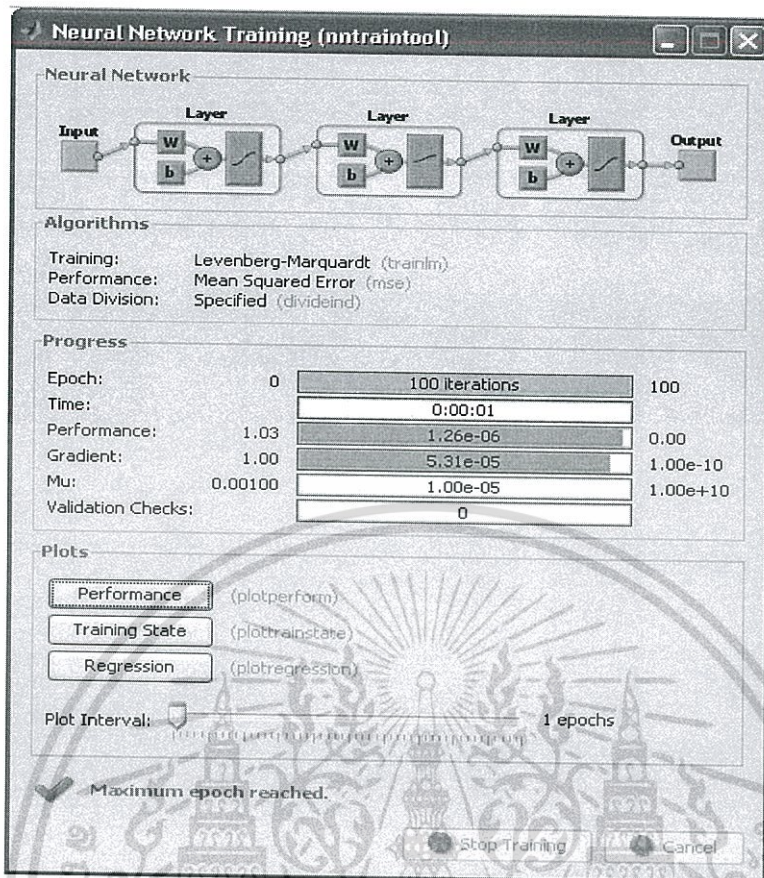


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 โพลีชาร์ตแสดงการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 โปรแกรมแสดงการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ

6.2 เงื่อนไขในการฝึกสอนและทดสอบระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้

6.2.1 เงื่อนไขในการฝึกสอน

ในการฝึกสอนระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบไฮบริด นั้นจะมีเงื่อนไขพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการฝึกสอนดังนี้

6.2.1.1 ปริมาณข้อมูลฝึกสอน

ปริมาณข้อมูลที่นำมาใช้ในการฝึกสอนและทดสอบระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ เป็นเงื่อนไขหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการหาคำตอบของระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ ถ้าปัญหาที่ซับซ้อนการใช้ข้อมูลฝึกสอนจำนวนมาก จะทำให้ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้มีประสิทธิภาพการหาคำตอบดีขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลฝึกสอนด้วย

6.2.1.2 คุณภาพของข้อมูลฝึกสอน

การกระจายของชุดข้อมูลฝึกสอน โดยระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้จะสามารถหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลฝึกสอนจะต้องกระจายให้ดีพอและข้อมูลทดสอบควรอยู่ในช่วงของการกระจายดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 เงื่อนไขในการทดสอบ

6.2.2.1 ประสิทธิภาพในการทดสอบ

การวัดประสิทธิภาพของระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้และโครงข่ายประสาทเทียมนั้น จะวัดค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลทดสอบที่ได้จากระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ที่ผ่านการฝึกสอนแล้วเป็นเกณฑ์

สำหรับระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ใช้ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Squared Error : MSE) ตามสมการ 6.3

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Output_{target(i)} - Output_i}{Output_{target(i)}} \right)^2 \quad (6.3)$$

$Output_{target(i)}$ คือค่าที่ได้จากโปรแกรม PowerWorld

$Output_i$ คือค่าที่ได้จากโปรแกรม ANN และ ANFIS

n คือจำนวนชุดทดสอบ

6.2.3 ตัวแปรในการฝึกสอนและทดสอบระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้

6.2.3.1 ระบบทดสอบ 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ระบบ 7 บัส 5 เครื่องกำเนิด

ไฟฟ้า และระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

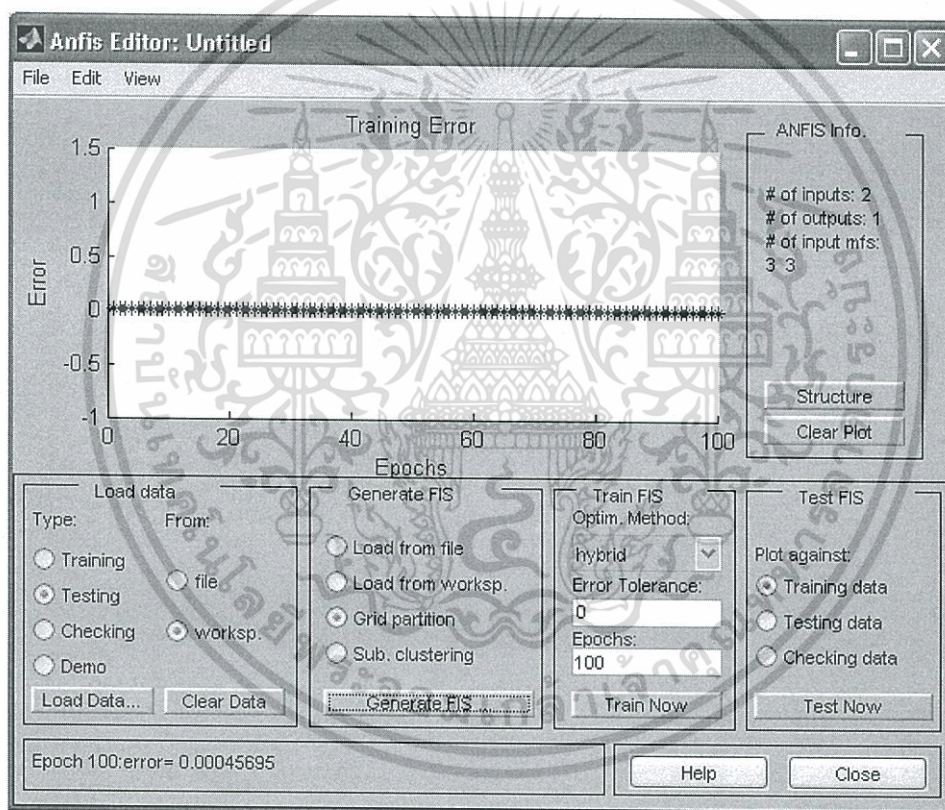
กำหนดให้ตัวแปรอินพุทของบัสมี 2 และ 1 เอาร์ทพุท โดยอินพุทคือค่ากำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดและโหลด ส่วนเอาร์ทพุทคือค่ากระแสฟอลต์ และกำหนดตัวแปรอินพุทของสายส่งมี 3 และ 1 เอาร์ทพุท โดยอินพุทคือค่ากำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิด, โหลดและตำแหน่งฟอลต์ ส่วนเอาร์ทพุทคือค่ากระแสฟอลต์

6.2.4 โครงสร้างและเงื่อนไขของระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ใช้ในการทดสอบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรมแสดงการฝึกสอนของระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ดังรูปที่ 6.4 และเลือกใช้โครงสร้าง โมเดลฟuzzy Sugeno ที่ใช้ในบัส ดังรูปที่ 6.5 โดยมีสองอินพุทใช้ชนิดของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็น gaussmf [7] จำนวนของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็นสาม เอาร์ทพุทของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็น Linear และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบไฮบริด (Hybrid) และเลือกใช้โครงสร้าง โมเดลฟuzzy Sugeno ที่ใช้ในสายส่ง ดังรูปที่ 6.6 โดยมีสามอินพุทใช้ชนิดของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

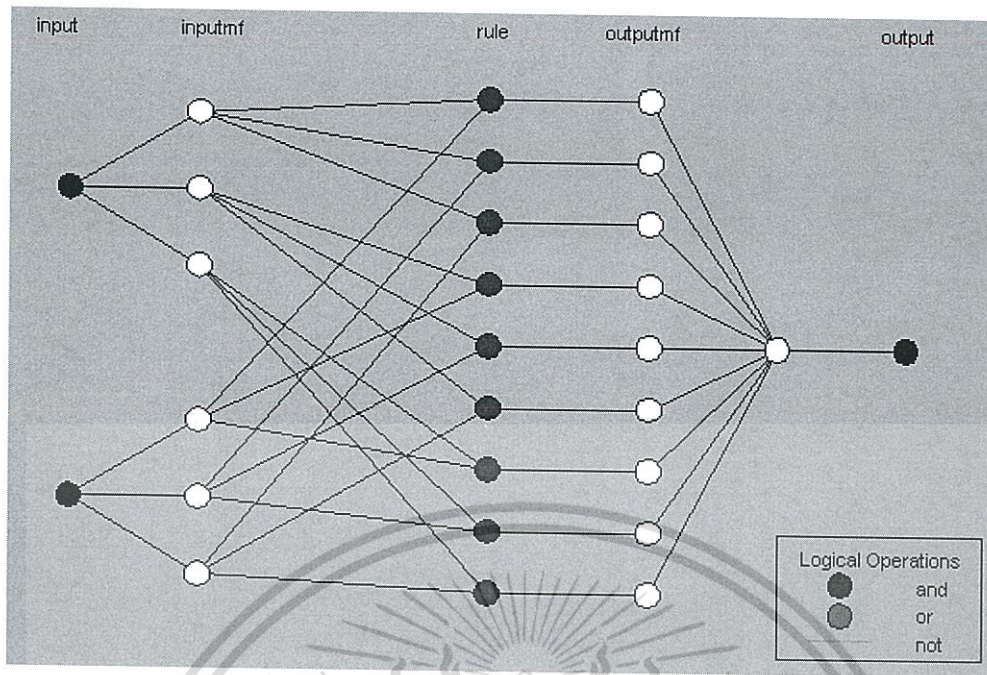
gaussmf [7] จำนวนของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็นสาม เอาท์พุทของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็น Linear และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบไฮบริด (Hybrid)

สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับระบบที่นำเสนอ ใช้แบบแพร่ค้ำย้อนกลับ มีอยู่ 2 ชั้นซ่อน ชั้นซ่อนที่ 1 มีจำนวน 3 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid ชั้นซ่อนที่ 2 มีจำนวน 2 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Log-Sigmoid ชั้นเอาท์พุทใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Linear และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt 100 epochs โดยค่า Weight และค่า Bias เริ่มต้นจากการสุ่ม

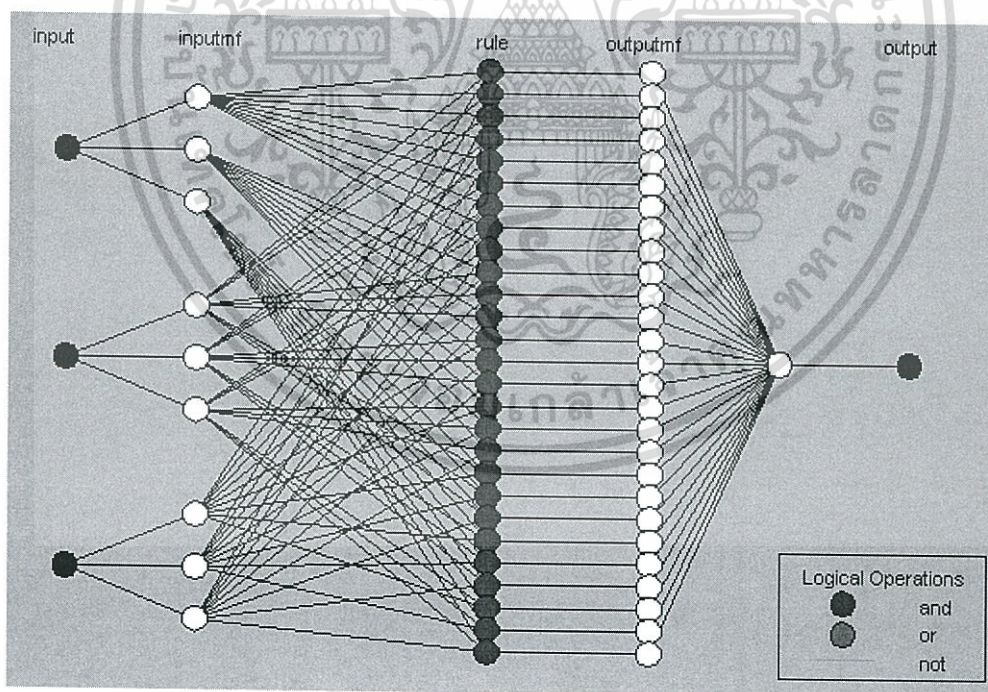


รูปที่ 6.4 โปรแกรมแสดงการฝึกสอนของระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 โครงสร้างของระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ที่ใช้วีเคราะห์กระแสฟอลต์ในบัส



รูปที่ 6.6 โครงสร้างของระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ที่ใช้วีเคราะห์กระแสฟอลต์ในสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.5 ขั้นตอนการฝึกสอนและการทดสอบ

6.2.5.1 เจ็อนไขต่างๆ ภายในระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้

1) จำนวนรอบของการฝึกสอน

สำหรับระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยเริ่มจากการปรับจำนวนของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันที่มีค่าน้อยๆ และถูกทำการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าสูงสุดและปรับเปลี่ยนชนิดของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันจนครบทั้งหมดแล้วเลือกวิธีที่ดีที่สุดและใช้กระบวนการเรียนรู้แบบไฮบริด 100 epochs.

2) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้โดยวิเคราะห์พอลต์ที่บัสมีสองอินพุทใช้ชนิดของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็น gaussmf จำนวนของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็นสาม เอ้าท์พุทของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็น Linear ดังรูปที่ 6.7 และทำการทดสอบระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้โดยวิเคราะห์พอลต์ที่สายส่งมีสามอินพุทใช้ชนิดของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็น gaussmf จำนวนของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็นสาม เอ้าท์พุทของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็น Linear ดังรูปที่ 6.8

The screenshot shows a dialog box for configuring a Fuzzy Inference System (FIS). It is divided into two main sections: 'INPUT' and 'OUTPUT'.
 In the 'INPUT' section, there is a field for 'Number of MFs' with the value '33' entered. Below it, a note reads: 'To assign a different number of MFs to each input, use spaces to separate these numbers.' To the right, there is a list box for 'MF Type' with the following options: trimf, trapmf, gbellmf, gaussmf (which is currently selected), gauss2mf, pimf, dsigmf, and psigmf.
 In the 'OUTPUT' section, there is a list box for 'MF Type' with the following options: constant and linear (which is currently selected).
 At the bottom of the dialog box, there are two buttons: 'OK' and 'Cancel'.

เอกสารนี้เป็นรูปที่ 6.7 ชนิดและจำนวนของเมมเบอร์ชิฟที่ใช้วิเคราะห์กระแสพอลต์ในบัส
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INPUT

Number of MFs:

MF Type:

To assign a different number of MFs to each input, use spaces to separate these numbers.

OUTPUT

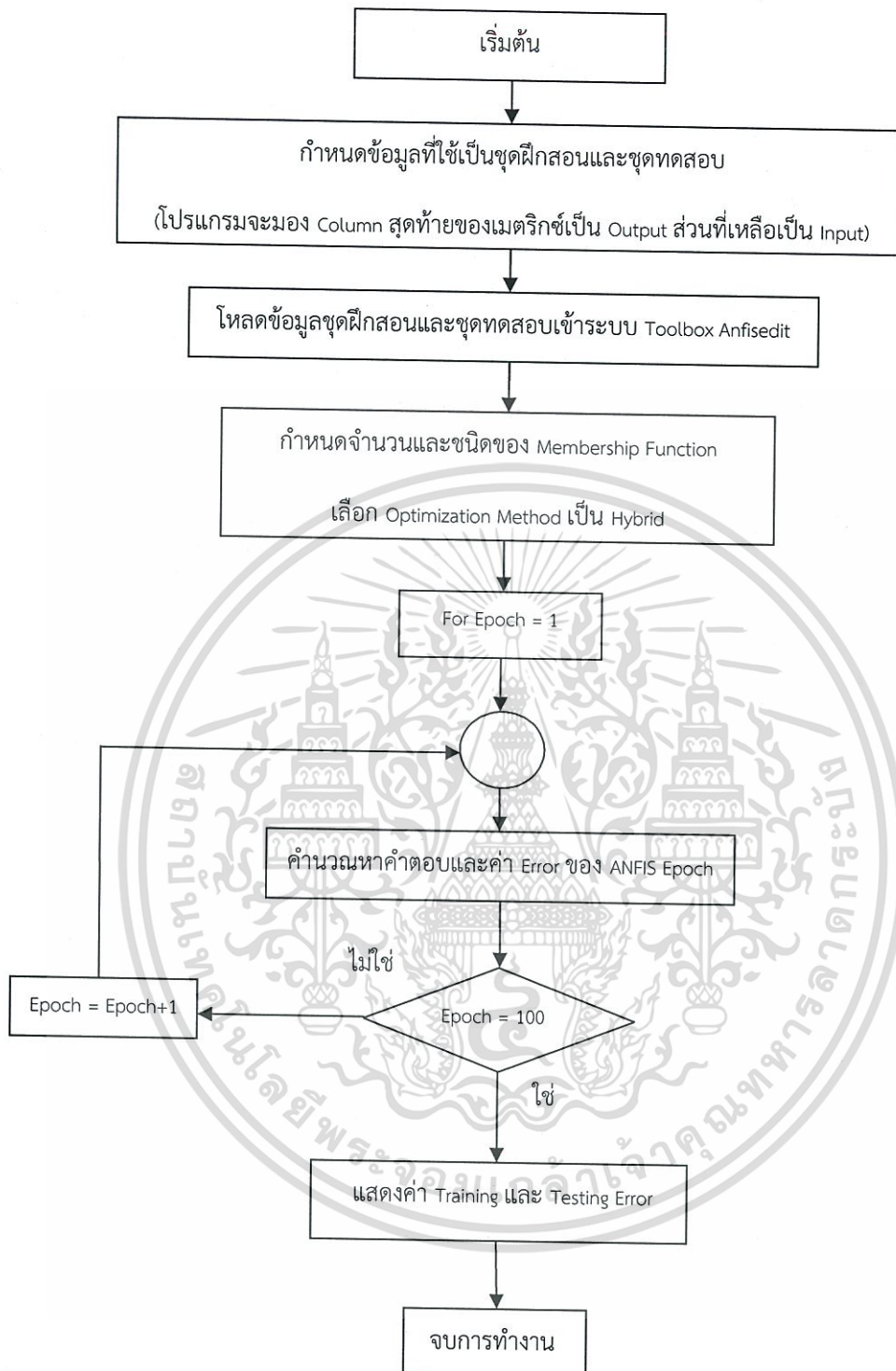
MF Type:

OK Cancel

รูปที่ 6.8 ชนิดและจำนวนของเมมเบอร์ชิฟที่ใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ในสายส่ง

6.2.5.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้

การเลือกชนิดและจำนวนของเมมเบอร์ชิฟในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) แล้วทำการเปรียบเทียบกันว่าโครงสร้างของระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ระบบไหนที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดจากค่า MSE ของชุดทดสอบ โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทดสอบของระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

ผลการทดลอง

7.1 การทดสอบระบบไฟฟ้า 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ข้อมูลที่ได้จากการใช้ระบบทดสอบจากโปรแกรม PowerWorld โดยใช้ข้อมูลการหากระแสฟลด์แบบสมมาตรที่บัสและสายส่ง โดยศึกษา 2 แบบ กระแสฟลด์ที่บัส ใช้ข้อมูลจำนวน 50 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลฝึกสอน 35 ชุด และข้อมูลทดสอบ 15 ชุด และกระแสฟลด์ที่สายส่ง โดยศึกษาที่ตำแหน่งฟลด์ 25%, 50% และ 75% ของสายส่ง ใช้ข้อมูลจำนวน 60 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลฝึกสอน 40 ชุด และข้อมูลทดสอบ 20 ชุด โดยการปรับค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดของชุดข้อมูลอินพุต ให้การไหลในสายส่ง ไม่เกินพิกัด 80% ของสายส่ง

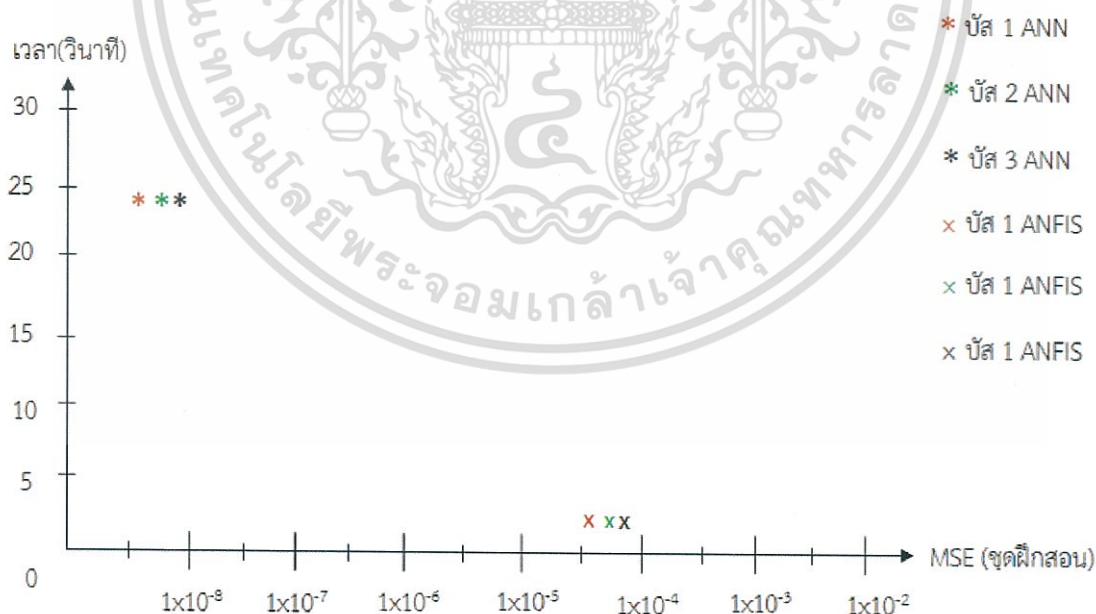
การจำลองหากระแสฟลด์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม โครงข่ายประสาทเทียมใช้แบบแพร่ค่าย้อนกลับที่มี 2 ชั้นซ่อน ชั้นซ่อนที่ 1 มีจำนวน 8 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid ชั้นซ่อนที่ 2 มีจำนวน 7 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Log-Sigmoid ชั้นเอาต์พุตใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid สำหรับกระแสฟลด์ที่บัส จำนวนข้อมูล 50 ชุด ใช้ข้อมูลฝึกสอน 35 ชุด และข้อมูลทดสอบ 15 ชุด และชั้นซ่อนที่ 1 มีจำนวน 8 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid ชั้นซ่อนที่ 2 มีจำนวน 7 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Log-Sigmoid ชั้นเอาต์พุตใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid สำหรับกระแสฟลด์ที่สายส่ง โดยศึกษาที่ตำแหน่งฟลด์ 25%, 50% และ 75% ของสายส่ง จำนวนข้อมูล 60 ชุด ใช้ข้อมูลฝึกสอน 40 ชุด และข้อมูลทดสอบ 20 ชุด และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt 100 epochs โดยค่า Weight และค่า Bias เริ่มต้นจากการสุ่ม ทำการเรียนรู้ 10 รอบเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด

การจำลองหากระแสฟลด์โดยใช้ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ โครงสร้างของ ANFIS เลือกใช้โมเดลฟัซซี Sugeno อันดับที่ 1 อินพุตที่ใช้วิเคราะห์กระแสฟลด์ที่บัส คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด มีจำนวนเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันอยู่ 3 ใช้เมมเบอร์ชิพฟังก์ชันเป็น gaussmf [7] และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid) 100 epochs อันดับที่ 2 อินพุตที่ใช้วิเคราะห์กระแสฟลด์ที่สายส่ง โดยศึกษาที่ตำแหน่งฟลด์ 25%, 50% และ 75% ของสายส่งคือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, โหลดและตำแหน่งฟลด์ มีจำนวนเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันอยู่ 3 ใช้เมมเบอร์ชิพฟังก์ชันเป็น gaussmf [7] และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid) 100 epochs

การจำลองหากระแสฟลด์ โดยใช้ค่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดเป็นอินพุต และใช้ค่ากระแสฟลด์ เป็นเอาต์พุต ของกระแสฟลด์ที่บัส จำนวนข้อมูล 50 ชุด ใช้ข้อมูลฝึกสอน 35 ชุด และข้อมูลทดสอบ 15 ชุด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 7.1

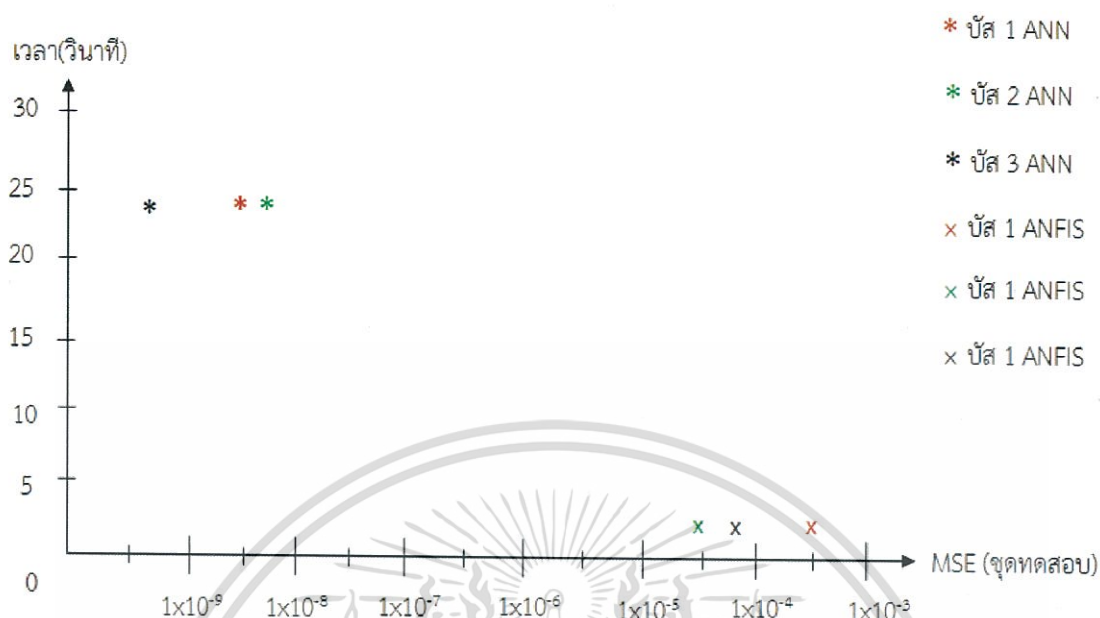
ตารางที่ 7.1 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่บัสของระบบ 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสฟอลต์ที่	ผลการจำลอง	ANN	ANFIS
บัส 1	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.499	1.48
	MSE ของชุดฝึกสอน	5.4104×10^{-8}	4.5695×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	5.5102×10^{-8}	5.5653×10^{-3}
บัส 2	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.547	1.46
	MSE ของชุดฝึกสอน	4.9897×10^{-8}	2.9543×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	2.7215×10^{-8}	3.6131×10^{-4}
บัส 3	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.703	1.45
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.6555×10^{-8}	2.1430×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	4.4096×10^{-9}	2.4897×10^{-4}



รูปที่ 7.1 การแสดงค่า MSE ของชุดฝึกสอนเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



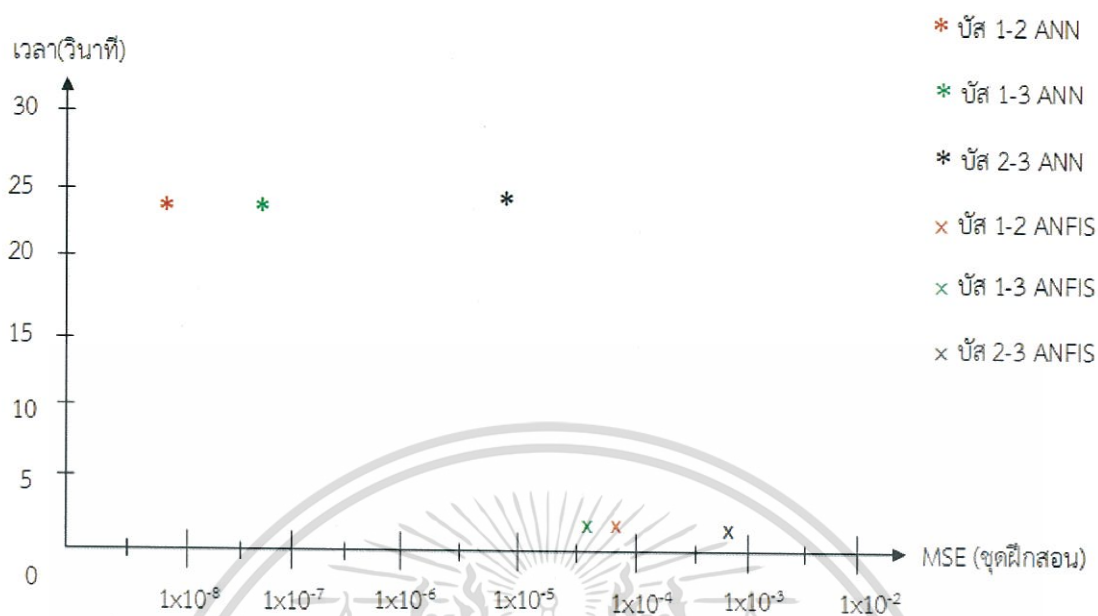
รูปที่ 7.2 การแสดงค่า MSE ของชุดทดสอบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที)

การจำลองหากระแสฟอลต์โดยใช้ค่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, โหลดและตำแหน่งฟอลต์ เป็นอินพุต และใช้ค่ากระแสฟอลต์ เป็นเอาต์พุต ของกระแสฟอลต์ที่สายส่งระหว่างบั๊ส โดยศึกษาที่ตำแหน่งฟอลต์ 25% ,50% และ 75% ของสายส่ง จำนวนข้อมูล 60 ชุด ใช้ข้อมูลฝึกสอน 40 ชุด และข้อมูลทดสอบ 20 ชุด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่สายส่งของระบบ 3 บั๊ส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสฟอลต์ที่	ผลการจำลอง	ANN	ANFIS
สายส่งระหว่างบั๊ส 1 ไปยังบั๊ส 2	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.422	1.68
	MSE ของชุดฝึกสอน	2.2479×10^{-8}	2.5535×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.8815×10^{-5}	4.7322×10^{-3}
สายส่งระหว่างบั๊ส 1 ไปยังบั๊ส 3	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.391	1.625
	MSE ของชุดฝึกสอน	2.7201×10^{-7}	4.0107×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	7.5208×10^{-8}	3.0152×10^{-3}
สายส่งระหว่างบั๊ส 2 ไปยังบั๊ส 3	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	28.609	1.65
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.7720×10^{-5}	1.4528×10^{-3}
	MSE ของชุดทดสอบ	6.8081×10^{-7}	1.6307×10^{-2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.3 การแสดงค่า MSE ของจุดฝึกสอนเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที)



รูปที่ 7.4 การแสดงค่า MSE ของจุดทดสอบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.2 วิธีการที่นำเสนอให้ผลการจำลองดีกว่าโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ในเรื่องเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ แต่ค่า Mean Square Error (MSE) ของข้อมูลชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ดีกว่า

7.2 การทดสอบระบบไฟฟ้า 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ข้อมูลที่ได้จากการใช้ระบบทดสอบจากโปรแกรม PowerWorld โดยใช้ข้อมูลการหากระแสฟอลต์แบบสมมาตรที่บัสและสายส่ง โดยศึกษา 2 แบบ กระแสฟอลต์ที่บัส ใช้ข้อมูลจำนวน 50 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลฝึกสอน 35 ชุด และข้อมูลทดสอบ 15 ชุด และกระแสฟอลต์ที่สายส่ง โดยศึกษาที่ตำแหน่งฟอลต์ 25%, 50% และ 75% ของสายส่ง ใช้ข้อมูลจำนวน 60 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลฝึกสอน 40 ชุด และข้อมูลทดสอบ 20 ชุด โดยการปรับค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดของชุดข้อมูลอินพุต ให้การไหลในสายส่ง ไม่เกินพิกัด 80% ของสายส่ง

การจำลองหากระแสฟอลต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม โครงข่ายประสาทเทียมใช้แบบแพร่ค่าย้อนกลับที่มี 2 ชั้นซ่อน ชั้นซ่อนที่ 1 มีจำนวน 8 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid ชั้นซ่อนที่ 2 มีจำนวน 7 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Log-Sigmoid ชั้นเอาต์พุตใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid สำหรับกระแสฟอลต์ที่บัส จำนวนข้อมูล 50 ชุด ใช้ข้อมูลฝึกสอน 35 ชุด และข้อมูลทดสอบ 15 ชุด และชั้นซ่อนที่ 1 มีจำนวน 8 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid ชั้นซ่อนที่ 2 มีจำนวน 7 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Log-Sigmoid ชั้นเอาต์พุตใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid สำหรับกระแสฟอลต์ที่สายส่ง โดยศึกษาที่ตำแหน่งฟอลต์ 25%, 50% และ 75% ของสายส่ง จำนวนข้อมูล 60 ชุด ใช้ข้อมูลฝึกสอน 40 ชุด และข้อมูลทดสอบ 20 ชุด และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt 100 epochs โดยค่า Weight และค่า Bias เริ่มต้นจากการสุ่ม ทำการเรียนรู้ 10 รอบเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด

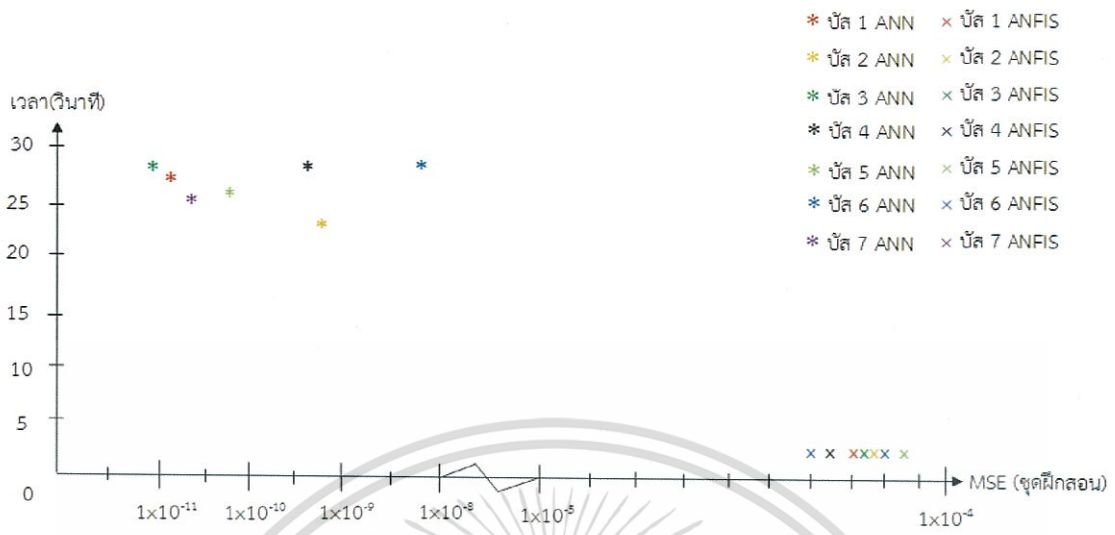
การจำลองหากระแสฟอลต์โดยใช้ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ โครงสร้างของ ANFIS เลือกใช้โมเดลฟัซซี Sugeno อันดับที่ 1 อินพุตที่ใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ที่บัส คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด มีจำนวนเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันอยู่ 3 ใช้เมมเบอร์ชิพฟังก์ชันเป็น gaussmf [7] และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid) 100 epochs อันดับที่ 2 อินพุตที่ใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ที่สายส่ง โดยศึกษาที่ตำแหน่งฟอลต์ 25%, 50% และ 75% ของสายส่งคือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, โหลดและตำแหน่งฟอลต์ มีจำนวนเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันอยู่ 3 ใช้เมมเบอร์ชิพฟังก์ชันเป็น gaussmf [7] และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid) 100 epochs

การจำลองหากระแสฟอลต์ โดยใช้ค่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดเป็นอินพุต และใช้ค่ากระแสฟอลต์ เป็นเอาต์พุต ของกระแสฟอลต์ที่บัส จำนวนข้อมูล 50 ชุด ใช้ข้อมูลฝึกสอน 35 ชุด และข้อมูลทดสอบ 15 ชุด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 7.3

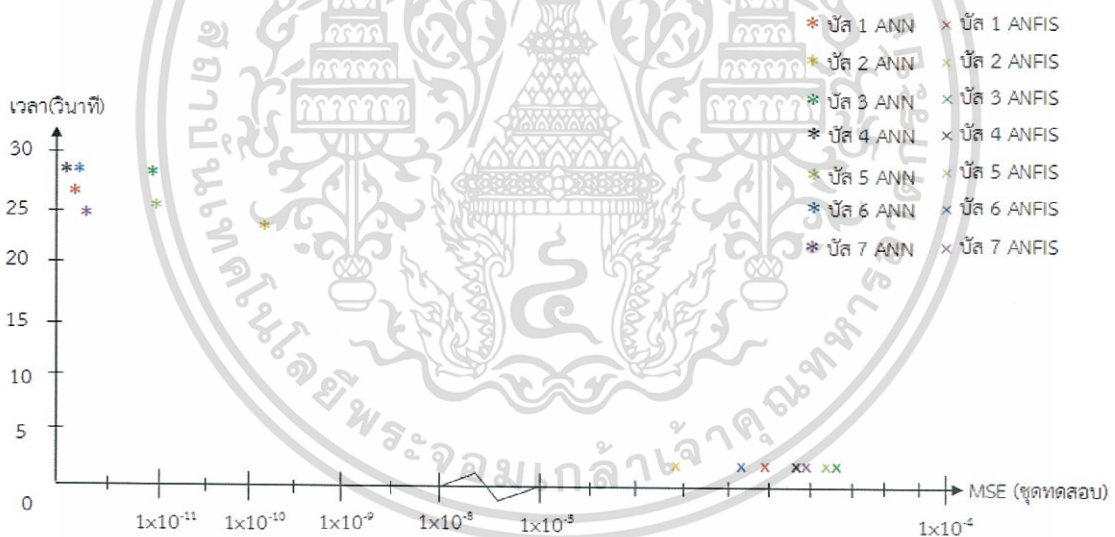
ตารางที่ 7.3 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่บัสของระบบ 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสฟอลต์ที่	ผลการจำลอง	ANN	ANFIS
บัส 1	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	27.343	1.5
	MSE ของชุดฝึกสอน	8.0539×10^{-10}	2.8668×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	9.0919×10^{-11}	5.1150×10^{-4}
บัส 2	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.952	1.35
	MSE ของชุดฝึกสอน	2.7086×10^{-9}	2.6166×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	9.0286×10^{-9}	7.4024×10^{-4}
บัส 3	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	28.858	1.32
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.1473×10^{-11}	2.7931×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.0629×10^{-11}	3.3486×10^{-4}
บัส 4	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	28.828	1.37
	MSE ของชุดฝึกสอน	4.8195×10^{-9}	3.5104×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	9.7873×10^{-11}	4.2875×10^{-4}
บัส 5	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	26.452	1.42
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.7288×10^{-10}	1.6809×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.0099×10^{-11}	3.6594×10^{-4}
บัส 6	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	28.984	1.39
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.1566×10^{-8}	3.8154×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	9.5097×10^{-11}	5.6278×10^{-4}
บัส 7	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	25.108	1.29
	MSE ของชุดฝึกสอน	7.2837×10^{-10}	2.2345×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	7.8733×10^{-11}	4.1452×10^{-4}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.5 การแสดงค่า MSE ของชุดฝึกสอนเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที)



รูปที่ 7.6 การแสดงค่า MSE ของชุดทดสอบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที)

การจำลองหากระแสฟอลต์ โดยใช้ค่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, โหลดและตำแหน่งฟอลต์ เป็น อินพุต และใช้ค่ากระแสฟอลต์ เป็นเอาต์พุต ของกระแสฟอลต์ที่สายส่งระหว่างบัส โดยศึกษาที่ ตำแหน่งฟอลต์ 25% ,50% และ 75% ของสายส่ง จำนวนข้อมูล 60 ชุด ใช้ข้อมูลฝึกสอน 40 ชุด และข้อมูลทดสอบ 20 ชุด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 7.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

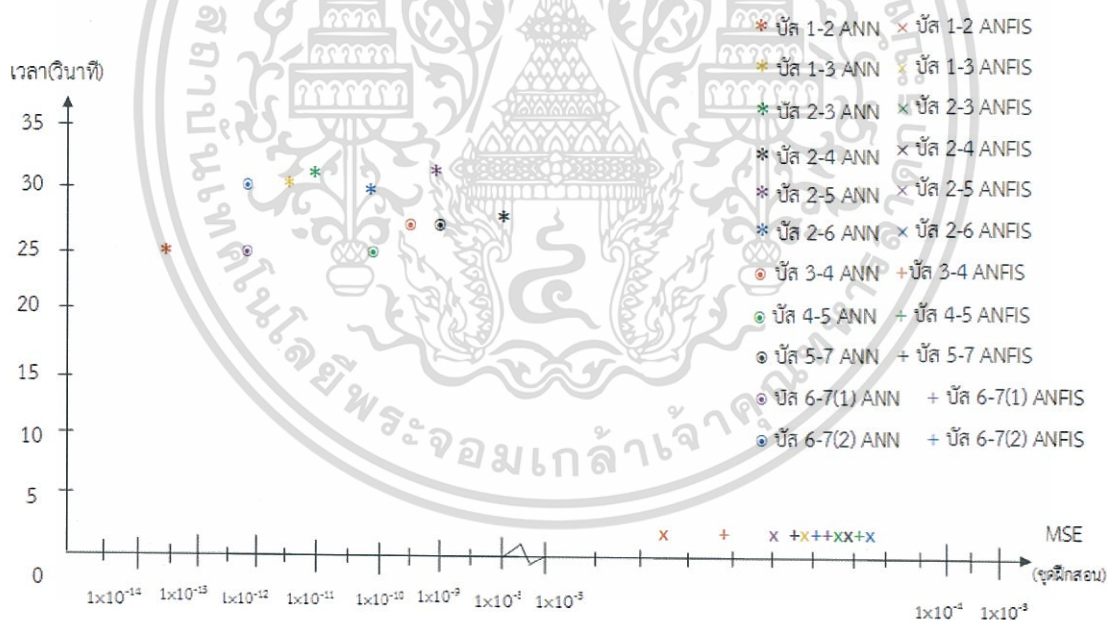
ตารางที่ 7.4 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่สายส่งของระบบ 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสฟอลต์ที่	ผลการจำลอง	ANN	ANFIS
สายส่งระหว่างบัส 1 ไปยังบัส 2	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	25.249	1.62
	MSE ของชุดฝึกสอน	6.0788×10^{-13}	7.5903×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.5645×10^{-10}	3.2786×10^{-4}
สายส่งระหว่างบัส 1 ไปยังบัส 3	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	30.655	1.6
	MSE ของชุดฝึกสอน	4.8475×10^{-11}	4.3681×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	6.5329×10^{-10}	2.7232×10^{-4}
สายส่งระหว่างบัส 2 ไปยังบัส 3	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	31.453	1.66
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.3486×10^{-11}	3.7853×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	5.1515×10^{-9}	2.5675×10^{-4}
สายส่งระหว่างบัส 2 ไปยังบัส 4	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	27.75	1.6
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.3599×10^{-8}	3.5442×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.3349×10^{-8}	2.5532×10^{-4}
สายส่งระหว่างบัส 2 ไปยังบัส 5	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	31.266	1.61
	MSE ของชุดฝึกสอน	3.2378×10^{-9}	4.9632×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	5.1672×10^{-6}	1.3011×10^{-2}
สายส่งระหว่างบัส 2 ไปยังบัส 6	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	29.875	1.62
	MSE ของชุดฝึกสอน	5.0307×10^{-10}	5.7945×10^{-3}
	MSE ของชุดทดสอบ	5.0349×10^{-5}	4.4324×10^{-2}
สายส่งระหว่างบัส 3 ไปยังบัส 4	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	26.749	1.63
	MSE ของชุดฝึกสอน	4.9881×10^{-9}	6.0709×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.3032×10^{-7}	6.9709×10^{-3}
สายส่งระหว่างบัส 4 ไปยังบัส 5	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.718	1.64
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.6420×10^{-10}	3.2084×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	4.0706×10^{-10}	2.5044×10^{-3}
สายส่งระหว่างบัส 5 ไปยังบัส 7	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	27.28	1.61
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.3689×10^{-9}	4.5676×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	4.5621×10^{-8}	3.0067×10^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

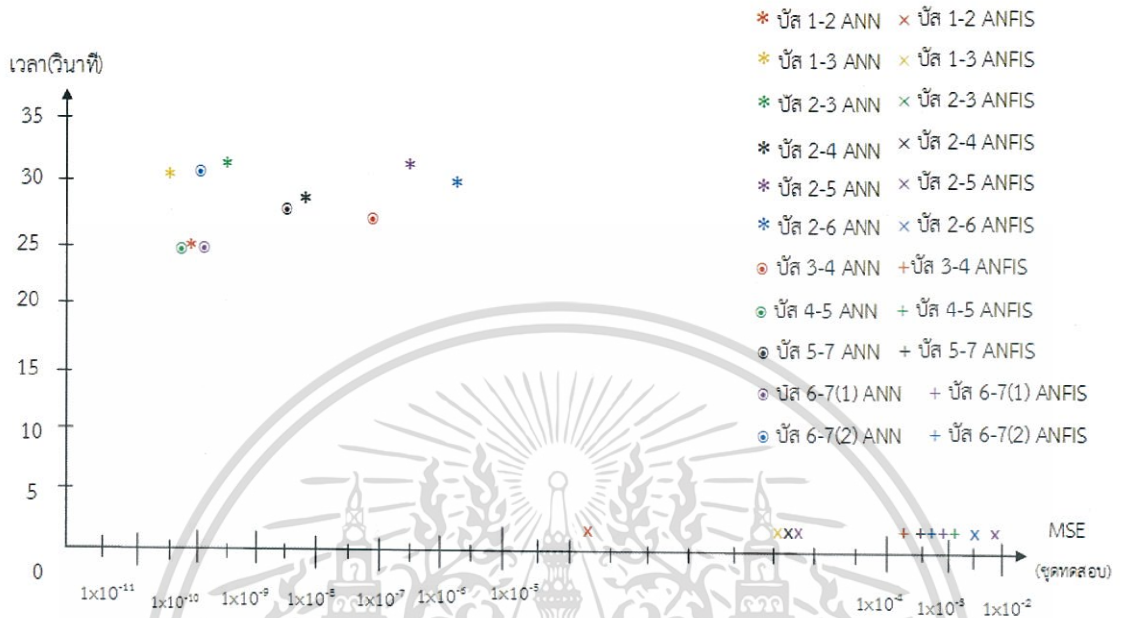
ตารางที่ 7.4 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่สายส่งของระบบ 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ต่อ)

กระแสฟอลต์ที่	ผลการจำลอง	ANN	ANFIS
สายส่งระหว่างบัส 6 ไปยังบัส 7 สายที่ 1	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	25.797	1.62
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.3639×10^{-12}	4.1457×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	2.4789×10^{-10}	2.6754×10^{-3}
สายส่งระหว่างบัส 6 ไปยังบัส 7 สายที่ 2	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	30.391	1.63
	MSE ของชุดฝึกสอน	5.8265×10^{-12}	4.3548×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.3952×10^{-10}	2.6977×10^{-3}



รูปที่ 7.7 การแสดงค่า MSE ของชุดฝึกสอนเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.8 การแสดงค่า MSE ของชุดทดสอบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที)

จากตารางที่ 7.3 และตารางที่ 7.4 วิธีการที่นำเสนอให้ผลการจำลองดีกว่าโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ในเรื่องเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ แต่ค่า Mean Square Error (MSE) ของข้อมูลชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

การนำข้อมูลของกระแสฟอลต์มาทำการวิเคราะห์ พิจารณาระบบทดสอบ IEEE 14 บัส โดยใช้ค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิด, โหลดและตำแหน่งฟอลต์ เป็นอินพุตและค่ากระแสฟอลต์แบบสมมาตรเป็นเอาต์พุต ข้อมูลที่ได้จากการใช้ระบบทดสอบจากโปรแกรม PowerWorld โดยใช้ข้อมูลการหากระแสฟอลต์แบบสมมาตรที่บัสและสายส่ง โดยศึกษา 2 แบบ กระแสฟอลต์ที่บัส ใช้ข้อมูลจำนวน 50 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลฝึกสอน 35 ชุด และข้อมูลทดสอบ 15 ชุด และกระแสฟอลต์ที่สายส่ง โดยศึกษาที่ตำแหน่งฟอลต์ 25%, 50% และ 75% ของสายส่ง ใช้ข้อมูลจำนวน 60 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลฝึกสอน 40 ชุด และข้อมูลทดสอบ 20 ชุด โดยการปรับค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดของชุดข้อมูลอินพุต ให้การไหลในสายส่ง ไม่เกินพิกัด 80% ของสายส่ง

การจำลองหากระแสฟอลต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม โครงข่ายประสาทเทียมใช้แบบแพร่ค่าย้อนกลับที่มี 2 ชั้นซ่อน ชั้นซ่อนที่ 1 มีจำนวน 8 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid ชั้นซ่อนที่ 2 มีจำนวน 7 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Log-Sigmoid ชั้นเอาต์พุตใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid สำหรับกระแสฟอลต์ที่บัส จำนวนข้อมูล 50 ชุด ใช้ข้อมูลฝึกสอน 35 ชุด และข้อมูลทดสอบ 15 ชุด และชั้นซ่อนที่ 1 มีจำนวน 8 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid ชั้นซ่อนที่ 2 มีจำนวน 7 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Log-Sigmoid ชั้นเอาต์พุตใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid สำหรับกระแสฟอลต์ที่สายส่ง โดยศึกษาที่ตำแหน่งฟอลต์ 25%, 50% และ 75% ของสายส่ง จำนวนข้อมูล 60 ชุด ใช้ข้อมูลฝึกสอน 40 ชุด และข้อมูลทดสอบ 20 ชุด และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt 100 epochs โดยค่า Weight และค่า Bias เริ่มต้นจากการสุ่ม ทำการเรียนรู้ 10 รอบเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด

การจำลองหากระแสฟอลต์โดยใช้ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ โครงสร้างของ ANFIS เลือกใช้โมเดลฟัซซี Sugeno อันดับที่ 1 อินพุตที่ใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ที่บัส คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด มีจำนวนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันอยู่ 3 ใช้เมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็น gaussmf [7] และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid) 100 epochs อันดับที่ 2 อินพุตที่ใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ที่สายส่ง โดยศึกษาที่ตำแหน่งฟอลต์ 25%, 50% และ 75% ของสายส่งคือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, โหลดและตำแหน่งฟอลต์ มีจำนวนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันอยู่ 3 ใช้เมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันเป็น gaussmf [7] และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid) 100 epochs

การจำลองหากระแสฟอลต์ โดยใช้ค่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดเป็นอินพุต และใช้ค่ากระแสฟอลต์ เป็นเอาต์พุต ของกระแสฟอลต์ที่บัส จำนวนข้อมูล 50 ชุด ใช้ข้อมูลฝึกสอน 35 ชุด และข้อมูลทดสอบ 15 ชุด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่บัสของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

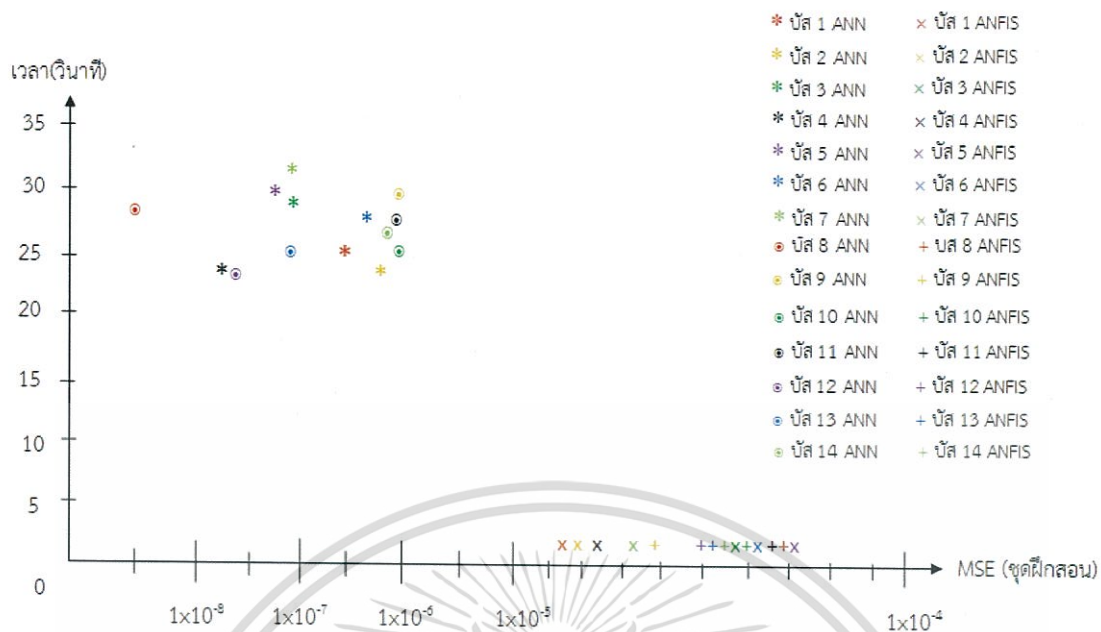
กระแสฟอลต์ที่	ผลการจำลอง	ANN	ANFIS
บัส 1	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	25.328	1.42
	MSE ของชุดฝึกสอน	4.35416×10^{-6}	8.1698×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	2.6162×10^{-7}	1.7926×10^{-3}
บัส 2	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.78	1.6
	MSE ของชุดฝึกสอน	2.22737×10^{-6}	8.5056×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	4.6983×10^{-7}	1.607×10^{-3}
บัส 3	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	29.14	1.55
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.15171×10^{-7}	6.6796×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	8.6206×10^{-8}	2.8686×10^{-3}
บัส 4	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	27.265	1.6
	MSE ของชุดฝึกสอน	8.19445×10^{-7}	7.5275×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.4253×10^{-7}	1.6285×10^{-3}
บัส 5	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	30.594	1.44
	MSE ของชุดฝึกสอน	3.66159×10^{-7}	2.1261×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	2.1689×10^{-7}	3.2011×10^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

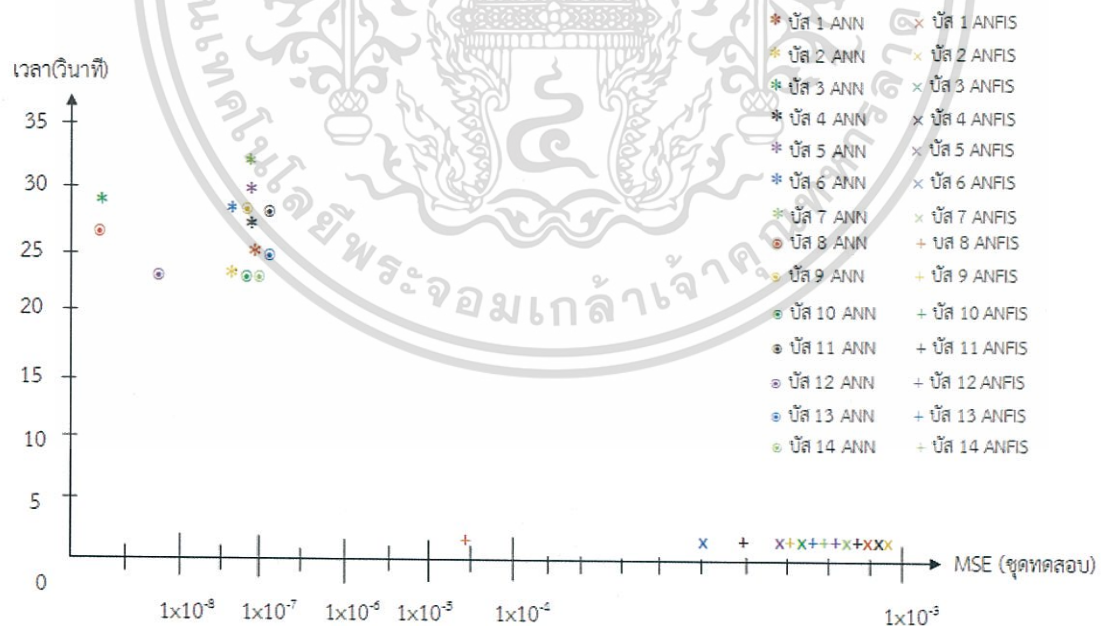
ตารางที่ 7.5 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่บัสของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส (ต่อ)

กระแสฟอลต์ที่	ผลการจำลอง	ANN	ANFIS
บัส 6	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	28.516	1.5
	MSE ของชุดฝึกสอน	3.94553×10^{-6}	3.9861×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	2.8647×10^{-7}	4.9943×10^{-3}
บัส 7	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	31.187	1.42
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.72423×10^{-7}	4.6446×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.7557×10^{-7}	2.1174×10^{-3}
บัส 8	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	27.891	1.42
	MSE ของชุดฝึกสอน	5.71761×10^{-8}	2.416×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	7.7790×10^{-8}	5.6877×10^{-4}
บัส 9	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	28.937	1.41
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.97396×10^{-6}	6.1817×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	2.0245×10^{-7}	2.958×10^{-3}
บัส 10	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.906	1.38
	MSE ของชุดฝึกสอน	2.47364×10^{-6}	4.2132×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	2.6401×10^{-7}	1.8839×10^{-3}
บัส 11	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	27.234	1.5
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.14471×10^{-6}	3.4075×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.6132×10^{-7}	3.9965×10^{-3}
บัส 12	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	23.969	1.48
	MSE ของชุดฝึกสอน	6.23389×10^{-7}	4.8527×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.6988×10^{-8}	2.1263×10^{-3}
บัส 13	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.828	1.4
	MSE ของชุดฝึกสอน	2.24266×10^{-7}	4.6728×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	2.1176×10^{-7}	2.55695×10^{-3}
บัส 14	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	26.703	1.39
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.05540×10^{-6}	4.6685×10^{-4}
	MSE ของชุดทดสอบ	2.0112×10^{-7}	2.483×10^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.9 การแสดงค่า MSE ของชุดฝึกสอนเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที)



รูปที่ 7.10 การแสดงค่า MSE ของชุดทดสอบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองหากระแสฟอลต์ โดยใช้ค่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, โหลดและตำแหน่งฟอลต์ เป็น อินพุต และใช้ค่ากระแสฟอลต์ เป็นเอาต์พุต ของกระแสฟอลต์ที่สายส่งระหว่างบัส โดยศึกษาที่ ตำแหน่งฟอลต์ 25% ,50% และ 75% ของสายส่ง จำนวนข้อมูล 60 ชุด ใช้ข้อมูลฝึกสอน 40 ชุด และข้อมูลทดสอบ 20 ชุด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 7.6

ตารางที่ 7.6 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่สายส่งของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

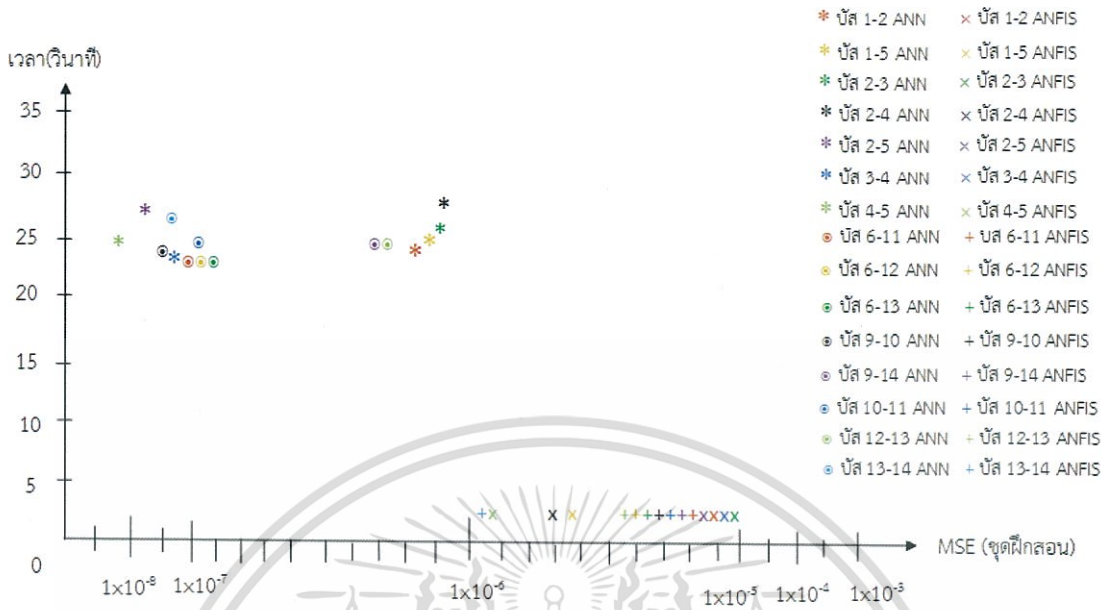
กระแสฟอลต์ที่	ผลการจำลอง	ANN	ANFIS
สายส่งระหว่างบัส 1 ไปยังบัส 2	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.453	1.65
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.8462×10^{-6}	2.8728×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.9171×10^{-6}	1.0299×10^{-5}
สายส่งระหว่างบัส 1 ไปยังบัส 5	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	25.141	1.5
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.6637×10^{-6}	6.1847×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	2.0480×10^{-6}	5.8333×10^{-6}
สายส่งระหว่างบัส 2 ไปยังบัส 3	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	26.374	1.63
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.2681×10^{-6}	2.0645×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.1242×10^{-7}	5.2554×10^{-6}
สายส่งระหว่างบัส 2 ไปยังบัส 4	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	26.454	1.5
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.46416×10^{-6}	6.85557×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	3.7334×10^{-7}	5.5296×10^{-6}
สายส่งระหว่างบัส 2 ไปยังบัส 5	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	27.078	1.5
	MSE ของชุดฝึกสอน	6.8834×10^{-7}	2.9478×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	6.5094×10^{-7}	6.5116×10^{-5}
สายส่งระหว่างบัส 3 ไปยังบัส 4	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.61	1.65
	MSE ของชุดฝึกสอน	2.9031×10^{-7}	2.22×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.5898×10^{-6}	5.3261×10^{-4}
สายส่งระหว่างบัส 4 ไปยังบัส 5	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	25.453	1.6
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.1761×10^{-8}	9.4146×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.5113×10^{-5}	1.1429×10^{-4}
สายส่งระหว่างบัส 6 ไปยังบัส 11	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	23.89	1.57
	MSE ของชุดฝึกสอน	2.5625×10^{-7}	3.3825×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	9.2924×10^{-7}	4.1283×10^{-5}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

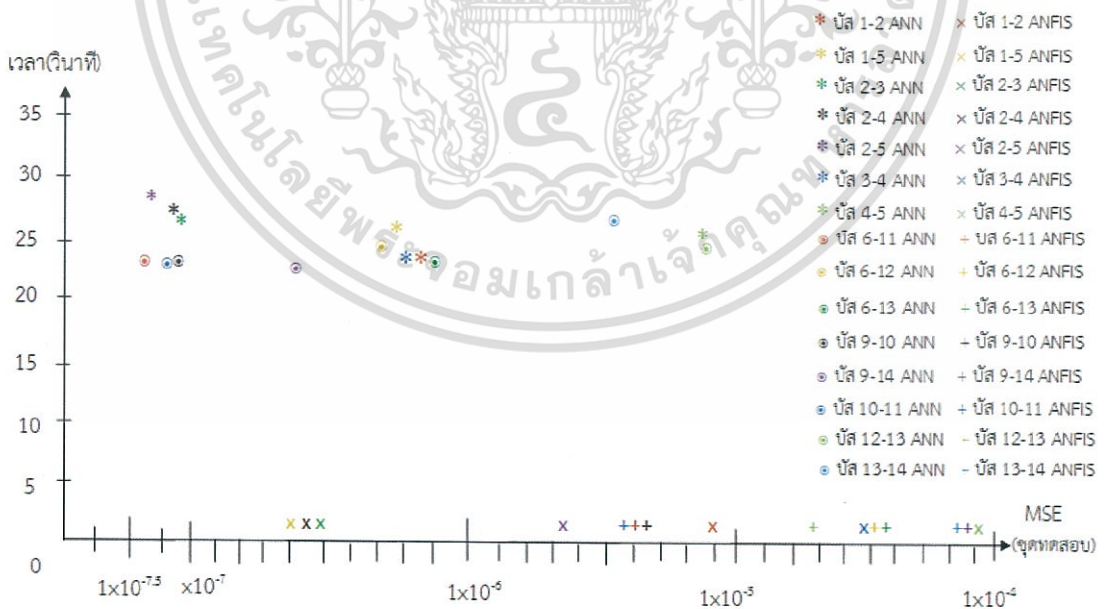
ตารางที่ 7.6 ผลการจำลองกระแสฟอลต์ที่สายส่งของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส (ต่อ)

กระแสฟอลต์ที่	ผลการจำลอง	ANN	ANFIS
สายส่งระหว่างบัส 6 ไปยังบัส 12	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.531	1.62
	MSE ของชุดฝึกสอน	3.6106×10^{-7}	4.1389×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	3.2950×10^{-6}	4.8088×10^{-4}
สายส่งระหว่างบัส 6 ไปยังบัส 13	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.421	1.66
	MSE ของชุดฝึกสอน	2.0389×10^{-7}	3.6646×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.0098×10^{-6}	4.7398×10^{-4}
สายส่งระหว่างบัส 9 ไปยังบัส 10	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.015	1.63
	MSE ของชุดฝึกสอน	4.8990×10^{-7}	3.53×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	2.0808×10^{-7}	3.939×10^{-5}
สายส่งระหว่างบัส 9 ไปยังบัส 14	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	23.437	1.62
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.7389×10^{-6}	3.4008×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	6.0908×10^{-6}	1.1912×10^{-4}
สายส่งระหว่างบัส 10 ไปยังบัส 11	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.202	1.58
	MSE ของชุดฝึกสอน	3.0797×10^{-7}	3.4397×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	4.0574×10^{-7}	4.2608×10^{-5}
สายส่งระหว่างบัส 12 ไปยังบัส 13	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	24.687	1.57
	MSE ของชุดฝึกสอน	1.2686×10^{-6}	4.3005×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	1.3540×10^{-5}	7.0448×10^{-4}
สายส่งระหว่างบัส 13 ไปยังบัส 14	เวลาที่ใช้ในการเรียนรู้(วินาที)	26.077	1.59
	MSE ของชุดฝึกสอน	4.8815×10^{-7}	9.6959×10^{-5}
	MSE ของชุดทดสอบ	4.6201×10^{-5}	1.2664×10^{-4}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.11 การแสดงค่า MSE ของชุดฝึกสอนเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที)



รูปที่ 7.12 การแสดงค่า MSE ของชุดทดสอบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ (วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 7.5 และตารางที่ 7.6 วิธีการที่นำเสนอให้ผลการจำลองดีกว่าโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ในเรื่องเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ แต่ค่า Mean Square Error (MSE) ของข้อมูลชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ดีกว่า การจำลอง 2 วิธี ทั้ง ANN และ ANFIS ใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสเปค CPU intel CORE 2Duo 2.4 GHz, RAM 2.00 GB

การทดสอบจากโปรแกรม PowerWorld ทั้ง 3 ระบบ ถ้าโครงสร้างของระบบมีการเปลี่ยนแปลงใน Single Line Diagram ของโปรแกรม PowerWorld เช่น สายขาด, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด ถูกตัดออก แล้วจะใช้ข้อมูลเก่ามาทำการวิเคราะห์ ANN และ ANFIS สามารถคำนวณได้ แต่คำตอบจะมีค่าผิดพลาดสูง ถ้าต้องการคำนวณหาคำตอบอย่างถูกต้อง ต้องทำการตัดสายหรือตัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่ต้องการก่อน ใน Single Line Diagram ของโปรแกรม PowerWorld จึงจะได้ข้อมูลที่ถูกต้องมาทำการวิเคราะห์หาคำตอบที่ถูกต้อง ใน ANN และ ANFIS



บทที่ 8

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการ ANFIS ซึ่งเป็นการรวมระบบอนุมานฟัซซี และโครงข่ายประสาทเข้าด้วยกัน มีกระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid) ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ใช้สำหรับวิเคราะห์กระแสฟอลต์ที่ใช้ค่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดเป็นอินพุต และได้มีการเปรียบเทียบผลการจำลองวิธีการที่นำเสนอ ANFIS กับวิธีการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งผลที่ได้จากการจำลอง ANFIS ดีกว่าวิธีการที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน แต่ค่า MSE ของกระแสฟอลต์ในข้อมูลชุดฝึกสอน และชุดทดสอบของวิธีการที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมดีกว่า ค่ากระแสฟอลต์ที่ได้จากการประเมินนี้ สามารถนำไปใช้ในส่วนของการออกแบบระบบป้องกันไฟฟ้าได้ เพราะหาค่าตอบของกระแสฟอลต์ในตำแหน่งที่บัสและสายส่งได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว จึงเหมาะสำหรับใช้ในการออกแบบระบบป้องกันไฟฟ้าและการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าให้สามารถตัดกระแสฟอลต์ได้อย่างปลอดภัย

สมมุติฐานสาเหตุที่ค่า MSE ในการวิเคราะห์กระแสฟอลต์ของการใช้โครงข่ายประสาทเทียมดีกว่า ANFIS

- 1) ชุดข้อมูลที่มีจำนวนมากและการกระจายของชุดข้อมูล
- 2) การแบ่งชุดข้อมูล ฝึกสอนและทดสอบ
- 3) การใช้กระบวนการเรียนรู้ที่แตกต่างกัน

8.1 การประยุกต์ใช้ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้

สำหรับการนำระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้มาเป็นเครื่องมือหากระแสฟอลต์จากการทดลองพบว่าระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ ที่ได้รับการฝึกสอนแล้วสามารถหาค่าตอบของกระแสฟอลต์ได้อย่างรวดเร็วกว่าวิธีที่เปรียบเทียบ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าว

8.2 ข้อดีและข้อเสียของการประยุกต์ใช้ระบบอนุमानพีชซีโครงข่ายปรับตัวได้ในการวิเคราะห์หาคะแสฟอลต์

การใช้ระบบอนุमानพีชซีโครงข่ายปรับตัวได้ มาวิเคราะห์กระแสฟอลต์เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์อย่างหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ได้โดยมีข้อดีและข้อเสียดังนี้

- ข้อดี
- 1) สามารถหาคำตอบได้รวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องคำนวณแบบซ้ำๆ
 - 2) ชนิดและจำนวนของเมมเบอร์ชิพมีให้เลือกใช้งานหลายชนิด
 - 3) ไม่จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
 - 4) ถ้าระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น สามารถนำข้อมูลใหม่มาเพิ่มเติมให้

ระบบอนุमानพีชซีโครงข่ายปรับตัวได้ทำการเรียนรู้ได้ โดยไม่จำเป็นต้องลบข้อมูลเก่าออก

ข้อเสีย 1) จำเป็นต้องเตรียมข้อมูลเพื่อทำการฝึกสอนในครั้งแรก

2) ไม่สามารถระบุถึงชนิดและจำนวนของเมมเบอร์ชิพที่ใช้ได้ว่า ต้องใช้ชนิดของเมมเบอร์ชิพแบบไหน และจำนวนของเมมเบอร์ชิพเท่าไร ซึ่งต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก

3) จากการทดลองพบว่าถ้ามีจำนวนอินพุตมากและเลือกจำนวนของเมมเบอร์ชิพมาก ระบบจะทำงานได้ช้ามาก

สิ่งที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไป คือ GUI (Graphical User Interface) ของระบบอนุमानพีชซีโครงข่ายปรับตัวได้เพื่อให้ใช้งานได้สะดวกขึ้น และการปรับปรุงจำนวนของเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันให้สามารถทำงานได้เร็วขึ้นเมื่อมีจำนวนของเมมเบอร์ชิพมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชำนาญ ห่อเกียรติ. (2549). ระบบไฟฟ้ากำลัง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์กรุงเทพฯ.ครั้งที่ 2
- [2] สมชาติ จิรวินากร. (2554). การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมในระบบไฟฟ้ากำลัง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ
- [3] พยุง มีสัจ โครงข่ายประสาทเทียมและระบบฟัซซี่,คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,เอกสารอัดสำเนา
- [4] Jang. J.-S.R.,(May/Jun.1993)“ANFIS: Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System”, *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 23, no. 3, pp. 665 – 685.
- [5] Jang. J.-S.R. and Chuen-Tsai Sun,(Mar.1995)“Neuro-fuzzy modeling and control”, *IEEE Proceedings.*, vol. 83, no. 3, pp. 378-406.
- [6] website:<http://mercedeelectric.com> Dr.Frank Mercede,(July.2010)P.E. Mercedes Electric Company Power Flow Analysis IEEE 14-bus Test System.
- [7] [Online].Available: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/fuzzy/anfis.html>.
- [8] Demuth,H.and Beale,M.Neural Network Toolbox User’s Guide.The Math Works,Inc., March 2011
- [9] Howard Demuth,Mark Beale and Martin Hagan,Neural Network Toolbox 5 User’s Guide,The Math works Inc.,September 2011
- [10] ชัยโย ตระกูลไทยรักษ์. (2555). การหาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมโดยใช้ระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ,เอกสารอัดสำเนา
- [11] [Online].Available: http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/1221/18/18_appendix.pdf.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

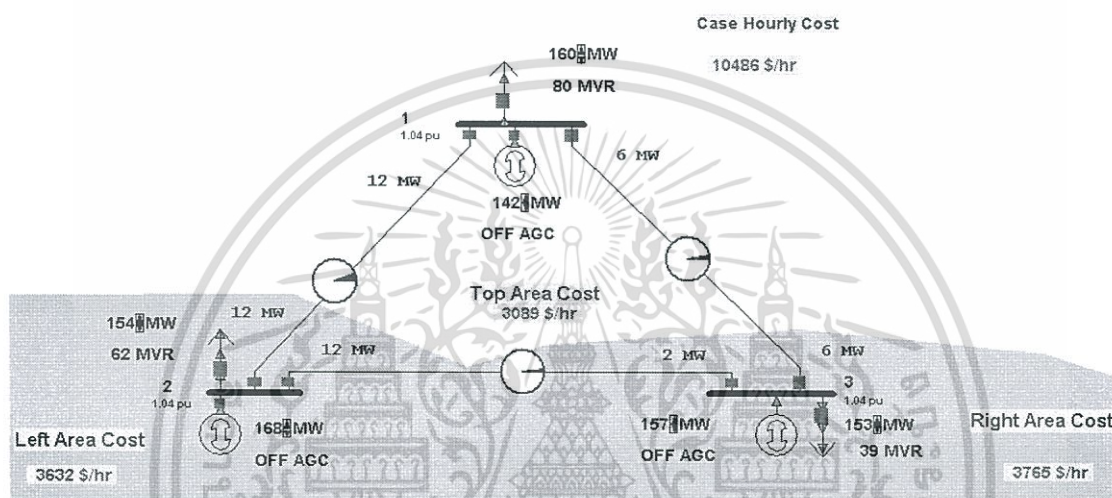


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ทำการศึกษา

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีจำนวน 3 ระบบ คือ ศึกษาที่ระบบขนาดเล็กใช้ระบบไฟฟ้า 3 บัส ดังหัวข้อ ก.1 จากนั้นศึกษาระบบที่ซับซ้อนขึ้นใช้ระบบไฟฟ้า 7 บัส ดังหัวข้อ ก.2 และระบบทดสอบ IEEE 14 บัส ดังหัวข้อ ก.3

ก.1 ระบบไฟฟ้า 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ ก.1.1 ระบบไฟฟ้า 3 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

Fault Analysis

Fault Data | Fault Options

Choose the Faulted Bus
 Sort by Name
 Sort by Number

1 (1) [138 KV]
2 (2) [138 KV]
3 (3) [138 KV]

Fault Location
 Bus Fault
 In-Line Fault

Fault Type
 Single Line-to-Ground
 Line-to-Line
 3 Phase Balanced
 Double Line-to-Ground

Data Type Shown
 Current Units: p.u. Amps
 Online Display: Normal Phase A Phase C
 All Phases Phase B

XF Wye-Delta Phase Shift
 Include in Calculation

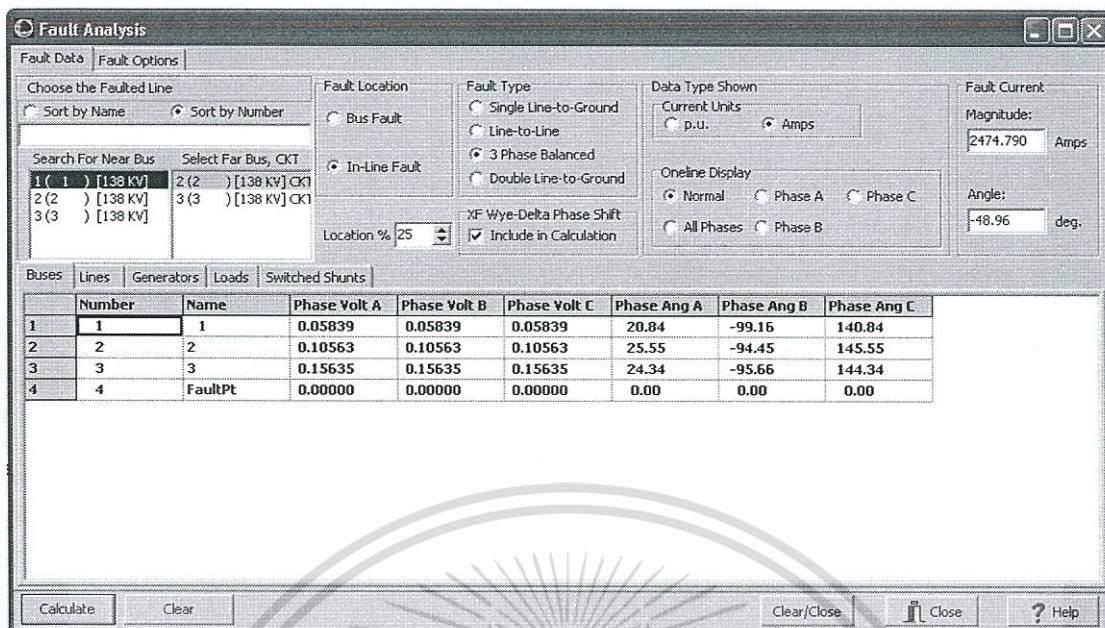
Fault Current
 Magnitude: 2541.040 Amps
 Angle: -48.39 deg.

Buses	Number	Name	Phase Volt A	Phase Volt B	Phase Volt C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
1	1	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00	0.00	0.00
2	2	2	0.12419	0.12419	0.12419	25.64	-94.36	145.64
3	3	3	0.11710	0.11710	0.11710	26.51	-93.49	146.51

Calculate Clear Clear/Close Close Help

รูปที่ ก.1.2 จำลองการทหารกระแสฟอลต์ที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 บัส จากโปรแกรม PowerWorld

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1.3 จำลองการหากระแสฟอลต์ที่สายส่งของระบบไฟฟ้า 3 บัส จากโปรแกรม PowerWorld

ตารางที่ ก.1.1 ข้อมูลที่ได้จากการจำลองหากระแสฟอลต์ที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 บัส จากโปรแกรม PowerWorld

	Total G	Total L	IFB1	IFB2	IFB3
1	140	140	1.48476	1.4401	1.43321
2	155	155	1.532	1.47974	1.47311
3	160	160	1.54557	1.49356	1.4853
4	171	171	1.57571	1.5222	1.51323
5	179	179	1.59979	1.54387	1.53449
6	189	189	1.62932	1.57102	1.56106
7	193	193	1.64087	1.5824	1.57146
8	203	203	1.671	1.61008	1.59852
9	210	210	1.69132	1.62889	1.61755
10	221	221	1.72501	1.66045	1.64764
11	227	227	1.74328	1.67746	1.66423
12	238	238	1.77841	1.70919	1.69527
13	244	244	1.79701	1.72649	1.71212
14	253	253	1.8263	1.75337	1.73764
15	258	258	1.84216	1.76743	1.75212
16	270	270	1.88135	1.80342	1.78646

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับบุคคลที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17	276	276	1.90131	1.82071	1.80416
18	288	288	1.93985	1.85636	1.83886
19	294	294	1.95925	1.87428	1.8563
20	305	305	1.99553	1.90796	1.88825
21	312	312	2.01791	1.92843	1.90895
22	324	324	2.05738	1.9648	1.9443
23	330	330	2.07721	1.98306	1.96204
24	342	342	2.11705	2.01972	1.99765
25	348	348	2.13739	2.03937	2.01495
26	362	362	2.18447	2.08183	2.05707
27	369	369	2.20784	2.10406	2.07768
28	387	387	2.26751	2.15915	2.1319
29	394	394	2.29078	2.18025	2.15326
30	412	412	2.35216	2.23636	2.20762
31	421	421	2.38297	2.26449	2.23486
32	440	440	2.44777	2.32333	2.29278
33	449	449	2.4788	2.35156	2.32011
34	458	458	2.50989	2.37983	2.34745
35	457	467	2.54104	2.40812	2.37481
36	166	166	1.56229	1.50922	1.5006
37	184	184	1.61351	1.55713	1.54739
38	198	198	1.65688	1.59645	1.58527
39	216	216	1.70935	1.6457	1.63395
40	232	232	1.75912	1.69237	1.67806
41	249	249	1.81312	1.74162	1.72614
42	263	263	1.85847	1.78272	1.76626
43	282	282	1.92054	1.8385	1.82148
44	299	299	1.97599	1.88992	1.87071
45	318	318	2.03761	1.94659	1.9266
46	336	336	2.0971	2.00137	1.97983
47	356	356	2.16434	2.06335	2.03914
48	378	378	2.23703	2.13122	2.10484
49	403	403	2.32143	2.20828	2.18042
50	430	430	2.41386	2.29266	2.26212

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1.2 ข้อมูลที่ได้จากการจำลองหากระแสฟลัดที่สายส่งของระบบไฟฟ้า 3 บัส จากโปรแกรม PowerWorld

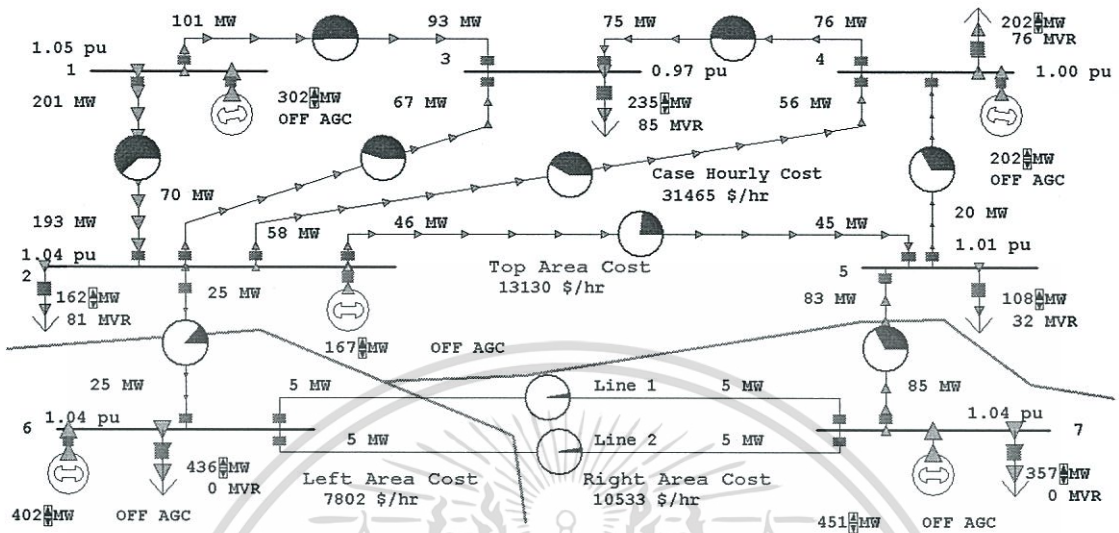
	Total G	Total L	%	IFL1-2	IFL1-3	IFL2-3
1	140	140	0.25	1.46187	1.46012	1.29933
2	140	140	0.5	1.44707	1.44362	1.25744
3	155	155	0.25	1.50638	1.50471	1.33183
4	155	155	0.75	1.48067	1.47575	1.32915
5	160	160	0.5	1.50287	1.49876	1.29799
6	160	160	0.75	1.49422	1.48807	1.33943
7	166	166	0.25	1.53598	1.53382	1.35546
8	166	166	0.5	1.5187	1.51444	1.30984
9	171	171	0.25	1.54906	1.54682	1.36597
10	171	171	0.75	1.52275	1.5161	1.36235
11	179	179	0.5	1.55394	1.54931	1.33608
12	179	179	0.75	1.54463	1.53767	1.37981
13	184	184	0.25	1.5855	1.5806	1.39428
14	184	184	0.5	1.56714	1.56232	1.34605
15	189	189	0.25	1.60055	1.59806	1.4055
16	189	189	0.75	1.5719	1.5645	1.40151
17	193	193	0.5	1.59284	1.58742	1.3648
18	193	193	0.75	1.58313	1.57501	1.41015
19	198	198	0.25	1.62709	1.62429	1.42585
20	198	198	0.5	1.60749	1.60196	1.37536
21	203	203	0.25	1.64085	1.63795	1.4368
22	203	203	0.75	1.61091	1.60233	1.43219
23	210	210	0.5	1.64016	1.63455	1.39986
24	210	210	0.75	1.62977	1.62135	1.44754
25	216	216	0.25	1.67786	1.6749	1.46553
26	216	216	0.5	1.6572	1.65135	1.4124
27	221	221	0.25	1.69301	1.68978	1.47719
28	221	221	0.75	1.6613	1.65178	1.47212
29	227	227	0.5	1.68925	1.68267	1.43574
30	227	227	0.75	1.67832	1.66848	1.48557
31	232	232	0.25	1.72596	1.72235	1.50255
32	232	232	0.5	1.70425	1.69713	1.44652
33	238	238	0.25	1.74427	1.74075	1.51613
34	238	238	0.75	1.7103	1.69994	1.51065
35	244	244	0.5	1.73935	1.73221	1.47206
36	244	244	0.75	1.72759	1.71691	1.52426

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

37	249	249	0.25	1.77777	1.77386	1.54177
38	249	249	0.5	1.75459	1.74688	1.54177
39	253	253	0.25	1.79035	1.78637	1.5511
40	253	253	0.75	1.75456	1.74286	1.54494
41	140	140	0.75	1.3989	1.43474	1.29652
42	155	155	0.5	1.48946	1.48617	1.28803
43	160	160	0.25	1.5198	1.51772	1.34277
44	166	166	0.75	1.50987	1.50348	1.35198
45	171	171	0.5	1.53161	1.52717	1.31962
46	179	179	0.25	1.57212	1.56978	1.38357
47	184	184	0.75	1.55779	1.55056	1.39037
48	189	189	0.5	1.58163	1.5767	1.35653
49	193	193	0.25	1.61187	1.60912	1.41452
50	198	198	0.75	1.59739	1.5891	1.42138
51	203	203	0.5	1.62105	1.61533	1.38554
52	210	210	0.25	1.66044	1.65759	1.45205
53	216	216	0.75	1.6466	1.63786	1.46087
54	221	221	0.5	1.67203	1.66566	1.4231
55	227	227	0.25	1.71064	1.7073	1.49079
56	232	232	0.75	1.69319	1.68255	1.4969
57	238	238	0.5	1.72185	1.71492	1.45928
58	244	244	0.25	1.76221	1.75857	1.52989
59	249	249	0.75	1.74268	1.73117	1.53569
60	253	253	0.5	1.76674	1.7589	1.54494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ระบบไฟฟ้า 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ ก.2.1 ระบบไฟฟ้า 7 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

Fault Analysis

Fault Data | Fault Options

Choose the Faulted Bus

Sort by Name | Sort by Number

1 (1) [138 KV]
2 (2) [138 KV]
3 (3) [138 KV]
4 (4) [138 KV]
5 (5) [138 KV]
6 (6) [138 KV]

Fault Location

Bus Fault
 In-Line Fault

Fault Type

Single Line-to-Ground
 Line-to-Line
 3 Phase Balanced
 Double Line-to-Ground
 X/F Wye-Delta Phase Shift
 Include in Calculation

Data Type Shown

Current Units: p.u. Amps

Online Display: Normal Phase A Phase C
 All Phases Phase B

Fault Current

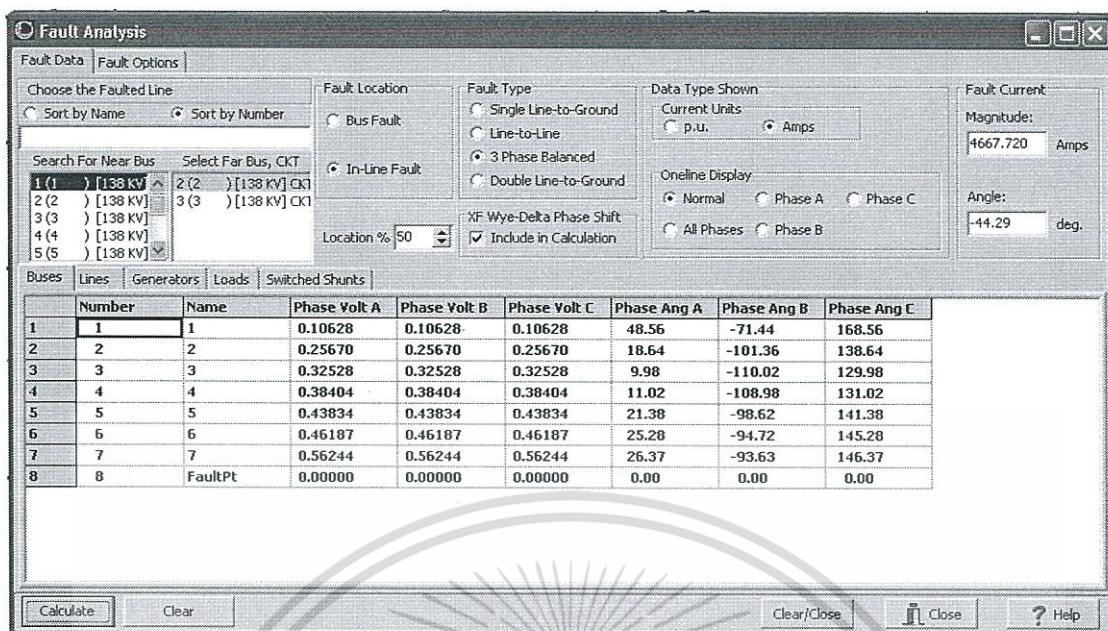
Magnitude: 4089.140 Amps
Angle: -45.78 deg.

Buses	Number	Name	Phase Volt A	Phase Volt B	Phase Volt C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
1	1	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00	0.00	0.00
2	2	2	0.38892	0.38892	0.38892	13.76	-106.24	133.76
3	3	3	0.38207	0.38207	0.38207	4.82	-115.18	124.82
4	4	4	0.44912	0.44912	0.44912	6.79	-113.21	126.79
5	5	5	0.52514	0.52514	0.52514	15.72	-104.28	135.72
6	6	6	0.55560	0.55560	0.55560	19.02	-100.98	139.02
7	7	7	0.63509	0.63509	0.63509	20.66	-99.34	140.66

Calculate | Clear | Clear/Close | Close | Help

รูปที่ ก.2.2 จำลองการหากระแสฟอลต์ที่บัสของระบบไฟฟ้า 7 บัส จากโปรแกรม PowerWorld

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2.3 จำลองการหารกระแสฟอลต์ที่สายส่งของระบบไฟฟ้า 7 บัส จากโปรแกรม PowerWorld

ตารางที่ ก.2.1 ข้อมูลที่ได้จากการจำลองหารกระแสฟอลต์ที่บัสของระบบไฟฟ้า 7 บัส จากโปรแกรม PowerWorld

	Total G	Total L	IFB1	IFB2	IFB3	IFB4	IFB5	IFB6	IFB7
1	2139	2088	4.76396	7.45207	5.52	5.9786	5.49113	6.14306	5.52579
2	2126	2076	4.7523	7.41983	5.49872	5.95398	5.47224	6.12263	5.50704
3	2113	2064	4.74057	7.38754	5.47841	5.92931	5.45328	6.10213	5.48823
4	2088	2040	4.71687	7.32274	5.4376	5.87983	5.41512	6.06086	5.45043
5	2075	2028	4.70491	7.29023	5.41711	5.85502	5.39594	6.04011	5.43144
6	2050	2004	4.68074	7.22501	5.37592	5.80527	5.35734	5.99834	5.39327
7	2037	1992	4.66853	7.19229	5.35522	5.78031	5.33792	5.97732	5.3741
8	2012	1968	4.64387	7.12665	5.31364	5.73026	5.29886	5.93504	5.33556
9	1999	1956	4.63142	7.09372	5.29275	5.70516	5.27922	5.91376	5.3162
10	1974	1932	4.60627	7.02764	5.25078	5.65482	5.23969	5.87095	5.27728
11	1962	1920	4.59356	6.9945	5.22969	5.62956	5.21981	5.8494	5.25773
12	1936	1896	4.5679	6.928	5.1873	5.57891	5.17982	5.80605	5.21841
13	1924	1884	4.55493	6.89464	5.166	5.55351	5.1597	5.78423	5.19866
14	1899	1860	4.52874	6.82772	5.12321	5.50254	5.11922	5.74033	5.15894
15	1886	1848	4.51551	6.79414	5.1017	5.47698	5.09886	5.71823	5.13898
16	1861	1824	4.48877	6.72678	5.05848	5.42569	5.0579	5.67377	5.09884
17	1848	1812	4.47527	6.693	5.03676	5.39996	5.03729	5.65139	5.07867

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18	1823	1788	4.44798	6.6252	4.99311	5.34835	4.99584	5.60635	5.0381
19	1811	1776	4.43419	6.5912	4.97118	5.32246	4.97498	5.58369	5.01771
20	1786	1752	4.40633	6.52298	4.92709	5.27051	4.93302	5.53806	4.97671
21	1773	1740	4.39226	6.48876	4.90493	5.24445	4.91191	5.51511	4.95609
22	1748	1716	4.36382	6.4201	4.8604	5.19216	4.86944	5.46889	4.91464
23	1736	1704	4.34945	6.38566	4.83802	5.16593	4.84808	5.44563	4.8938
24	1711	1680	4.32041	6.31658	4.79303	5.11329	4.80509	5.39881	4.85188
25	1698	1668	4.30574	6.28192	4.77042	5.08689	4.78347	5.37525	4.8308
26	1673	1644	4.27608	6.2124	4.72497	5.0339	4.73995	5.32782	4.78841
27	1661	1632	4.2611	6.17753	4.70213	5.00731	4.71807	5.30395	4.76709
28	1636	1608	4.23081	6.10758	4.65622	4.95396	4.67402	5.25589	4.72421
29	1623	1596	4.21551	6.0725	4.63314	4.92719	4.65187	5.2317	4.70265
30	1598	1572	4.18458	6.00212	4.58675	4.87348	4.60729	5.18301	4.65927
31	1586	1560	4.16895	5.96682	4.56344	4.84653	4.58486	5.1585	4.63745
32	1561	1536	4.13736	5.89601	4.51656	4.79244	4.53973	5.10916	4.59356
33	1549	1524	4.1214	5.8605	4.49301	4.7653	4.51703	5.08433	4.57148
34	1536	1512	4.10532	5.82491	4.46937	4.7381	4.49424	5.05939	4.54932
35	1524	1500	4.08913	5.78926	4.44565	4.71084	4.47135	5.03433	4.52707
36	2101	2052	4.72876	7.35517	5.45804	5.90459	5.43424	6.08154	5.46936
37	2063	2016	4.69286	7.25765	5.39654	5.83017	5.37667	6.01927	5.41238
38	2025	1980	4.65624	7.1595	5.33447	5.75531	5.31843	5.95622	5.35486
39	1987	1944	4.61889	7.06072	5.2718	5.68001	5.25949	5.8924	5.29678
40	1949	1908	4.58077	6.96129	5.20853	5.60426	5.19985	5.82777	5.2381
41	1911	1872	4.54188	6.86122	5.14464	5.52805	5.1395	5.76232	5.17883
42	1873	1836	4.50218	6.7605	5.08013	5.45136	5.07842	5.69605	5.11894
43	1836	1800	4.46167	6.6567	5.01497	5.37418	5.01661	5.62892	5.05842
44	1798	1764	4.42031	6.55713	4.94917	5.29651	4.95404	5.56092	4.99725
45	1763	1728	4.37809	6.45447	4.8827	5.21833	4.89072	5.49205	4.9354
46	1723	1692	4.33498	6.35116	4.81556	5.13964	4.82663	5.42227	4.87288
47	1686	1656	4.29096	6.2472	4.74774	5.06042	4.76175	5.35159	4.80964
48	1648	1620	4.24601	6.14259	4.67922	4.98067	4.69609	5.27997	4.74569
49	1611	1584	4.2001	6.03734	4.60999	4.90037	4.62962	5.20741	4.681
50	1573	1548	4.15322	5.93145	4.54004	4.81951	4.56234	5.13388	4.61555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2.2 ข้อมูลที่ได้จากการจำลองหากระแสฟลัดที่สายส่งของระบบไฟฟ้า 7 บัส จากโปรแกรม PowerWorld

	Total G	Total L	%	IFL1-2	IFL1-3	IFL2-3	IFL2-4	IFL2-5	IFL2-6
1	2139	2088	0.25	5.11365	3.63349	5.08639	5.18042	5.89479	6.82808
2	2139	2088	0.5	5.62333	3.40144	4.38735	4.54654	5.25788	6.4422
3	2126	2076	0.25	5.09991	3.62704	5.07179	5.16496	5.87472	6.80168
4	2126	2076	0.75	6.34162	3.80977	4.47621	4.72568	5.13201	6.20685
5	2113	2064	0.5	5.589	3.39003	4.36557	4.52198	5.2257	6.39604
6	2113	2064	0.75	6.31882	3.80167	4.4641	4.71136	5.1161	6.18554
7	2101	2052	0.25	5.07219	3.61395	5.04232	5.13379	5.8343	6.74862
8	2101	2052	0.5	5.5717	3.38423	4.35457	4.50959	5.20948	6.37282
9	2088	2040	0.25	5.05819	3.60731	5.02745	5.11808	5.81395	6.72196
10	2088	2040	0.75	6.27293	3.78526	4.43966	4.6825	5.08405	6.14265
11	2075	2028	0.5	5.53682	3.37246	4.33232	4.48457	5.17678	6.32612
12	2075	2028	0.75	6.24985	3.77695	4.42731	4.66797	5.0679	6.12108
13	2063	2016	0.25	5.02995	3.59385	4.99745	5.08639	5.77299	6.66839
14	2063	2016	0.5	5.51924	3.36647	4.32107	4.47194	5.1603	6.30264
15	2050	2004	0.25	5.0157	3.58702	4.98231	5.07041	5.75237	6.64147
16	2050	2004	0.75	6.20342	3.76011	4.40239	4.63868	5.03534	6.07766
17	2037	1992	0.5	5.4838	3.35432	4.29833	4.44646	5.12706	6.2554
18	2037	1992	0.75	6.18006	3.75158	4.38981	4.62393	5.01894	6.05582
19	2025	1980	0.25	4.98694	3.57317	4.95176	5.03819	5.71085	6.58739
20	2025	1980	0.5	5.46595	3.34815	4.28684	4.4336	5.11031	6.23165
21	2012	1968	0.25	4.97243	3.56615	4.93635	5.02194	5.68996	6.56021
22	2012	1968	0.75	6.13307	3.73462	4.36441	4.5942	4.98587	6.01187
23	1999	1956	0.5	5.42994	3.33562	4.2636	4.40765	5.07653	6.18387
24	1999	1956	0.75	6.10943	3.72586	4.35159	4.57922	4.96921	5.98976
25	1987	1944	0.25	4.94313	3.5519	4.90525	4.98918	5.64788	6.50559
26	1987	1944	0.5	5.4118	3.32925	4.25185	4.39455	5.0595	6.15984
27	1974	1932	0.25	4.92834	3.54467	4.88955	4.97267	5.6267	6.47816
28	1974	1932	0.75	6.06188	3.70813	4.3257	4.54904	4.93563	5.94526
29	1962	1920	0.5	5.37522	3.31632	4.2281	4.3681	5.02517	6.11151
30	1962	1920	0.75	6.03796	3.69915	4.31263	4.53384	4.91871	5.92288

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

31	1949	1908	0.25	4.89849	3.53002	4.85788	4.93936	5.58406	6.42301
32	1949	1908	0.5	5.35679	3.30975	4.2161	4.35376	5.00786	6.0872
33	1936	1896	0.25	4.88343	3.52259	4.8419	4.92256	5.56259	6.39531
34	1936	1896	0.75	5.98983	3.68097	4.28624	4.50319	4.88459	5.87783
35	1924	1884	0.5	5.31962	3.29641	4.19183	4.32781	4.97297	6.0383
36	1924	1884	0.75	5.96562	3.67176	4.27291	4.48775	4.8674	5.85516
37	1911	1872	0.25	4.85302	3.50764	4.80966	4.88869	5.51938	6.33963
38	1911	1872	0.5	5.30089	3.28964	4.17956	4.31422	4.95539	6.01371
39	1899	1860	0.25	4.83767	3.49999	4.79339	4.87162	5.49762	6.31166
40	1899	1860	0.75	5.91691	3.65311	4.24601	4.45664	4.83276	5.80955
41	2139	2088	0.75	6.36434	3.8178	4.48824	4.73993	5.14783	6.22808
42	2126	2076	0.5	5.60621	3.39576	4.3765	4.5343	5.24184	6.41916
43	2113	2064	0.25	5.08609	3.62052	5.0571	5.14942	5.85455	6.77519
44	2101	2052	0.75	6.29592	3.7935	4.45192	4.69697	5.10012	6.16414
45	2088	2040	0.5	5.5543	3.37838	4.3448	4.49712	5.19318	6.34952
46	2075	2028	0.25	5.04412	3.60061	5.0125	5.10227	5.7352	6.69522
47	2063	2016	0.75	6.22668	3.76856	4.41489	4.65336	5.05166	6.09941
48	2050	2004	0.5	5.50157	3.36043	4.30974	4.45924	5.14372	6.27907
49	2037	1992	0.25	5.00137	3.58013	4.96709	5.05434	5.73166	6.61447
50	2025	1980	0.75	6.15661	3.7433	4.37715	4.6091	5.00245	6.23165
51	2012	1968	0.5	5.44799	3.34192	4.27526	4.42066	5.09346	6.20781
52	1999	1956	0.25	4.95782	3.55906	4.92082	5.00561	5.66897	6.53295
53	1987	1944	0.75	6.0857	3.71704	4.33869	4.56417	4.95246	5.96756
54	1974	1932	0.5	5.39356	3.32282	4.24002	4.38136	5.04238	6.13572
55	1962	1920	0.25	4.91346	3.53738	4.87377	4.95606	5.60543	6.45063
56	1949	1908	0.75	6.01394	3.6901	4.29947	4.51855	4.90169	5.9004
57	1936	1896	0.5	5.33826	3.30311	4.20401	4.34133	4.99047	6.0628
58	1924	1884	0.25	4.86827	3.51508	4.82583	4.90568	5.54103	6.36751
59	1911	1872	0.75	5.94131	3.66247	4.2595	4.47224	4.85013	5.83224
60	1899	1860	0.5	5.28206	3.28279	4.1672	4.30054	4.93771	5.98903

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2.2 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้จากการจำลองหากระแสฟอลต์ที่สายส่งของระบบไฟฟ้า 7 บัส จากโปรแกรม PowerWorld

	Total G	Total L	%	IFL3-4	IFL4-5	IFL5-7	IFL6-7(L1)	IFL6-7(L2)
1	2139	2088	0.25	5.57868	4.20194	5.35494	4.27894	4.27894
2	2139	2088	0.5	5.67321	3.77103	5.32109	3.81774	3.81774
3	2126	2076	0.25	5.55779	4.19096	5.33726	4.26915	4.26915
4	2126	2076	0.75	5.78225	4.06725	5.36204	4.108225	4.10825
5	2113	2064	0.5	5.62956	3.75471	5.28635	3.80179	3.80179
6	2113	2064	0.75	5.75917	4.05766	5.34426	4.09841	4.09841
7	2101	2052	0.25	5.51585	4.1688	5.30168	4.24937	4.24937
8	2101	2052	0.5	5.60765	3.74645	5.26887	3.79373	3.79373
9	2088	2040	0.25	5.49479	4.15761	5.28378	4.23938	4.23938
10	2088	2040	0.75	5.71285	4.03825	5.30848	4.07855	4.07855
11	2075	2028	0.5	5.56366	3.72972	5.23371	3.77744	3.77744
12	2075	2028	0.75	5.68962	4.02843	5.29049	4.06853	4.06853
13	2063	2016	0.25	5.45249	4.13502	5.24775	4.2192	4.2192
14	2063	2016	0.5	5.54158	3.72125	5.21601	3.76921	3.76921
15	2050	2004	0.25	5.43124	4.12362	5.22962	4.20901	4.20901
16	2050	2004	0.75	5.64298	4.00857	5.25432	4.04831	4.04831
17	2037	1992	0.5	5.49725	3.70409	5.18041	3.75257	3.75257
18	2037	1992	0.75	5.61959	3.99852	5.23612	4.03812	4.03812
19	2025	1980	0.25	5.38857	4.1006	5.19313	4.18843	4.18843
20	2025	1980	0.5	5.47499	3.6954	5.16249	3.74416	3.74414
21	2012	1968	0.25	5.35187	4.08898	5.17477	4.17803	4.17803
22	2012	1968	0.75	5.57263	3.97818	5.19953	4.01754	4.01754
23	1999	1956	0.5	5.4303	3.67781	5.12644	3.72717	3.72717
24	1999	1956	0.75	5.54907	3.9679	5.18113	4.00715	4.00715
25	1987	1944	0.25	5.32408	4.06552	5.13782	4.15703	4.15703
26	1987	1944	0.5	5.40787	3.6689	5.1083	3.71858	3.71858
27	1974	1932	0.25	5.30246	4.05367	5.11923	4.14643	4.14643
28	1974	1932	0.75	5.50178	3.94708	5.14412	3.98619	3.98619
29	1962	1920	0.5	5.36282	3.65087	5.07179	3.70122	3.70122
30	1962	1920	0.75	5.47805	3.93656	5.1255	3.97562	3.97562

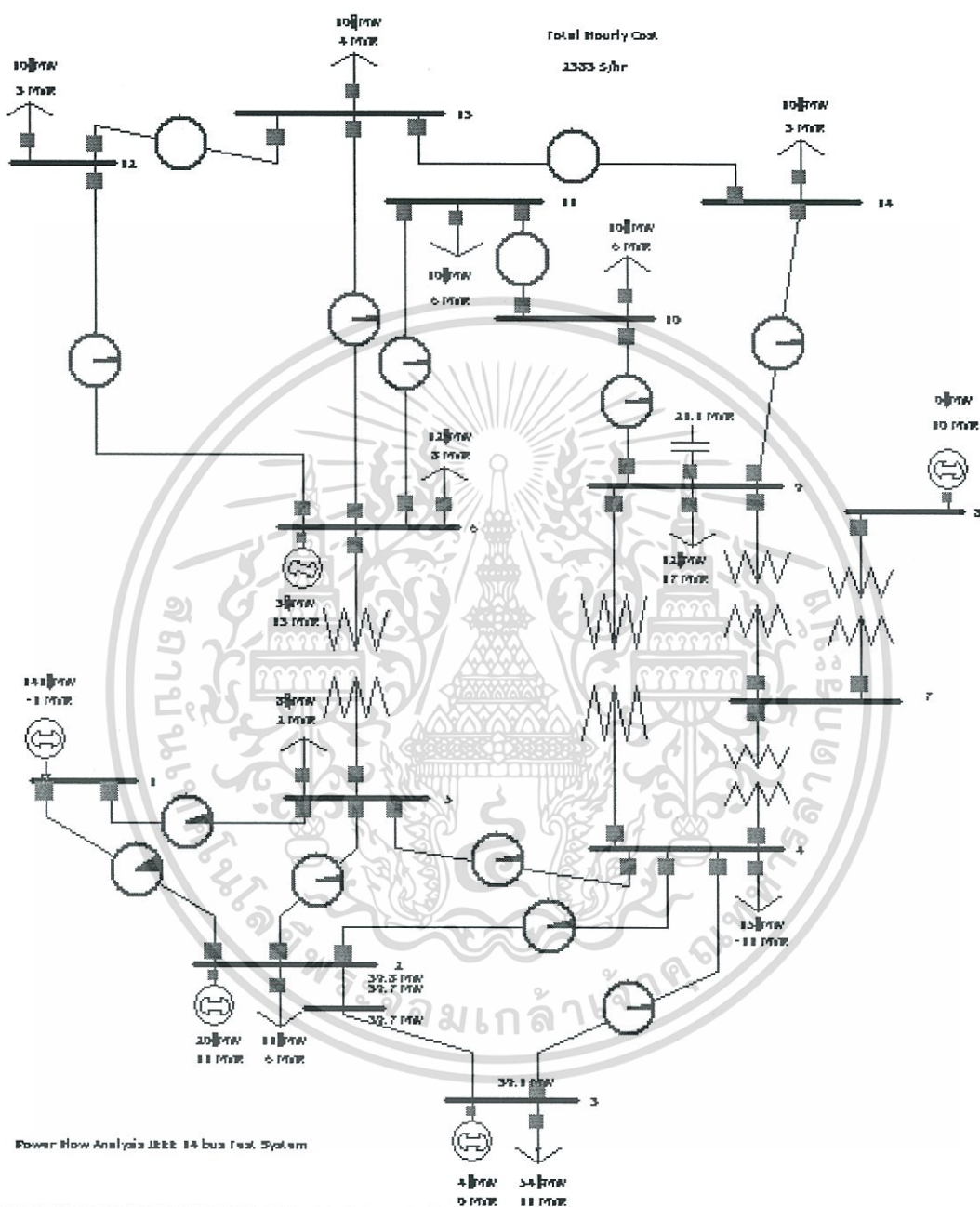
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

31	1949	1908	0.25	5.25902	4.02976	5.0818	4.12499	4.12499
32	1949	1908	0.5	5.3402	3.64174	5.05341	3.69245	3.69245
33	1936	1896	0.25	5.2372	4.01768	5.06296	4.11417	4.11417
34	1936	1896	0.75	5.43042	3.91525	5.08805	3.95427	3.95427
35	1924	1884	0.5	5.29478	3.62324	5.01644	3.67471	3.67471
36	1924	1884	0.75	5.40651	3.90448	5.06822	3.9435	3.9435
37	1911	1872	0.25	5.19337	3.9931	5.02505	4.09229	4.09229
38	1911	1872	0.5	5.27197	3.61388	4.99783	3.66574	3.66574
39	1899	1860	0.25	5.17135	3.981	5.00598	4.08124	4.08124
40	1899	1860	0.75	5.35854	3.88267	5.03132	3.92175	3.92175
41	2139	2088	0.75	5.80527	4.07676	5.37977	4.11803	4.11803
42	2126	2076	0.5	5.65141	3.76291	5.30375	3.80979	3.80979
43	2113	2064	0.25	5.53685	4.17991	5.3151	4.25929	4.25929
44	2101	2052	0.75	5.73604	4.04799	5.3264	4.08851	4.08851
45	2088	2040	0.5	5.58568	3.73812	5.25133	3.78561	3.78561
46	2075	2028	0.25	5.47367	4.14635	5.2658	4.22932	4.22932
47	2063	2016	0.75	5.66633	4.01854	5.27244	4.05845	4.05845
48	2050	2004	0.5	5.51944	3.7127	5.19825	3.76092	3.76092
49	2037	1992	0.25	5.40994	4.11215	5.21142	4.19875	4.19875
50	2025	1980	0.75	5.59614	3.98839	5.21786	4.02786	4.02786
51	2012	1968	0.5	5.45268	3.68664	5.1445	3.7357	3.7357
52	1999	1956	0.25	5.34564	4.07729	5.15634	4.16757	4.16757
53	1987	1944	0.75	5.52545	3.95753	5.16266	3.99671	3.99671
54	1974	1932	0.5	5.38537	3.65992	5.09008	3.70993	3.7099
55	1962	1920	0.25	5.28077	4.04175	5.10055	4.13575	4.13575
56	1949	1908	0.75	5.45426	3.92595	5.10681	3.96498	3.96498
57	1936	1896	0.5	5.31752	3.63253	5.03497	3.68361	3.68361
58	1924	1884	0.25	5.21532	4.00553	5.04405	4.10327	4.10327
59	1911	1872	0.75	5.38255	3.89362	5.05031	3.93266	3.93266
60	1899	1860	0.5	5.2491	3.60444	4.97915	3.6567	3.6567

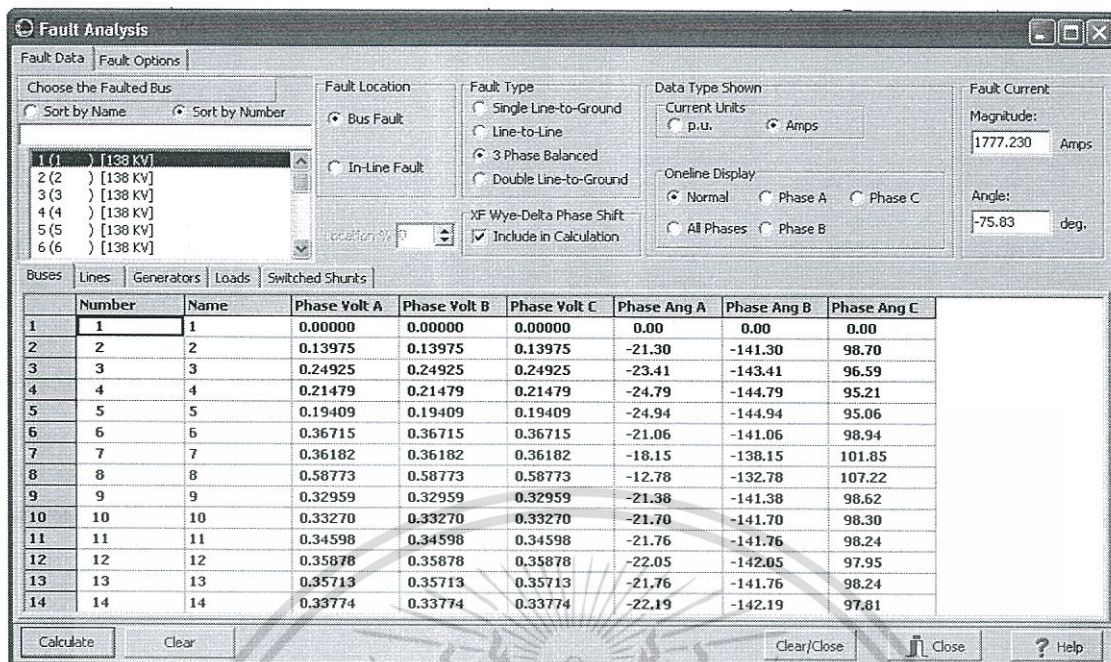
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

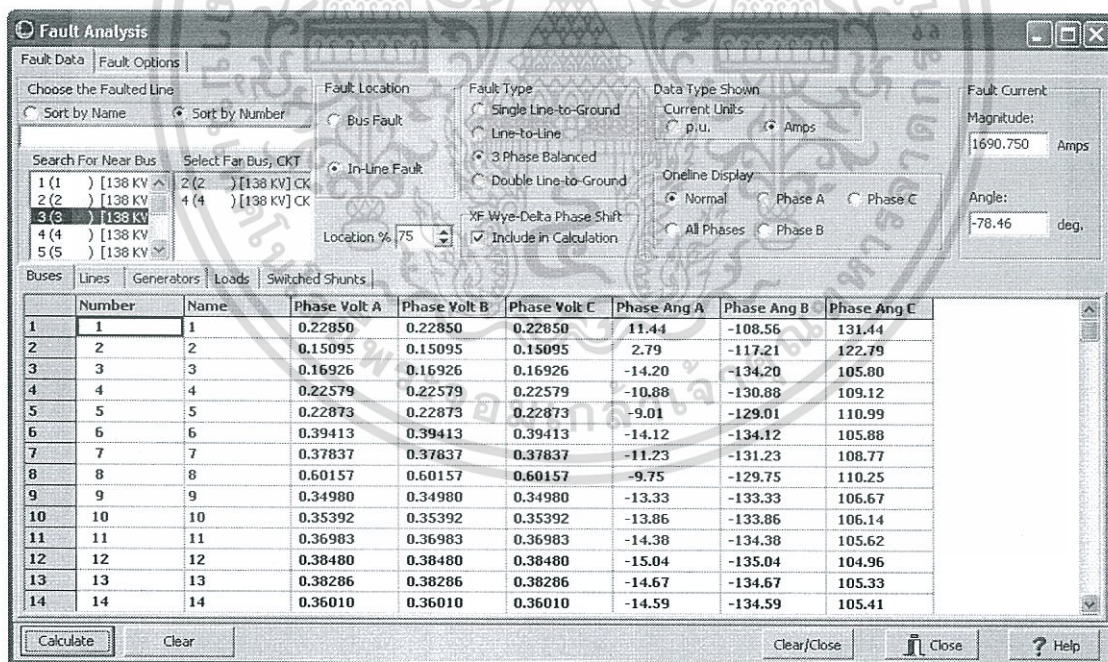


รูปที่ ก.3.1 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3.2 จำลองการหากระแสฟอลต์ที่บัสของระบบ IEEE 14 บัส จากโปรแกรม PowerWorld



รูปที่ ก.3.3 จำลองการหากระแสฟอลต์ที่สายส่งของระบบ IEEE 14 บัส จากโปรแกรม PowerWorld

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3.1 ข้อมูลของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบของบัส

	Total G	Total L	IFB1	IFB2	IFB3	IFB4	IFB5	IFB6	IFB7
1	456	432	2.50	2.67128	2.24548	2.55665	2.539	1.83436	1.50421
2	446	425	2.41655	2.59739	2.10046	2.49431	2.4747	1.81709	1.52079
3	440	420	2.38796	2.56953	2.08785	2.46936	2.44959	1.80708	1.52111
4	428	410	2.3272	2.51168	2.06241	2.41927	2.39844	1.78987	1.52721
5	421	403	2.29972	2.48431	2.04883	2.3944	2.3733	1.77953	1.52593
6	411	393	2.26237	2.44708	2.02967	2.36025	2.3394	1.76569	1.52279
7	405	389	2.2466	2.43131	2.0216	2.34632	2.32514	1.75852	1.5212
8	397	381	2.21819	2.40307	2.00662	2.32102	2.29975	1.74794	1.51855
9	391	376	2.20124	2.38569	1.9972	2.30477	2.28364	1.74054	1.51558
10	384	369	2.17698	2.36173	1.98349	2.28255	2.26174	1.72987	1.51061
11	379	365	2.16601	2.35065	1.97708	2.27201	2.25151	1.72495	1.50795
12	371	357	2.14351	2.32684	1.96286	2.25056	2.23004	1.71463	1.50186
13	368	352	2.13151	2.3147	1.95581	2.23839	2.21812	1.70852	1.49773
14	356	343	2.10733	2.28833	1.93688	2.21268	2.19354	1.69617	1.49056
15	350	337	2.09273	2.27171	1.92367	2.19637	2.17811	1.68845	1.48513
16	340	327	2.07062	2.24611	1.90302	2.1707	2.15404	1.67697	1.47678
17	335	323	2.06291	2.2372	1.89513	2.16131	2.14535	1.67239	1.47311
18	325	313	2.042	2.21315	1.87526	2.13685	2.12237	1.66013	1.4641
19	321	309	2.03461	2.20463	1.86774	2.12754	2.1135	1.65445	1.46045
20	311	300	2.01591	2.18314	1.84977	2.1061	2.0933	1.64348	1.45193
21	306	295	2.00545	2.17092	1.83997	2.0987	2.08184	1.63771	1.44683
22	294	283	1.98127	2.14303	1.81788	2.06548	2.05499	1.62257	1.43542
23	290	279	1.97446	2.13508	1.81081	2.05699	2.04715	1.61818	1.43134
24	280	270	1.95879	2.11707	1.79519	2.03824	2.0294	1.60773	1.42277
25	275	265	1.94962	2.10522	1.78631	2.02636	2.01804	1.60135	1.41737
26	266	256	1.93441	2.08617	1.7713	2.00691	1.99972	1.59046	1.40796
27	260	250	1.92419	2.07335	1.76187	1.99457	1.98769	1.58325	1.40214
28	251	241	1.91068	2.05678	1.74798	1.9786	1.97277	1.57461	1.39401
29	246	236	1.90178	2.04551	1.73956	1.96841	1.96312	1.56929	1.38899
30	228	219	1.87126	2.00857	1.71061	1.93378	1.92939	1.54873	1.373
31	218	210	1.85318	1.98642	1.69481	1.91471	1.91075	1.53646	1.36411
32	198	191	1.82344	1.94936	1.66363	1.87964	1.87643	1.50728	1.34658
33	187	181	1.80598	1.92754	1.64751	1.85959	1.85723	1.49358	1.3368

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

34	177	171	1.7899	1.90792	1.63485	1.84096	1.83881	1.4785	1.32687
35	168	161	1.77722	1.8924	1.62549	1.82695	1.82437	1.46514	1.31971
36	434	416	2.35593	2.53054	2.07477	2.44365	2.42293	1.79912	1.52672
37	414	397	2.27831	2.46258	2.03701	2.37479	2.35369	1.77215	1.52504
38	402	385	2.23102	2.41609	2.01371	2.33253	2.31115	1.75249	1.51932
39	387	372	2.18763	2.37224	1.98988	2.29226	2.27133	1.73472	1.51305
40	375	361	2.15487	2.33888	1.97027	2.261	2.2406	1.71951	1.50478
41	361	348	2.11855	2.3013	1.9473	2.22529	2.20548	1.7021	1.4941
42	346	333	2.08476	2.26235	1.9159	2.18705	2.1694	1.68444	1.48244
43	330	318	2.05197	2.22478	1.88462	2.14828	2.13316	1.66585	1.46818
44	315	304	2.02323	2.19155	1.85729	2.11473	2.10131	1.64791	1.45595
45	299	288	1.99076	2.15416	1.82685	2.07704	2.06578	1.6284	1.44036
46	284	274	1.96582	2.12517	1.80235	2.04674	2.03734	1.61258	1.42664
47	270	260	1.94071	2.09391	1.7779	2.01505	2.00742	1.5953	1.41217
48	255	246	1.91708	2.06461	1.75459	1.9863	1.97996	1.57897	1.39784
49	238	228	1.88687	2.02749	1.72594	1.95117	1.94624	1.55868	1.38068
50	208	203	1.83723	1.96671	1.67947	1.89606	1.89242	1.5205	1.35463

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3.1 (ต่อ) ข้อมูลของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ
ของบัส

	Total G	Total L	IFB8	IFB9	IFB10	IFB11	IFB12	IFB13	IFB14
1	456	432	1.15425	1.54779	1.33834	1.23871	1.00556	1.32328	0.996577
2	446	425	1.14055	1.54383	1.3382	1.25246	1.02466	1.33196	1.01537
3	440	420	1.13565	1.53783	1.33676	1.2533	1.02831	1.32999	1.01747
4	428	410	1.12533	1.52533	1.33662	1.25718	1.03937	1.33156	1.02804
5	421	403	1.12067	1.52377	1.33368	1.25613	1.04008	1.32898	1.02832
6	411	393	1.11386	1.51361	1.32914	1.2547	1.04196	1.32497	1.02914
7	405	389	1.11148	1.51012	1.32753	1.25393	1.04276	1.32247	1.02984
8	397	381	1.10681	1.50343	1.32419	1.25163	1.0437	1.31927	1.03113
9	391	376	1.10383	1.49765	1.32016	1.24962	1.04385	1.31612	1.03103
10	384	369	1.09923	1.489.88	1.31628	1.24798	1.04554	1.31341	1.02969
11	379	365	1.09702	1.48577	1.31389	1.24564	1.04564	1.311	1.02938
12	371	357	1.09326	1.47737	1.3086	1.24299	1.04458	1.30585	1.02686
13	368	352	1.09042	1.47095	1.30398	1.24054	1.04429	1.30334	1.02514
14	356	343	1.08563	1.46053	1.29714	1.23518	1.04256	1.29761	1.02332
15	350	337	1.08264	1.45307	1.29158	1.23181	1.0416	1.29355	1.02175
16	340	327	1.07818	1.44119	1.28288	1.22605	1.03938	1.28781	1.01767
17	335	323	1.07634	1.43644	1.2797	1.22384	1.03852	1.28541	1.01548
18	325	313	1.07187	1.42489	1.27118	1.21816	1.03563	1.27885	1.01238
19	321	309	1.07027	1.42059	1.26813	1.21573	1.03441	1.2762	1.01097
20	311	300	1.06638	1.41064	1.26112	1.20988	1.03242	1.27018	1.00726
21	306	295	1.06415	1.40432	1.25608	1.2066	1.03104	1.26719	1.00535
22	294	283	1.05926	1.39096	1.24668	1.1996	1.02724	1.25889	1.00019
23	290	279	1.05754	1.38629	1.24344	1.19725	1.02617	1.25641	0.997853
24	280	270	1.054	1.37712	1.23695	1.19239	1.02399	1.25071	0.994828
25	275	265	1.05191	1.37108	1.23244	1.18827	1.02247	1.24727	0.991956
26	266	256	1.0485	1.36084	1.22493	1.18235	1.0191	1.24036	0.987109
27	260	250	1.04649	1.35484	1.2204	1.17857	1.01606	1.23623	0.98455
28	251	241	1.043	1.34618	1.21376	1.17407	1.01408	1.23124	0.981887
29	246	236	1.04105	1.34093	1.20999	1.17117	1.01255	1.22816	0.979209
30	228	219	1.03404	1.32515	1.19803	1.16138	1.00835	1.21866	0.974297
31	218	210	1.02987	1.31599	1.19091	1.15562	1.00508	1.21246	0.971807

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการดำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32	198	191	1.02358	1.29676	1.17546	1.14077	0.993223	1.19463	0.961158
33	187	181	1.01978	1.28608	1.16659	1.13312	0.987889	1.18631	0.955454
34	177	171	1.01565	1.27483	1.15713	1.1242	0.982116	1.17729	0.949592
35	168	161	1.01299	1.26684	1.15052	1.11756	0.976246	1.16818	0.945131
36	434	416	1.13049	1.53583	1.3383	1.2556	1.03448	1.33202	1.02367
37	414	397	1.11713	1.51884	1.33152	1.25541	1.04145	1.32659	1.0294
38	402	385	1.10873	1.50614	1.32554	1.25232	1.04412	1.32058	1.03079
39	387	372	1.10126	1.49343	1.31807	1.24873	1.04478	1.31466	1.0304
40	375	361	1.09495	1.4809	1.31079	1.24447	1.04488	1.30844	1.02741
41	361	348	1.08767	1.46554	1.3005	1.2376	1.0435	1.30103	1.02462
42	346	333	1.08125	1.4492	1.28883	1.22971	1.04052	1.29143	1.02042
43	330	318	1.07373	1.4299	1.27472	1.22084	1.03766	1.28182	1.01403
44	315	304	1.06818	1.41525	1.26425	1.21209	1.03335	1.27256	1.00946
45	299	288	1.06123	1.39685	1.25089	1.20276	1.02883	1.26218	1.00315
46	284	274	1.05561	1.38126	1.23986	1.19456	1.02488	1.25293	0.996197
47	270	260	1.05014	1.36538	1.22821	1.18494	1.02061	1.24322	0.989601
48	255	246	1.04456	1.3501	1.21655	1.17617	1.01511	1.23408	0.983247
49	238	228	1.03732	1.33232	1.20316	1.16548	1.01024	1.22314	0.976623
50	208	203	1.0264	1.3054	1.18243	1.14749	0.998337	1.20292	0.965686

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3.2 ข้อมูลของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบของสายส่ง

	Total G	Total L	%	IFL1-2	IFL2-3	IFL2-5	IFL3-4	IFL4-5	IFL6-11	IFL6-12
1	456	432	0.25	2.50347	2.26937	2.30815	2.03981	2.52464	1.55238	1.399388
2	456	432	0.5	2.53252	2.0855	2.18462	2.06488	2.5112	1.38576	1.17532
3	446	425	0.25	2.42646	2.22297	2.25684	2.01495	2.49431	1.55312	1.40122
4	446	425	0.75	2.51358	2.01532	2.19993	2.17822	2.45405	1.30072	1.07809
5	440	420	0.5	2.43097	2.03779	2.124	2.02486	2.42635	1.39369	1.19244
6	440	420	0.75	2.48645	2.0029	2.18144	2.162	2.42965	1.30107	1.08119
7	428	410	0.25	2.3401	2.16646	2.19535	1.9802	2.39045	1.54423	1.40078
8	428	410	0.5	2.37343	2.00905	2.08829	1.99993	2.37754	1.39447	1.19978
9	421	403	0.25	2.315	2.1477	2.17507	1.96756	2.3661	1.53894	1.39743
10	421	403	0.75	2.40281	1.96473	2.12467	2.11278	2.35565	1.30285	1.09157
11	411	393	0.5	2.31109	1.97375	2.04594	1.96726	2.32034	1.38806	1.1988
12	411	393	0.75	2.36658	1.94616	2.09885	2.08921	2.32248	1.30086	1.09287
13	405	389	0.25	2.26173	2.11098	2.13577	1.94231	2.31911	1.52824	1.39107
14	405	389	0.5	2.2959	1.96515	2.0356	1.95936	2.30667	1.38607	1.19836
15	397	381	0.25	2.23409	2.09124	2.11475	1.92855	2.29435	1.52245	1.38766
16	397	381	0.75	2.32379	1.92404	2.06831	2.06171	2.28383	1.29725	1.09383
17	391	376	0.5	2.2503	1.93947	2.00522	1.93536	2.26635	1.37958	1.19664
18	391	376	0.75	2.30701	1.91499	2.0558	2.05018	2.26803	1.29499	1.09359
19	384	369	0.25	2.19389	2.0619	2.08366	1.90722	2.25684	1.51226	1.38154
20	384	369	0.5	2.22876	1.92554	1.9893	1.92227	2.24495	1.37633	1.19638
21	379	365	0.25	2.18316	2.05393	2.07524	1.90129	2.2466	1.50929	1.37958
22	379	365	0.75	2.27288	1.89601	2.031	2.02682	2.23645	1.29141	1.09449
23	371	357	0.5	2.1958	1.90461	1.96552	1.90239	2.21396	1.36937	1.19296
24	371	357	0.75	2.25007	1.88253	2.01393	2.01085	2.21541	1.28739	1.09291
25	368	352	0.25	2.1492	2.02785	2.04774	1.88155	2.21371	1.49837	1.37192
26	368	352	0.5	2.18415	1.89744	1.95695	1.89527	2.20225	1.36628	1.19166
27	356	343	0.25	2.12511	2.0077	2.02732	1.86432	2.18876	1.48999	1.3659
28	356	343	0.75	2.21319	1.85858	1.98518	1.98236	2.17929	1.2793	1.0901
29	350	337	0.5	2.14472	1.86801	1.92669	1.86603	2.16226	1.35575	1.18612
30	350	337	0.75	2.19753	1.84668	1.9728	1.96937	2.16393	1.27576	1.08875
31	340	327	0.25	2.08806	1.97428	1.99423	1.83365	2.14814	1.47621	1.35587
32	340	327	0.5	2.12176	1.84962	1.90823	1.84737	2.23797	1.34894	1.18221

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

33	335	323	0.25	2.08025	1.96702	1.98714	1.82657	2.13909	1.47288	1.35339
34	335	323	0.75	2.16514	1.82117	1.94635	1.94122	2.13118	1.26742	1.08488
35	325	313	0.5	2.09207	1.82535	1.88419	1.82254	2.10597	1.3394	1.17622
36	325	313	0.75	2.14253	1.80338	1.92784	1.92157	2.10824	1.26145	1.08155
37	321	309	0.25	2.05166	1.94081	1.96117	1.80173	2.10637	1.46016	1.34345
38	321	309	0.5	2.0844	1.81889	1.87766	1.81572	2.09708	1.33628	1.17418
39	311	300	0.25	2.03277	1.92349	1.94419	1.78554	2.08561	1.45209	1.33756
40	311	300	0.75	2.11429	1.78062	1.90441	1.89668	2.07927	1.25287	1.07752
41	456	432	0.75	2.58708	2.04327	2.24548	2.21538	2.51589	1.28802	1.05983
42	446	425	0.5	2.45795	2.05196	2.14143	2.03753	2.45049	1.39473	1.19066
43	440	420	0.25	2.39911	2.20448	2.23677	2.00326	2.43945	1.54918	1.39987
44	428	410	0.75	2.42938	1.97792	2.14375	2.12977	2.38013	1.3038	1.09118
45	421	403	0.5	2.34709	1.99431	2.07034	1.98633	2.35331	1.39168	1.19908
46	411	393	0.25	2.27708	2.12186	2.14746	1.94973	2.33281	1.53195	1.3934
47	405	389	0.75	2.35127	1.9384	2.08791	2.0795	2.30863	1.29972	1.09329
48	397	381	0.5	2.26858	1.94937	2.01701	1.94481	2.28208	1.38257	1.19773
49	391	376	0.25	2.21747	2.07898	2.10161	1.91973	2.27849	1.51796	1.38475
50	384	369	0.75	2.28364	1.90207	2.03898	2.03439	2.24654	1.29293	1.09467
51	379	365	0.5	2.2181	1.91901	1.98176	1.916	2.23486	1.37433	1.19563
52	371	357	0.25	2.16093	2.03659	2.05713	1.88819	2.22557	1.50249	1.37464
53	368	352	0.75	2.2383	1.87587	2.00472	2.00216	2.20368	1.28481	1.09229
54	356	343	0.5	2.15977	1.87984	1.93844	1.87783	2.17774	1.35989	1.18827
55	350	337	0.25	2.11041	1.99459	2.01438	1.8524	2.17297	1.48464	1.36207
56	340	327	0.75	2.17352	1.82812	1.95332	1.94881	2.1399	1.2695	1.08597
57	335	323	0.5	2.11374	1.84289	1.90168	1.84041	2.12914	1.34627	1.18065
58	325	313	0.25	2.05913	1.94778	1.96811	1.80857	2.11541	1.46416	1.34659
59	321	309	0.75	2.13452	1.79672	1.92078	1.91407	2.09942	1.25881	1.08006
60	311	300	0.5	2.06502	1.80304	1.86212	1.79976	2.07675	1.32969	1.17054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3.2 (ต่อ) ข้อมูลของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ
ของสายส่ง

	Total G	Total L	%	IFL6-13	IFL9-10	IFL9-14	IFL10-11	IFL12-13	IFL13-14
1	456	432	0.25	1.61149	1.47458	1.27112	1.25188	0.989186	1.10064
2	456	432	0.5	1.46786	1.41555	1.1177	1.21353	1.02388	0.997575
3	446	425	0.25	1.60763	1.47487	1.28288	1.2642	1.01083	1.11943
4	446	425	0.75	1.38343	1.37385	1.059	1.22461	1.14078	0.988182
5	440	420	0.5	1.46764	1.41583	1.13692	1.22941	1.04968	1.02275
6	440	420	0.75	1.38107	1.37172	1.05519	1.22588	1.14326	0.991518
7	428	410	0.25	1.59417	1.46601	1.28598	1.26792	1.02729	1.13057
8	428	410	0.5	1.46518	1.4133	1.14528	1.23444	1.06156	1.03432
9	421	403	0.25	1.58762	1.46058	1.28365	1.26638	1.02887	1.13091
10	421	403	0.75	1.37823	1.36707	1.06574	1.23033	1.15309	1.0047
11	411	393	0.5	1.45467	1.40231	1.14423	1.23217	1.06578	1.03763
12	411	393	0.75	1.37361	1.36163	1.06636	1.22925	1.15401	1.00674
13	405	389	0.25	1.57396	1.44959	1.27893	1.26299	1.03276	1.13127
14	405	389	0.5	1.45121	1.4	1.14422	1.23157	1.06658	1.03837
15	397	381	0.25	1.56708	1.44409	1.27673	1.26082	1.03445	1.13154
16	397	381	0.75	1.36717	1.35585	1.0678	1.22702	1.1542	1.00947
17	391	376	0.5	1.44236	1.39082	1.14304	1.22777	1.06822	1.03987
18	391	376	0.75	1.36376	1.3516	1.06742	1.22511	1.15337	1.00965
19	384	369	0.25	1.55501	1.43256	1.27035	1.25555	1.03687	1.1304
20	384	369	0.5	1.43776	1.38545	1.14107	1.22605	1.07	1.04029
21	379	365	0.25	1.55141	1.42904	1.26829	1.2538	1.0371	1.12958
22	379	365	0.75	1.35792	1.34438	1.06562	1.22237	1.15325	1.00963
23	371	357	0.5	1.42858	1.37591	1.13662	1.22099	1.06885	1.03824
24	371	357	0.75	1.35242	1.33856	1.06295	1.21891	1.15092	1.00783
25	368	352	0.25	1.53922	1.41595	1.25963	1.24614	1.03613	1.12556
26	368	352	0.5	1.42518	1.37066	1.13427	1.21822	1.06856	1.03731
27	356	343	0.25	1.53009	1.40676	1.25375	1.24054	1.03502	1.12284
28	356	343	0.75	1.34339	1.32624	1.05876	1.21152	1.14744	1.00542
29	350	337	0.5	1.41305	1.3562	1.12788	1.20952	1.06615	1.03431
30	350	337	0.75	1.3391	1.32039	1.05679	1.20814	1.14547	1.00415

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

31	340	327	0.25	1.51535	1.38923	1.24181	1.22905	1.03218	1.11681
32	340	327	0.5	1.40583	1.34631	1.12241	1.20333	1.06381	1.30111
33	335	323	0.25	1.51179	1.38501	1.23857	1.22641	1.03141	1.11511
34	335	323	0.75	1.33024	1.30773	1.05016	1.20018	1.14077	0.999226
35	325	313	0.5	1.39497	1.33286	1.11497	1.19491	1.06034	1.02674
36	325	313	0.75	1.32326	1.29872	1.04644	1.19451	1.13705	0.996573
37	321	309	0.25	1.49797	1.37063	1.22856	1.2168	1.02794	1.10949
38	321	309	0.5	1.3915	1.32931	1.11292	1.1925	1.05911	1.02539
39	311	300	0.25	1.48939	1.36167	1.22197	1.21076	1.02614	1.10568
40	311	300	0.75	1.31393	1.28793	1.0408	1.18667	1.13206	0.992292
41	456	432	0.75	1.37636	1.36836	1.03346	1.20943	1.12181	0.96648
42	446	425	0.5	1.47116	1.41891	1.13537	1.2283	1.04572	1.01938
43	440	420	0.25	1.60183	1.47054	1.28225	1.26449	1.01505	1.12151
44	428	410	0.75	1.38141	1.37062	1.06542	1.23104	1.15256	1.00343
45	421	403	0.5	1.46078	1.40894	1.14487	1.23357	1.06313	1.03563
46	411	393	0.25	1.57874	1.45241	1.28006	1.26391	1.03173	1.1314
47	405	389	0.75	1.37084	1.35972	1.06688	1.2287	1.1539	1.00769
48	397	381	0.5	1.44408	1.39543	1.14413	1.22994	1.06813	1.0399
49	391	376	0.25	1.56181	1.43899	1.27414	1.25803	1.03479	1.13064
50	384	369	0.75	1.36043	1.34706	1.06615	1.22365	1.15391	1.00972
51	379	365	0.5	1.43489	1.3824	1.14002	1.22464	1.07003	1.04007
52	371	357	0.25	1.54363	1.42171	1.26328	1.24958	1.03625	1.12687
53	368	352	0.75	1.34961	1.33369	1.06115	1.21645	1.14999	1.00678
54	356	343	0.5	1.41791	1.36245	1.13068	1.21322	1.06724	1.03573
55	350	337	0.25	1.52418	1.39998	1.2494	1.23616	1.0342	1.12068
56	340	327	0.75	1.33284	1.31118	1.05235	1.20238	1.14212	1.00088
57	335	323	0.5	1.40287	1.34252	1.11991	1.201	1.06291	1.0296
58	325	313	0.25	1.50227	1.37451	1.23138	1.21943	1.02905	1.11121
59	321	309	0.75	1.32031	1.29545	1.04482	1.19216	1.1539	0.995303
60	311	300	0.5	1.38433	1.32115	1.10805	1.18694	1.05694	1.02238

ระบบไฟฟ้าที่นำมาจำลองทั้ง 3 ระบบ มีหน่วย ดังนี้

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (G) มีหน่วยเป็น MW
2. โหลดทางไฟฟ้า (L) มีหน่วยเป็น MW
3. กระแสผิดพลาดที่บัสและสายส่ง (IFL) มีหน่วยเป็น KA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชาญชัย จิตรชู
วัน เดือน ปีเกิด	29 พฤษภาคม 2520 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 4 หมู่ 4 ต.โรงช้าง อ.มหาราช จ.พระนครศรีอยุธยา 13150 โทร.035-766-061
ประวัติการศึกษา	2540 สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขา ช่างไฟฟ้ากำลังจาก วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา 2543 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก มหาวิทยาลัยศรีปทุม 2553 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	2544-2547 ครูจ้างสอนพิเศษ แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา 2547-2549 วิศวกร & หัวหน้างานซ่อมบำรุง ฝ่ายโรงงาน บริษัท ที.ซี.เอช.ซูมิโนเอะ จำกัด จ.พระนครศรีอยุธยา 2549-2551 วิศวกร แผนกวิศวกรรม บริษัท อินโดไทย ซินเทติกส์ จำกัด จ.พระนครศรีอยุธยา 2551-ปัจจุบัน พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า กลุ่มงานอาคารสถานที่และภูมิสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

ผลงานทางวิชาการ การประยุกต์ใช้ ANFIS ในการวิเคราะห์กระแสฟอลต์ วารสารวิศวกรรมสาร
มก.ปีที่ 26 ฉบับที่ 84 ประจำเดือน เมษายน-มิถุนายน 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้