

การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับ  
การวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง

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



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-210

การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับ  
การวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง

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



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560  
KMITL-2017-EN-M-020-210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A COMPARATIVE STUDY BETWEEN ANN AND ANFIS FOR  
ASYMMETRICAL 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  
2017

KMITL-2017-EN-M-020-210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับการวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบ  
ไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง  
Thesis Title A Comparative Study between ANN and ANFIS for Asymmetrical Fault  
Current Analysis in Power Systems  
นักศึกษา นายบดินทร วัฒนรัตน์  
รหัสประจำตัว 56601084  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชาติ จิรวិภากร  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-210

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ปานจิต	ดำรงกุลกำจร	
ผศ.ดร.นิรุช	จิรสวรรณกุล	
ผศ.ดร.เชาว์	ชมภูอินไหว	
ผศ.ดร.ชาย	ชมภูอิไหว	
รศ.ดร.สมชาติ	จิรวิภากร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 ธันวาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.00 - 12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

  
(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ณ วันที่ 13 ธันวาคม พ.ศ. 2560  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับการวิเคราะห์ กระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง
นักศึกษา	นายบดินทร วัฒนะรัตน์
รหัสประจำตัว	56601084
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมชาติ จิรวิภากร

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรที่ตำแหน่งของบัสและสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบมีหลายชั้นซ่อนชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ (ANN) เปรียบเทียบกับ ระบบอนุมานนิรนัยที่แบบปรับตัวได้ (ANFIS) โดยทั้งสองระบบจะถูกนำมาเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เกิดกระแสผิดพ่วงและชนิดของกระแสผิดพ่วง ที่มีผลต่อกระแสผิดพ่วง สำหรับข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มาจาก การจำลองระบบ IEEE 30 บัส และระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผลที่ได้จากระบบดังกล่าวถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสฟอลต์ที่ได้จากโปรแกรม PowerWorld ซึ่งผลที่ได้นั้นให้ข้อสรุปว่าการใช้ ANN สามารถหาคำตอบได้แม่นยำกว่า ANFIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	A Comparative Study between ANN and ANFIS For Asymmetrical Fault Current Analysis in Power Systems
Student	Mr.Bordinthon Wattanarat
Student ID.	56601084
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somchat Jiriwibhakorn

## ABSTRACT

This thesis proposes the asymmetrical fault analysis at the location of buses and lines in the power system. Artificial Neural Network typed Multi-Layer Neural Networks with Back-Propagation learning algorithm (ANN) is compared with Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS). The ANN and ANFIS are used to learn the relationship between fault location and fault type, which effect on fault current. The data used in this study came from IEEE 30-bus and EGAT North-eastern area which calculated by PowerWorld program. The analysis result shows that the ANN obtains more accurate solutions than the ANFIS.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จากความกรุณาอย่างยิ่งและดูแลจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชาติ จิรวิภากร ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สำหรับคุณงานความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

บดินทร วัฒนะรัตน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูป.....	VI

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3

บทที่ 2 ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	4
2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง.....	4
2.2 ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	6
2.3 ชนิดของฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	7
2.4 สาเหตุของการเกิดฟอลต์.....	9
2.5 การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง.....	11
2.6 การควบคุมและจำกัดค่ากระแสลัดวงจร.....	13

บทที่ 3 การวิเคราะห์กระแสฟอลต์.....	16
3.1 ทฤษฎีและการวิเคราะห์กระแสฟอลต์.....	16
3.2 ส่วนประกอบสมมาตร.....	19
3.3 การวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	21
3.4 การคำนวณกระแสฟอลต์ตามมาตรฐาน IEEE 60909.....	23

บทที่ 4 โครงข่ายประสาทเทียม.....	29
4.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบมีผู้ฝึกสอน.....	30
4.2 การเลือกชนิดของอินพุตและเอาต์พุต.....	37
4.3 การเลือกรูปแบบของอินพุตและเอาต์พุต.....	37
4.4 การนอร์มอลไลซ์ข้อมูลสำหรับสอนโครงข่ายประสาทเทียม.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การเลือกขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม.....	40
4.6 วิธีการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม.....	41
บทที่ 5 ระบบอนุมานนิวโรฟซีแบบปรับตัวได้.....	42
5.1 พื้นฐานแนวคิดแบบฟัซซี.....	42
5.2 โครงสร้างของระบบนิวโรฟซีแบบปรับตัวได้.....	45
5.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก.....	47
5.4 ขั้นตอนการเรียนรู้แบบผสมของ ANFIS.....	51
บทที่ 6 การวิเคราะห์กระแสฟอลต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	52
และระบบอนุมานนิวโรฟซีแบบปรับตัวได้	
6.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดลอง.....	52
6.2 ข้อมูลอินพุทและเอาต์พุทสำหรับฝึกสอนและทดสอบ.....	53
6.3 วิธีการจำลองการวิเคราะห์ค่ากระแสฟอลต์.....	55
บทที่ 7 ผลการทดลอง.....	61
7.1 ผลการทดลองของระบบ IEEE 30 บัส.....	61
7.2 ผลการทดลองของระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กพผ.....	67
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
8.1 การประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม.....	76
8.2 ข้อดีและข้อเสียของการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการวิเคราะห์ หากระแสฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	76
8.3 ข้อเสนอแนะ.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก ก. ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา.....	79
ก.1 ระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส.....	80
ก.2 ระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	87
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ค่าตัวประกอบแรงดันตามมาตรฐาน IEC 60909-0..... 25
3.2	การคำนวณค่า $I_k''$ ในประเภทต่างๆ ของการลัดวงจร..... 26
3.3	ความถี่สมมูลสำหรับคำนวณค่าองค์ประกอบกระแสตรง..... 27
4.1	ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน..... 32
5.1	การส่งผ่านในกระบวนการเรียนรู้แบบผสมสำหรับ ANFIS..... 51
6.1	ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม..... 55
7.1	แสดงจำนวนข้อมูลที่ใช้สำหรับฝึกสอนและทดสอบของระบบ IEEE 30 บัส..... 61
7.2	แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่างๆ..... 62 ของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส
7.3	แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของโครงสร้างแบบต่างๆ ของระบบประสาทเทียม..... 63
7.4	แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกต่างๆ..... 64
7.5	แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของโครงสร้างแบบต่างๆ ของ ANFIS..... 65
7.6	แสดงจำนวนข้อมูลที่ใช้สำหรับฝึกสอนและทดสอบของระบบไฟฟ้า..... 67 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.
7.7	แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่างๆ..... 68 ของระบบทดสอบ ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.
7.8	แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบจากโครงสร้างแบบต่างๆ ของระบบประสาทเทียม..... 69 สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.
7.9	แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกต่างๆ..... 71 สำหรับวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.
7.10	แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของโครงสร้างแบบต่างๆ ของ ANFIS..... 61 สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.
7.11	สรุปผลการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง ANN และ ANFIS..... 74
8.1	เปรียบเทียบค่า RMSE ของชุดข้อมูลระหว่าง ANN และ ANFIS..... 75

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแสดงแผนผังจำลองของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	5
2.2 ลักษณะทั่วไปของรูปคลื่นแรงดันและกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรไฟฟ้า.....	6
2.3 การลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูล.....	7
2.4 การลัดวงจรระหว่างเฟส.....	8
2.5 การลัดวงจรระหว่างเฟส.....	8
2.6 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน.....	8
2.7 ตัวอย่างขอบเขตการป้องกัน (Zone of Protection).....	11
2.8 ส่วนประกอบของระบบป้องกัน.....	12
2.9 แสดงการแบ่งสถานีไฟฟ้าออกเป็นส่วนๆ เพื่อจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร.....	14
2.10 โครงสร้างของ Inductive Fault Limiter.....	14
2.11 การติดตั้ง Superconducting FCL เพื่อลดค่า Fault Level ที่บัสบาร์.....	16
3.1 ตัวอย่างระบบไฟฟ้า 6 บัสและเกิดฟอลต์ที่บัส 2.....	17
3.2 วงจรสมมูลของระบบขณะเกิดฟอลต์ที่บัส 2.....	17
3.3 วงจรสมมูลเทวินินของระบบตัวอย่าง.....	17
3.4 (a) ลักษณะการเกิดฟอลต์ 3 เฟสสมมูล (b) วงจรสมมูลเทวินิน.....	21
3.5 (a) ลักษณะการเกิดฟอลต์หนึ่งเฟสลงดิน (b) วงจรสมมูลเทวินิน.....	22
3.6 (a) ลักษณะการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส (b) วงจรสมมูลเทวินิน.....	22
3.7 (a) ลักษณะการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (b) วงจรสมมูลเทวินิน.....	23
3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจรกับเวลา.....	24
4.1 ประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม.....	29
4.2 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งนิวรอนหนึ่งอินพุทแบบไม่มีไบแอส.....	30
4.3 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งนิวรอนหนึ่งอินพุทแบบมีไบแอส.....	30
4.4 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งนิวรอนแบบหลายอินพุท.....	31
4.5 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหนึ่งชั้น.....	33
4.6 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น.....	34
5.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบฟัชซี.....	43
5.2 เหตุผลแบบจริงเท็จ (Boolean Logic) และเหตุผลแบบฟัชซี (Fuzzy Logic).....	43
5.3 ความไม่แน่นอน (Uncertainty).....	44
5.4 โครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟัชซีแบบปรับตัวได้.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การศึกษาเรื่องการลัดวงจรเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งอาจเกิดได้จากธรรมชาติ ความผิดพลาดหรือความตั้งใจของมนุษย์ ทุกครั้งที่เกิดการลัดวงจรจะมีกระแสไหลมากผิดปกติ และถ้าไม่มีการป้องกันหรือกำจัดจุดที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบให้เร็วที่สุด จะทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบเสียหายได้ ดังนั้นอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกัน

การคำนวณขนาดกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นไม่มีความรุนแรงมากนักน้อยเพียงใด อุปกรณ์ตัดตอนหรืออุปกรณ์ป้องกันจะต้องทำงานได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว และสามารถทนต่อความรุนแรงของการเกิดฟอลต์นั้นได้ โดยไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีการคำนวณหากระแสฟอลต์เพื่อใช้ประกอบในการเลือกขนาดและชนิดของอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันนั้นๆ [10] ซึ่งการคำนวณหากระแสฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์เช่น สายส่ง หม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีอยู่ในระบบ และนำมาคำนวณด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงเริ่มมีการนำระบบโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีคุณสมบัติในการเรียนรู้และสามารถหาคำตอบของระบบที่มีความซับซ้อนได้ดี มาประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังเช่น นำมาหาค่าตำแหน่งการเกิดฟอลต์ [5] นำมาใช้หาชนิดและรูปแบบของฟอลต์ [12] ใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบสมมาตร [4]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการนำเสนอวิธีการนำระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Interface System : ANFIS) มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณขนาดกระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของบัสและบนสายส่งที่ตำแหน่งต่างๆ โดยทำการศึกษาจากระบบทดสอบ IEEE 30 bus และระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีจำนวนบัสและความยาวสายส่งมากที่สุด จึงเป็นภาคที่มีสถิติการเกิดฟอลต์มากที่สุดในประเทศไทย โดยทำการจำลองด้วยโปรแกรม PowerWorld และได้มีการเปรียบเทียบกระแสฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณระหว่างโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) กับระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (ANFIS)

### 1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องจากการขยายตัวของระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน และการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแรงสูงแห่งใหม่, การนำเข้าใช้งานของสายส่ง จะส่งผลให้ค่ากระแสฟอลต์ในระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จึงจำเป็นต้องดำเนินการศึกษาค่ากระแสฟอลต์ใหม่ เพื่อออกแบบระบบป้องกันหรือเลือกใช้ใช้อุปกรณ์ให้เหมาะสมกับระบบที่เปลี่ยนแปลงไปและทำการตรวจสอบค่าพิกัดของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าว่าสามารถรองรับการใช้งานได้หรือไม่ รวมทั้งใช้ผลการศึกษาค่ากระแสฟอลต์ในการตรวจสอบค่าปรับตั้งหรือค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่วางไว้ เพื่อให้ระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ ระบบป้องกันสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว และลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ การศึกษาเกี่ยวกับกระแสฟอลต์ ยังสามารถทำให้ทราบถึงชนิดของฟอลต์ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ รวมถึงสามารถวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้เกิดฟอลต์ในระบบได้ เพื่อวางแผนรองรับผลกระทบ หรือจัดทำมาตรการป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์ซ้ำขึ้นอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ1 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ได้มีการศึกษาถึงกระบวนการวิเคราะห์กระแสฟอลต์ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม [4], การแปลงเวฟเล็ต [6], การใช้ภาษาฟอร์แทรน 77 [12], โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนมากจะทำการศึกษาในระบบทดสอบมาตรฐาน เช่น ระบบ IEEE 14 บัส, IEEE 57 บัส, IEEE 118 บัส, ระบบ New England เป็นต้น ซึ่งยังไม่เคยมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาระบบส่งไฟฟ้าในประเทศไทยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เนื่องจากระบบไฟฟ้ามาตรฐานของต่างประเทศและระบบไฟฟ้าของประเทศไทยนั้น อาจมีความแตกต่างกันอยู่บ้างในเรื่องของระดับแรงดันไฟฟ้า, ความถี่ของระบบไฟฟ้า, ลักษณะของอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในระบบไฟฟ้า รวมถึงคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ในโรงไฟฟ้าประเภทต่างๆ เช่น โรงไฟฟ้าพลังน้ำ โรงไฟฟ้าพลังความร้อน โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ จะส่งผลถึงลักษณะและความรุนแรงของการเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบไฟฟ้า สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาฟอลต์โดยใช้ ANN และ ANFIS มาวิเคราะห์ [4] ที่ผ่านมานั้น ได้ทำการศึกษาการเกิดฟอลต์แบบสมมาตร หรือ Three-phase fault เพียงชนิดเดียว ซึ่งฟอลต์ประเภทนี้มีโอกาสการเกิดน้อยครั้งที่สุด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้ทำการศึกษาการเกิดฟอลต์แบบไม่สมมาตร ในระบบส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งถือเป็นระบบหลักที่สำคัญต่อประเทศ ทั้งในด้าน เศรษฐกิจ และสังคม เพื่อให้เกิดความมั่นคง และมีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าหลักของประเทศ

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ นำเสนอวิธีการหากระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรซึ่งเป็นฟอลต์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นบ่อยครั้งที่สุด ในระบบไฟฟ้ากำลังที่บัส และสายส่งที่ตำแหน่งต่างๆ โดยสามารถให้คำตอบที่มีความถูกต้องสูงและใช้เวลาในการคำนวณน้อย ซึ่งสามารถนำมาใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาตำแหน่งการเกิดฟอลต์ เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นในระบบ เป็นการช่วยลดเวลาในการระบุตำแหน่งและการลงพื้นที่เพื่อแก้ไขปัญหาฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ระบบโครงข่ายประสาทเทียมและระบบอนุमानนิวโรฟซซีแบบปรับตัวได้ที่นำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาขนาดกระแสฟอลต์ มีคุณสมบัติที่สามารถเรียนรู้การคำนวณที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี โดยที่ไม่จำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์หรือข้อมูลของอุปกรณ์ในระบบเหมาะสำหรับใช้วิเคราะห์ระบบขนาดใหญ่ เมื่อผ่านการฝึกสอนแล้วจะสามารถให้คำตอบได้อย่างถูกต้องรวดเร็วซึ่งได้ตั้งสมมติฐานดังนี้

1. ชนิดของฟอลต์และตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จะมีผลต่อขนาดกระแสฟอลต์
2. ระบบโครงข่ายประสาทเทียมและระบบอนุमानนิวโรฟซซีแบบปรับตัวได้ สามารถใช้หาคำตอบของกระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรได้อย่างถูกต้อง และรวดเร็วเมื่อระบบได้รับการฝึกสอนด้วยข้อมูลที่มีปริมาณและคุณภาพเพียงพอ
3. สามารถทำนายขนาดของกระแสฟอลต์ในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนประเภท SPP Non-firm
4. กำหนดระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษาให้จ่ายกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัดโดยที่ไม่เกิดการ Overload ของสายส่งไฟฟ้า เพื่อให้ค่ากระแสฟอลต์ที่ได้ เป็นค่าสูงที่สุด (Fault Level)

#### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาการคำนวณและวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณกระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้าอย่างถูกต้อง และวิธีการใช้งานโปรแกรม โดยเลือกใช้โปรแกรม PowerWorld เป็นการหาคำตอบมาตรฐาน
3. ศึกษาการใช้ระบบโครงข่ายประสาทดัดเทียมและระบบอนุমানนิวโรฟิซซี่แบบปรับตัวได้ เพื่อคำนวณกระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรบนระบบทดสอบ IEEE 30 บัส และระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
4. เปรียบเทียบผลการทำนายกระแสฟอลต์ของระบบทดสอบ IEEE30 บัส และระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ระหว่างการทำนายด้วยโครงข่ายประสาทดัดเทียม และระบบอนุমানนิวโรฟิซซี่แบบปรับตัวได้

#### 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษารวบรวมข้อมูลวิธีการวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรชนิดต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทดัดเทียม, ระบบอนุমানนิวโรฟิซซี่แบบปรับตัวได้
3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม PowerWorld เพื่อใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์สำหรับเตรียมชุดข้อมูลฝึกสอนและทดสอบระบบโครงข่ายประสาทดัดเทียมและระบบอนุমানนิวโรฟิซซี่แบบปรับตัวได้
4. ศึกษาและทำการจำลองระบบไฟฟ้าในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส และระบบไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยหาค่ากระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรที่ตำแหน่งบัส และสายส่งที่ตำแหน่งต่างๆ
5. นำข้อมูลค่ากระแสฟอลต์ที่ได้จากการจำลองไปฝึกสอนและทดสอบระบบโครงข่ายประสาทดัดเทียมและระบบอนุমানนิวโรฟิซซี่แบบปรับตัวได้
6. เปรียบเทียบคำตอบที่ได้เพื่อหาโครงสร้างของระบบโครงข่ายประสาทดัดเทียมและระบบอนุমানนิวโรฟิซซี่แบบปรับตัวได้ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยดูจากค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบ
7. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

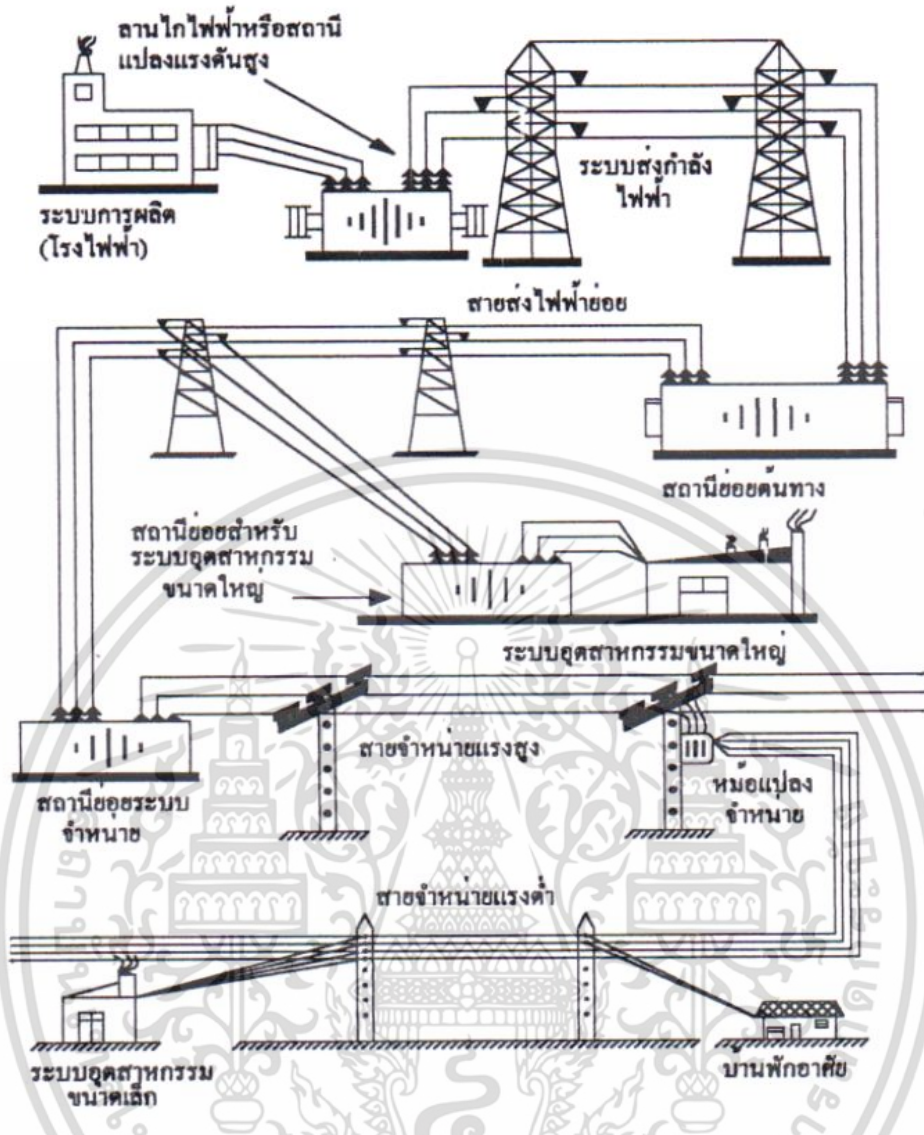
## บทที่ 2

# พอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

### 2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลัง หมายถึงระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าแบบทันทีทันใด (Real Time) ในทางอุดมคติ ระบบไฟฟ้าจึงไม่มีการสะสมพลังงานไว้ในระบบไฟฟ้า ดังนั้น พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดจะถูกจ่ายเข้าระบบส่งจ่ายไฟฟ้าและถูกใช้ไปในทันที โดยกำลังผลิตไฟฟ้า (Electricity Supply) ทั้งหมดจะเท่ากับความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า (Demand of Electricity) บวกกับพลังงานที่สูญเสียไปในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า (Transmission Loss) ซึ่งการใช้ไฟฟ้านั้นเริ่มจากการผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงเพื่อยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นเข้าสู่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงไปยังสถานีไฟฟ้า จนถึงสถานีไฟฟ้าย่อยจึงลดระดับแรงดันลงเข้าสู่ระบบจำหน่ายและส่งต่อไปยังชุมชนมายังหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งตามเสาไฟฟ้าในชุมชน เพื่อแปลงแรงดันอีกครั้งเป็นระบบระบบแรงต่ำเข้าสู่อาคารบ้านเรือน เมื่อมีการใช้ไฟฟ้าในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ กระแสไฟก็จะไหลกลับไปตามสายไฟฟ้าอีกเส้นหนึ่งสู่แหล่งกำเนิดอีกครั้ง จึงเป็นการครบวงจรการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1 ระบบไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีความเชื่อถือได้และมีเสถียรภาพสูง มีความปลอดภัย มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบค่อนข้างน้อย การควบคุมไฟฟ้าไม่ยุ่งยาก มีต้นทุนการก่อสร้างและบำรุงรักษาต่ำ รวมทั้งไม่สร้างปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ระบบไฟฟ้ากำลังจะประกอบไปด้วยโรงไฟฟ้า (Electric Power Plant) ที่กระจายตัวอยู่ทั่วประเทศ ทำหน้าที่ผลิตและจ่ายไฟฟ้าโดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า (Generator Step-Up Transformer) เพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นซึ่งจะช่วยให้ค่าความสูญเสียพลังงานไฟฟ้าต่ำลง จากนั้นจะเชื่อมต่อวงจรกับสถานีไฟฟ้าแรงสูง (HV Transmission Substation) โดยจะมีวงจรสายส่งไฟฟ้าแรงสูง (HV Transmission Lines) ช่วยเชื่อมต่อสถานีไฟฟ้าภายในภูมิภาคเดียวกันจนได้เครือข่ายระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดเสถียรภาพในการจ่ายไฟฟ้ามามากขึ้นและช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าโดยรวมได้ เนื่องจากการกระจายตัวของโรงไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนั้น จะมีวงจรสายส่งเชื่อมโยง (Tie Lines) เครือข่ายวงจรสายส่งไฟฟ้าของแต่ละภูมิภาคเข้าด้วยกัน หรือมีการเชื่อมต่อกับเครือข่ายระบบของประเทศเพื่อนบ้าน เพื่อให้สามารถมีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากระบบไฟฟ้าหนึ่งไปยังระบบอื่นๆ ที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่าที่ผลิตได้ในบางช่วงเวลา

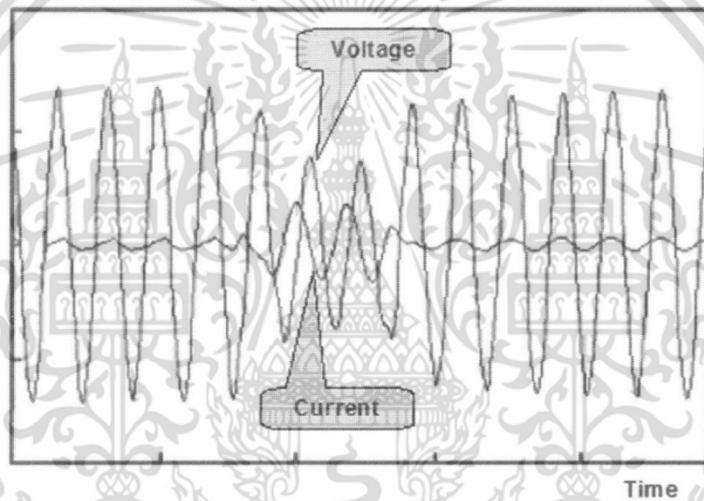


รูปที่ 2.1 รูปแสดงแผนผังจำลองของระบบไฟฟ้ากำลัง [2]

ในการควบคุมระบบไฟฟ้าที่ประกอบขึ้นจากโรงไฟฟ้าหลายประเภทเป็นจำนวนมาก เพื่อให้สามารถจ่ายไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดไฟฟ้าดับแม้ว่าจะมีฟอลต์เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า จำเป็นต้องมีขนาดพิกัดกำลังผลิตไฟฟ้า (Generating Capacity) ที่พร้อมจะจ่ายไฟฟ้าได้ทันทีมากกว่าค่าความต้องการใช้ไฟฟ้า (System Load) อยู่ตลอดเวลา ค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าทั้งสองจะเรียกว่า กำลังไฟฟ้าสำรองพร้อมจ่าย (Spinning Reserve) ซึ่งควรจะมีความมากกว่าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใหญ่ที่สุดซึ่งกำลังจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้า เนื่องจากหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่สุดถูกปลดออกไปอย่างทันทีทันใด โรงไฟฟ้าอื่นๆ จะต้องสามารถใช้กำลังผลิตสำรองเพื่อช่วยชดเชยกำลังผลิตส่วนที่ขาดหายไปทันที ระบบไฟฟ้ากำลังจึงจะคงรักษาเสถียรภาพไว้ต่อไปได้

## 2.2 ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Fault)

ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง หมายถึงสภาพความบกพร่องหรือล้มเหลวจากการทำหน้าที่ของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือสายไฟฟ้า (Electrical Failure) จนอาจทำให้เกิดการขัดจังหวะการทำงานของระบบไฟฟ้าตามปกติโดยทั่วไป ความบกพร่องในการทำหน้าที่ของระบบไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ในสองลักษณะ คือ การเสียหายความ เป็นฉนวนไฟฟ้าในจุดใดจุดหนึ่งของอุปกรณ์หรือสายไฟฟ้า และจะทำให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจร (Short-Circuit Fault) เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในเฟสที่เกิดฟอลต์มักจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากปกติอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าของเฟสที่เกิดฟอลต์ มักจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงอย่างมาก ขณะที่แรงดันไฟฟ้าในเฟสอื่นๆ ที่เป็นปกติ อาจจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าไม่ต่างไปจากเดิม หรืออาจจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นได้ในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีระบบต่อลงดินที่ไม่มีประสิทธิภาพ เช่น การต่อลงดินแบบ Ungrounded หรือ High-Impedance Grounded สำหรับความบกพร่องอีกรูปแบบหนึ่งคือ การบกพร่องในการเกิดเปิดหรือปิดวงจรไฟฟ้า (Open-Circuit Fault) เช่น จุดต่อวงจรเกิดหลุด สายไฟฟ้าขาด หรือกลไกการทำงานของสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เกิดความบกพร่อง เป็นต้น

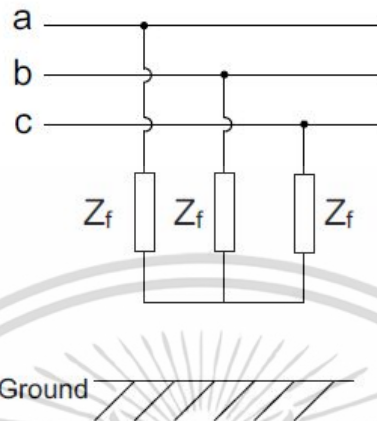


รูปที่ 2.2 ลักษณะทั่วไปของรูปคลื่นแรงดันและกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรไฟฟ้า [2]

การเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังอาจเกิดขึ้นช่วงไหนของระบบก็ได้ แต่ส่วนใหญ่มักเกิดบนสายส่งเหนือดิน (Overhead) ประมาณร้อยละ 50-70 ส่วนที่เหลือเป็นฟอลต์ที่เกิดในสถานีไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่งใต้ดิน ฟอลต์ที่เกิดขึ้นเริ่มแรกเกือบทั้งหมดเป็นฟอลต์แบบขนานหรือการลัดวงจร การเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้ามีทั้งการลัดวงจรแบบสมมาตร (Symmetrical Fault) จะเรียกว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balance Three Fault) และการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Fault) ซึ่งได้แก่ การลัดวงจรแบบ เฟส-เฟส (Line to Line Fault) แบบเฟส-เฟส-ดิน (Double Line to Ground Fault) และแบบเฟส-ดิน (Single Line to Ground Fault) ในระบบจำหน่ายและระบบแรงต่ำ การลัดวงจรแบบสมมาตรทำให้เกิดกระแสลัดวงจรสูงกว่าการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร แต่ทั้งนี้การวิเคราะห์การลัดวงจรแบบไม่สมมาตรก็ยังมี ความจำเป็นสำหรับการปรับตั้งและเลือกค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน การพิจารณาเรื่องอาร์กฟอลต์ (Arcing Fault) หรือการป้องกันเพลิงไหม้ที่เกิดจากฟอลต์ลงดิน

## 2.3 ชนิดของฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

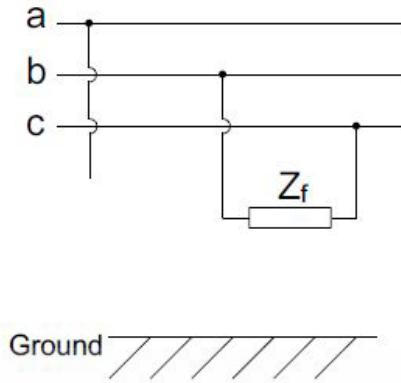
2.3.1 ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Fault) หรือเรียกว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balanced Three Phase Fault) เป็นการลัดวงจรที่เกิดขึ้นเมื่อตัวนำไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ลัดวงจรเข้าด้วยกัน อาจมีการลัดวงจรลงดินร่วมด้วย ดังรูปที่ 2.3 เมื่อเกิดการลัดวงจรแล้วระบบยังคงรักษาสมดุลของระบบไว้ได้



รูปที่ 2.3 การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

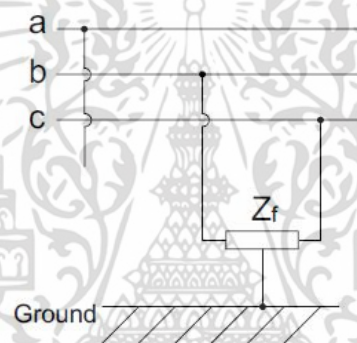
2.3.2 ฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Fault) หรือเรียกว่า การลัดวงจรแบบไม่สมดุล (Unbalanced Fault) ได้แก่ การลัดวงจรแบบระหว่างเฟส, การลัดวงจรแบบระหว่างเฟสลงดิน, และการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ซึ่งโดยทั่วไป ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิดจากการลัดวงจรแบบไม่สมดุลจะมีค่าน้อยกว่าการลัดวงจรแบบสมดุล แต่ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งใกล้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการต่อลงดิน หรือมีค่าอิมพีแดนซ์ของคอร์กประกอบลำดับศูนย์ต่ำ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน อาจทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรมากกว่าการลัดวงจรแบบสมดุลได้ ดังนั้นการคำนวณการเกิดลัดวงจรแบบไม่สมดุลจึงต้องมีการพิจารณาร่วมด้วยเสมอ โดยในการคำนวณการลัดวงจรแบบไม่สมดุลนี้จะพิจารณาองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วน คือ องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Component) องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence Component) และองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Component) โดยไม่คิดผลการเหนี่ยวนำระหว่างอุปกรณ์ และพิจารณาให้องค์ประกอบลำดับบวก เท่ากับองค์ประกอบลำดับลบ สำหรับรูปแบบการลัดวงจรที่ก่อให้เกิดค่ากระแสลัดวงจรต่ำที่สุดนั้นไม่แน่นอน แต่ส่วนใหญ่จะเป็นการลัดวงจรแบบระหว่างเฟส แต่เพื่อความสมบูรณ์จึงควรคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของการลัดวงจรทุกรูปแบบ แล้วจึงพิจารณาว่า ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำสุดมีค่าเท่าใด เกิดจากการลัดวงจรรูปแบบใด

- การลัดวงจรแบบระหว่างเฟส (Line to Line Fault) เป็นการลัดวงจรระหว่างเฟสคู่ใดคู่หนึ่ง อาจเกิดจากการที่สายตัวนำสองเส้นมาสัมผัสกัน หรือมีวัสดุตัวนำพาตระหว่างสายสองเส้น ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดความไม่สมดุลกันทั้งค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า มีลักษณะดังรูปที่ 2.4



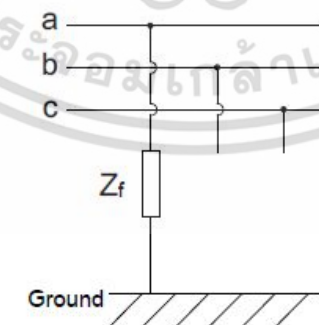
รูปที่ 2.4 การลัดวงจรระหว่างเฟส

- การลัดวงจรระหว่างเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) เป็นการลัดวงจรระหว่างเฟสคู่ใดคู่หนึ่งลงดิน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การลัดวงจรระหว่างเฟส

- การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) เป็นการลัดวงจรของเฟสใดเฟสหนึ่งลงดิน ซึ่งเป็นฟอลต์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นบ่อยที่สุดในระบบไฟฟ้า มีลักษณะการเกิดดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 สาเหตุของการเกิดฟลลด์

ฟลลด์ในระบบไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ตัวอย่างเช่น เกิดจากการเสี่ยสภาพหรือความบกพร่องของฉนวนไฟฟ้า (Insulation Failure) การเกิดแรงดันเกิน (Over Voltage) จนทำให้เกิด Flashover ผ่านไปบนผิวของฉนวนไฟฟ้า, ความบกพร่องของกลไกการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า, การบุกรุกของสัตว์ชนิดต่างๆ และเกิดจากผู้ปฏิบัติงานกับระบบไฟฟ้าอย่างไม่ถูกต้อง (Human Error) เป็นต้น แต่ปัญหาที่เราป้องกันได้ยากที่สุดจะเป็นปัญหาเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าจนเป็นเหตุให้เกิดการเสี่ยสภาพฉนวนเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ความร้อนสูง, ความเย็นจัด, ความชื้นสูง, การสั่นสะเทือน, แรงกดทับหรือแรงดึงจนเกิดรอยแตกร้าวหรือฉีกขาด, ความเครียดสนามไฟฟ้า, การเกิด Corona หรือ Air Ionization, การเกิดสิ่งเจือปนแทรกซึมเข้าไปในเนื้อฉนวน และการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าตามอายุการใช้งาน เป็นต้น

วงจรสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบแขวนบนเสาโครงเหล็ก พร้อมทั้ง Overhead Ground Wire ถือได้ว่าเป็นส่วนประกอบหลักของเครือข่ายระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แต่การก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าลักษณะนี้ในระยะทางไกลๆ จะต้องใช้เงินลงทุนที่สูงมาก การพิจารณาเลือกใช้สายไฟฟ้าจะต้องพิจารณาถึง พิกัดทางไฟฟ้า (Electrical Rating), พิกัดอุณหภูมิ (Thermal Rating), การรับแรงทางกล (Mechanical Strength) และความคุ้มค่าเป็นต้น ดังนั้นจึงนิยมใช้สายไฟฟ้าที่ผลิตจาก Aluminum และ Aluminum Alloys เพราะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี มีราคาค่อนข้างต่ำ รวมทั้งมีน้ำหนักเบากว่าทองแดงและเหล็ก สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ ความเครียดของฉนวนที่เกิดจากความร้อนและแรงทางกลนั้นถือได้ว่าเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพของฉนวน ความร้อนสูงจะทำให้วัสดุต่างๆ มีการขยายตัวไม่เท่ากัน และการสั่นสะเทือนจะทำให้โครงสร้างของฉนวนเกิดการแตกร้าวหรือฉีกขาดได้ เมื่อเนื้อฉนวนไฟฟ้ามีรอยตำหนิหรือมีสิ่งเจือปน จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) ที่รอยตำหนิของฉนวนไฟฟ้ามากกว่าที่จุดอื่น และอาจทำให้เกิด Partial Discharge ที่จุดนั้นจนทำให้เกิดปัญหารุนแรงมากขึ้น ในกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง การเสื่อมสภาพของฉนวนน้ำมันมักเกิดจากความชื้น ฟองก๊าซ หรือสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำมันซึ่งจะทำให้เกิด Partial Discharge ได้ และความสกปรกของ Transformer Bushing ก็เป็นสาเหตุให้เกิด Surface Discharge หรือ Flashing over Porcelain

**2.4.1 การเกิดฟ้าผ่า (Lightning Stroke)** เป็นสาเหตุสำคัญที่สุดซึ่งจะทำให้เกิด Flashover ในระบบส่งไฟฟ้าที่เปิดโล่ง โดยเราสามารถแบ่งลักษณะของ Lightning Flashover ออกได้เป็น 4 รูปแบบ

- Back Flashover มักจะเกิดจากฟ้าผ่าลงบน Overhead Ground Wire ที่อยู่ตำแหน่งสูงที่สุดของเสาส่งไฟฟ้าที่เป็นเหล็ก (Metal Tower) และทำให้เกิด Lightning Surge ซึ่งเคลื่อนที่ในลักษณะ Travelling Wave ผ่านตัวนำไฟฟ้าในทุกทิศทางโดยเริ่มจาก Ground Wire ด้วยความเร็วสูง แต่ถ้าวัดคลื่นแรงดันไฟฟ้าผ่านจุดที่มีความแตกต่างของค่าความต้านทางไฟฟ้า (Impedance Discontinuity) จะเกิดคลื่นสะท้อนกลับ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลจาก Ground Wire ผ่านเสาโครงเหล็กที่มีค่า Surge Impedance ลงสู่ดินที่มีค่า Tower Footing Resistance มาก จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าบนเสาสูงขึ้นอย่างมากด้วย การเกิด Surge Voltage สูงกว่าค่า Insulation Strength ก็จะทำให้เกิด Back Flashover จากเสาเหล็กผ่านอากาศไปยังสายส่งไฟฟ้า (Phase Conductor)

- Shielding Failure Flashover คือ การเกิดฟ้าผ่าลงที่สายไฟฟ้าโดยตรงอันเนื่องจากการไม่มีการติดตั้ง Shield Wire เพื่อป้องกันสายส่งไฟฟ้าหรือเกิดจากความบกพร่องในการออกแบบติดตั้งทำให้ไม่สามารถป้องกันฟ้าผ่าที่สายส่งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 9 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Induced Flashover เกิดจากฟ้าผ่าลงที่ Shield Wire หรือฟ้าผ่าลงพื้นดินในตำแหน่งที่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าซึ่งมักจะมีค่า Basic Lightning Impulse Insulation Level (BIL) ต่ำกว่า 400 kV โดย Electromagnetic Field ที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน (Rapidly Changing Current) จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นมาบนสายส่งไฟฟ้า และสามารถทำให้เกิด Flashover ผ่านฉนวนไฟฟ้าไปยังโครงสร้างเสาเหล็กได้

- Mid-span Flashover คือ การเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้าที่ตำแหน่งใกล้ช่วงกลางสายไฟฟ้ามี่น้ำหนักรวม ช่วงกลางของสายส่งจึงตกท้องช้าง อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ระยะห่างของเสาใกล้กันมากหรือห่างกันมาก ก็จะมีโอกาสเกิดขึ้นได้

**2.4.2** การเกิด Switching Surge เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้าแรงสูง ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวงจรไฟฟ้าอย่างฉับพลันภายในระบบไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของ Inductance หรือ Capacitance โดยเฉพาะในขณะที่ทำการ Switching (Closing หรือ Opening a Circuits) ซึ่งจะทำให้เกิด Impulse ที่จะมีค่า Amplitude สูงขึ้นมาภายในระยะเวลา (Rise Time) สั้นมาก และอาจจะทำให้เกิด Resonance ตามมาอีกด้วย

**2.4.3** ปัญหาที่เกิดจากธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม อาจจะทำให้เกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้าได้ในหลายรูปแบบ เช่น ความเปียกชื้นเนื่องจากฝนตกทำให้ฉนวนทำหน้าที่ได้ไม่มีเท่าที่ควร เช่นเดียวกับผลจากสิ่งปนเปื้อนในอากาศ (ควีนไฟ, ไอเกลือ หรือไอของสารที่เป็นกรด), การเกิดลมพายุ, ต้นไม้ใหญ่ที่แหว่งหรือล้มพาดบนสายส่งไฟฟ้า, เชือกวาวหรือป้ายผ้าพาดลงบนสายส่งไฟฟ้า, รถชนเสาไฟฟ้า และเกิดจากสัตว์ที่เข้ามาอาศัยอยู่ในสถานีไฟฟ้าหรือบนเสาส่งไฟฟ้า เป็นต้น ปัญหาดังกล่าวอาจจะทำให้เกิดการลัดวงจร สายไฟฟ้าขาด หรือทำให้เสาไฟฟ้าล้ม และสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบเปิดโล่งที่ใช้อากาศทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า (Air-Insulated Outdoor Substation) รวมทั้งวงจรสายส่งไฟฟ้า (Overhead power lines) ที่พาดหรือแขวนอยู่กับเสาส่งไฟฟ้าที่เป็นเหล็ก (Steel Towers) จะมีความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาได้ง่าย เนื่องจากการเปิดโล่งอาจจะทำให้สิ่งต่างๆ เข้ามาสัมผัสถูกตัวนำไฟฟ้า หรือเกิดฟ้าผ่าลงมาที่อุปกรณ์สวิตช์เกียร์ได้โดยตรง นอกจากนี้ มลภาวะในอากาศ อย่างเช่น พายุฝน พายุทราย ไอเสียจากโรงงาน และไอเกลือจากทะเล สามารถทำให้ความเป็ฉนวนไฟฟ้าของช่องว่างอากาศสูญเสียไปชั่วคราว รวมทั้ง Supporting insulators ที่มีความสกปรกอาจจะทำให้ระยะความเป็นฉนวนไม่เพียงพอที่จะป้องกันการเกิด Flashover ได้อีกต่อไป

**2.4.4** การจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินค่าพิกัด (Overload) เมื่อมีการใช้ไฟฟ้ามากกว่าค่าที่ออกแบบไว้ในช่วงเวลาหนึ่ง จะทำให้ตัวนำไฟฟ้าเกิดความร้อนสูงขึ้น เมื่อระบบการระบายความร้อนมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ ก็จะทำให้ฉนวนไฟฟ้าเกิดความเสียหายหรือมีอายุสั้นลงได้ นอกจากนี้ การจ่ายไฟฟ้าเกินพิกัดยังอาจจะทำให้เกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกได้อีกด้วย

**2.4.5** การจ่ายภาระไฟฟ้าทั้งสามเฟสไม่สมดุลกัน (Unbalanced Load) สามารถเกิดขึ้นได้จากการออกแบบระบบจำหน่ายที่ไม่เหมาะสม ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ไม่สมดุลกันนี้จะทำให้เกิดกระแส Negative Phase Sequence ซึ่งจะทำให้มีกระแสไหลวน (Eddy Currents) ไหลวนอยู่ในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าหรือในโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากขึ้น จนทำให้เกิดความร้อนสูง (Thermal Overload) และฉนวนไฟฟ้าของแกนเหล็กเกิดความเสียหายได้ในบางกรณี การจ่ายไฟฟ้าแบบไม่สมดุลอาจจะเกิดจากความบกพร่องในการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์บางเฟสหรือเกิดจากสายไฟฟ้าขาดบางเฟส ซึ่งเป็นกรณีที่รุนแรงที่สุดสำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ไม่สมดุล

## 2.5 การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง

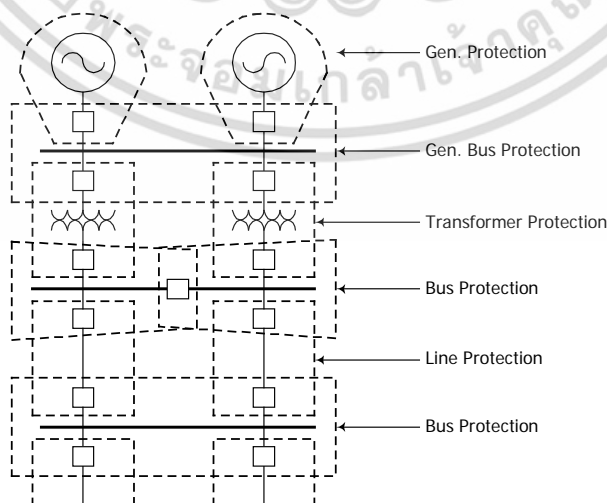
ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมีโอกาสที่จะเกิดความผิดปกติ (Fault) ขึ้นในระบบได้ด้วยสาเหตุต่างๆ หลายประการ ซึ่งความผิดปกติเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ รวมไปถึงความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟด้วย ดังนั้นระบบไฟฟ้ากำลังจึงจำเป็นต้องมีระบบการป้องกันเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงหรือลดความเสียหายต่ออุปกรณ์และระบบให้มากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบไฟฟ้าใหญ่ขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลขณะลัดวงจรจะมีค่าสูงมาก ระบบป้องกันไฟฟ้าที่ดีจะต้องสามารถตัดตอนระบบไฟฟ้าส่วนที่เกิดความผิดปกติออกไปอย่างรวดเร็วที่สุด นอกจากนี้คุณสมบัติที่ดีของระบบป้องกันคือ ควรมีความเชื่อถือได้ ทำงานถูกต้อง ทำงานโดยรวดเร็ว ซึ่งจะต้องมีการหากระแสฟลตตีให้ถูกต้องในจุดที่มีการออกแบบระบบป้องกันไฟฟ้า

### 2.5.1 รูปแบบระบบป้องกันไฟฟ้ากำลัง

โดยทั่วไปการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังจะมีการแบ่งการป้องกันออกเป็นเขตการป้องกัน (Zone of Protection) โดยจะครอบคลุมระบบไฟฟ้าทั้งระบบ ซึ่งเขตการป้องกันสามารถแบ่งได้ 6 เขตการป้องกัน ดังรูปที่ 2.3 และมีการแบ่งส่วนของระบบป้องกันออกเป็น 2 ส่วน คือ

- ระบบป้องกันหลัก (Primary Protection) หมายถึง ระบบป้องกันชุดแรกในเขตการป้องกัน ซึ่งต้องทำหน้าที่แยกส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบให้เร็วที่สุดและให้น้อยที่สุดเท่าที่ทำได้ เพื่อลดความเสียหายต่อระบบให้น้อยที่สุด ในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ต้องการระบบป้องกันที่มี Reliability สูงมากจะมีการติดตั้งชุด Primary Protection เอาไว้อีกหนึ่งชุด (Duplicate Primary Protection) เพื่อป้องกันกรณีชุด Primary Protection อีกชุดไม่ทำงาน โดยชุด Duplicate Primary Protection นี้จะมีความเร็วในการทำงานเท่ากับชุด Primary Protection ชุดแรก โดยให้ทำงานเป็นอิสระต่อกันส่วนมากจะใช้รีเลย์จากต่างผู้ผลิตกับชุดแรก เพื่อหลีกเลี่ยงจุดบกพร่องที่อาจเกิดซ้ำกันได้

- ระบบป้องกันสำรอง (Back Up Protection) หมายถึง ระบบป้องกันอีกชุดหนึ่ง ซึ่งมีความเร็วในการทำงานที่ช้ากว่าชุด Primary เนื่องจากมีการทำงานแยกส่วนวงจรออกมากกว่าชุด Primary ดังนั้นจึงต้องรอให้ชุด Primary ที่เห็นความผิดปกติในเขตรับผิดชอบทำงานก่อน หากชุด Primary ไม่ทำงานจึงเป็นหน้าที่ของชุด Back Up ที่จะทำงานในการแยกส่วนที่เกิดความผิดปกติดังกล่าว โดยชุด Back Up นั้นมีทั้งที่อยู่บริเวณเดียวกับชุด Primary (Local Back Up Protection) และอยู่ห่างออกไป (Remote Back Up Protection)



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างขอบเขตการป้องกัน (Zone of Protection) [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 11 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 ส่วนประกอบของระบบป้องกัน

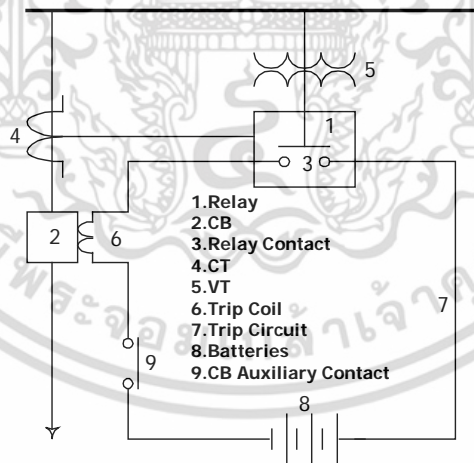
ระบบป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันมากมาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด ขนาดและความสำคัญของอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน ส่วนประกอบของระบบป้องกันโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ ดังนี้

- เซอร์คิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ใช้สำหรับเปิดและปิดวงจรทั้งในขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะปกติและในสภาวะผิดปกติ การปิดและการเปิดวงจรจะต้องสามารถควบคุมเวลาได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์อื่นๆ ประกอบกัน เพื่อตรวจสอบสภาวะผิดปกติและสั่งการให้เซอร์คิตเบรกเกอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- Current transformer และ Voltage Transformer (CT และ PT) คือหม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดัน ซึ่งจะทำหน้าที่ในการแปลงกระแสและแรงดันให้ต่ำลงจากระบบไฟฟ้าแรงสูงเข้าสู่ตัวรีเลย์

- วงจรทริป (Trip Circuit) ประกอบไปด้วยสายไฟ และแบตเตอรี่ซึ่งป้อนกระแสเข้าสู่ขดลวดกระตุ้นให้เซอร์คิตเบรกเกอร์ ทำงานเปิดหรือปิดวงจร นอกจากนี้ยังมีรีเลย์หน่วงเวลา (Time Delay Relay), รีเลย์ช่วย (Auxiliary Relay) และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ

- รีเลย์ป้องกัน (Protection Relay) คือ อุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบให้สามารถกระตุ้นจากสัญญาณที่แปลงมาจากระบบกำลัง รีเลย์มีหน้าที่ตรวจสอบจับภาวะผิดปกติในระบบกำลัง โดยรีเลย์จะทำการวัดปริมาณกระแสอยู่ตลอดเวลา ปริมาณไฟฟ้าที่อาจเปลี่ยนแปลงได้เมื่อเกิดภาวะผิดปกติ เช่น กระแส แรงดัน มุมทางไฟฟ้า และความถี่ เป็นต้น เมื่อขนาดของสัญญาณถึงขนาดที่กำหนดให้รีเลย์ทำงาน คอนแทคของรีเลย์จะปิดทำให้วงจรทริปครบวงจร ซึ่งมีผลให้กระแสไหลในวงจรทริปกระตุ้นให้เซอร์คิตเบรกเกอร์เป็นตัวตัดแยกส่วนของที่เกิดภาวะผิดปกติออกจากระบบทันที



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของระบบป้องกัน [9]

## 2.5.3 คุณสมบัติของระบบป้องกัน

ระบบป้องกันจำเป็นต้องได้รับการออกแบบให้มีคุณสมบัติที่สามารถทำงานได้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โดยระบบป้องกันที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- Reliability หมายถึง ความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันว่าสามารถทำงานได้จริงเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น ซึ่งประกอบด้วย 2 ลักษณะ คือ Dependability หมายถึง ระบบป้องกันจะต้องทำงานได้ทุกครั้งและทำงานได้ถูกต้องเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นไม่ว่าจะเป็นความผิดปกติแบบใด และ Security หมายถึง เอกสารเป็นเอกสาร หรือหลักฐานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการตรวจสอบเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าใช้ระบบจะขึ้นด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 12 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบป้องกันจะต้องไม่ทำงานในภาวะที่ไม่ต้องการให้ทำงาน เพื่อเป็นการลดการทำงานเกินความจำเป็น ซึ่งจะทำให้เกิดความสูญเสียเพิ่มขึ้น

- Selectivity หมายถึง การใช้งานระบบป้องกันให้ทำงานภายในขอบเขตที่ออกแบบมาให้ทำงาน ซึ่งขอบเขตดังกล่าวเรียกว่า Zone of Protection ทั้งนี้ ขอบเขตอาจจะเป็นแบบจำกัดหรือไม่จำกัดก็ได้ และขอบเขตการป้องกันจะถูกกำหนดด้วยบริเวณการติดตั้ง Current Transformer และมีเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นตัวตัดตอนแยกความผิดปกติออกจากระบบ โดยระบบไฟฟ้าทุกส่วนจะต้องอยู่ภายใต้ขอบเขตการป้องกันอย่างน้อย 1 Zone หากระบบป้องกันภายในขอบเขตไม่ทำงานจำเป็นจะต้องมีระบบป้องกันสำรอง (Back up Protection) เพื่อทำการตัดตอนในขอบเขตรอบๆ จุดที่เกิดความผิดปกติขึ้นแทน

- Speed หมายถึง ระบบป้องกันจะต้องสามารถทำงานได้รวดเร็วก่อนที่จะเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆ ทั้งนี้การทำงานของระบบป้องกันนั้นมีใช้เพียงแค่ทำงานทันทีที่ตรวจพบความผิดปกติ ซึ่งอาจจะไม่ใช่ความผิดปกติ (Faults) บางครั้งอาจเป็นเพียงแค่ Transients ในระบบ หากระบบป้องกันทำงานทันทีที่จะเป็นการทำงานเกินความจำเป็นหรือขาด security นั้นเอง ดังนั้นจึงควรมีการหน่วงเวลาในการ trip ตามลักษณะความรุนแรงของความผิดปกติด้วย และในบางครั้งอาจจะต้องมีการหน่วงเวลาเพื่อที่จะให้มีการทำงานประสานกัน (Coordination) ของระบบป้องกันอีกด้วย

- Simplicity หมายถึง ระบบป้องกันควรมีความเรียบง่ายที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยที่ยังสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องเหมาะสม การเพิ่มระบบป้องกันโดยเกินความจำเป็นอาจทำให้เกิดปัญหาตามมามากมาย เช่น การทำงานผิดพลาด รวมทั้งความยุ่งยากและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเพิ่มขึ้นด้วย

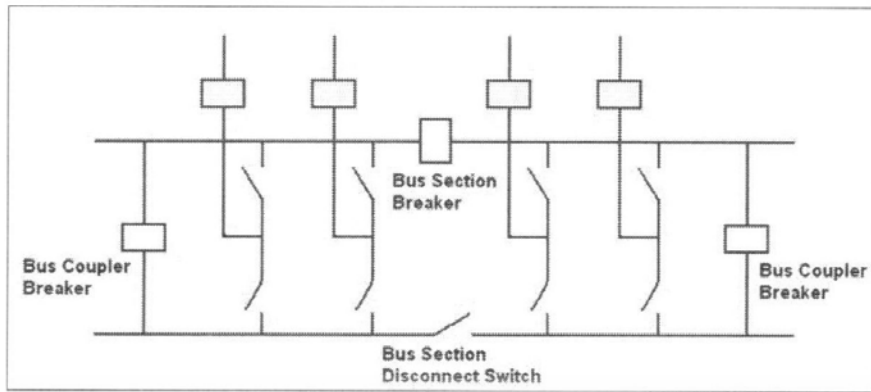
- Economics หลักการที่สำคัญคือการพยายามทำให้มีการป้องกันสูงสุดภายใต้ต้นทุนต่ำที่สุด “Maximum protection for the minimum cost” ซึ่งต้นทุนนั้นเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งในการออกแบบระบบป้องกันดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันรวมถึงค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาด้วย แต่จะต้องไม่คำนึงถึงต้นทุนเพียงอย่างเดียวจนทำให้ระบบป้องกันนั้นขาดความน่าเชื่อถือไป

## 2.6 การควบคุมและจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Fault-Current Limiters)

โดยปกติระบบส่งจ่ายไฟฟ้าจะต้องสามารถทนต่อค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Fault Level) ที่สูงมาก และเนื่องจากการพัฒนาเติบโตของระบบเศรษฐกิจ ทำให้มีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจึงจำเป็นต้องมีการขยายวงจรรายส่งไฟฟ้าและมีโรงไฟฟ้าแห่งใหม่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าอยู่เสมอ จึงทำให้เครือข่ายระบบไฟฟ้าจะมีความซับซ้อนมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ด้วยเหตุผลดังกล่าว สถานีไฟฟ้าแรงสูงที่มีอายุการทำงานมาหลายปีโดยไม่มีการปรับเปลี่ยนใดๆ จึงอาจเกิดปัญหาหาระดับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่สูงขึ้นกว่าที่คาดการณ์ไว้ในขณะที่ออกแบบสถานีไฟฟ้า

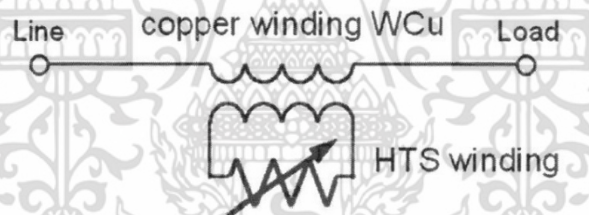
วิธีการจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพื่อให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ยังคงสามารถทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหาย สามารถทำได้โดยการแบ่งสถานีไฟฟ้าออกเป็นส่วนๆ (Substation Splitting) ดังรูปที่ 2.9 โดยบัสบาร์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงจะถูกแบ่งแยกโดย Bus Section Breaker และ Bus Coupler Breaker เพื่อควบคุมไม่ให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงมากเกินไป และหากเกิดฟอลต์ที่บัสบาร์ส่วนใด ก็จะต้องปลดวงจรที่อยู่กับบัสบาร์นั้นทุกวงจร แต่จะไม่กระทบต่อการจ่ายไฟฟ้าของบัสบาร์ส่วนอื่นๆ แม้ว่าการแบ่งสถานีไฟฟ้าออกเป็นส่วนๆ จะสามารถช่วยลดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงได้และทำให้เกิดความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ามากขึ้น แต่การแบ่งส่วนสถานีไฟฟ้าจะทำให้การเชื่อมต่อวงจรระหว่างกัน (Interconnectivity) ในสถานีไฟฟ้าน้อยลง จะส่งผลให้เสถียรภาพ (Stability) ในการทำงานของระบบไฟฟ้าน้อยลง และทำให้การควบคุมการส่งจ่ายไฟฟ้ายุ่งยากมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 13 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



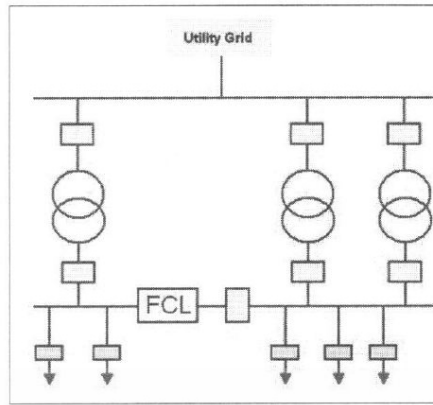
รูปที่ 2.9 แสดงการแบ่งสถานีไฟฟ้าออกเป็นส่วนๆ เพื่อจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร [9]

นอกจากการแบ่งส่วนสถานีไฟฟ้าที่สามารถแก้ปัญหาเรื่อง Fault Level แล้ว ยังสามารถนำอุปกรณ์ Short-Circuit Fault Current (FCL) มาใช้ลดกระแสลัดวงจรได้ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวมีอยู่หลายประเภท เช่นการใช้ Series Reactor มาต่ออนุกรมในระบบไฟฟ้า หรือการใช้อุปกรณ์ High Temperature Superconducting (HTS) Fault-Current Limiter (FCL) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะใช้ตัวนำยิ่งยวดที่ถูกทำให้เย็นจัดจนเป็นตัวนำไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานเกือบเป็นศูนย์ และต่ออนุกรมกับระบบไฟฟ้า เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าวิกฤต (Critical Current) จะทำให้ค่าความต้านทานของ HTS เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงสามารถทำหน้าที่จำกัดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้ประมาณร้อยละ 20-50



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของ Inductive Fault Limiter [11]

HTS FCL นั้นมีอยู่หลายชนิด เช่น Resistive FCL และ Inductive FCL ซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่ระหว่างบัสบาร์ ดังรูปที่ 2.11 หลักการทำงานของ Resistive FCL จะใช้คุณสมบัติของ HTS ที่มีลักษณะเป็น Non-Linear Resistance เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน FCL สูงมากขึ้น จะทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปจาก Superconducting เป็น Normal Conductor และจะทำให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับ Inductive FCL จะมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะต่ออนุกรมขดลวดด้านปฐมภูมิ (Primary Windings) เข้ากับวงจรไฟฟ้า และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Windings) ซึ่งทำมาจากตัวนำยิ่งยวด (Superconductor Coil) ในสภาวะปกติค่าความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิจะต่ำมาก แต่เมื่อเกิดไฟฟ้าลัดวงจร จะทำให้ตัวนำยิ่งยวดเป็นไปเป็นตัวนำปกติจนมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถช่วยลดค่ากระแสลัดวงจรได้ และเมื่อกระแสลัดวงจรหายไป คุณสมบัติของ HTS FCL ก็กลับมาเป็นเช่นเดิมอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.11 การติดตั้ง Superconducting FCL เพื่อลดค่า Fault Level ที่บัสบาร์ [9]



## บทที่ 3

### การวิเคราะห์กระแสฟอลต์

เมื่อเกิดความผิดปกติหรือฟอลต์ (Fault) ขึ้นในระบบไฟฟ้า ระบบป้องกัน (Protection System) ซึ่งถูกติดตั้งในระบบไฟฟ้าจะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดกระแสฟอลต์ หรือวงจรที่เกิดฟอลต์ออก เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นแก่ระบบไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาค่ากระแสฟอลต์ที่มากและน้อยที่สุดตามจุดหรือบัสต่างๆ เพื่อออกแบบและหาขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน (Protective devices) เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ และฟิวส์ ด้วยเหตุนี้ การคำนวณกระแสฟอลต์จึงมีความสำคัญมากในการป้องกันระบบไฟฟ้า เราจะต้องคำนวณหาค่าระดับกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Fault Level) ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ โดยค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เราสนใจ คือ Maximum Fault Current ซึ่งจะถูกใช้เพื่อการพิจารณาเลือกพิกัดกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า และค่า Minimum Fault Current เพื่อการกำหนดค่า Setting ของรีเลย์ป้องกันระบบไฟฟ้า ปัจจุบันจึงมีการกำหนดมาตรฐานหรือวิธีการคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรขึ้น โดยมีมาตรฐานหลักที่ใช้กันอยู่ 2 มาตรฐาน คือ วิธีการคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI (IEEE) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กันในทวีปอเมริกาเหนือ และวิธีคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC (IEC60909) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กันมากในยุโรปและเอเชีย แต่ในปัจจุบัน เนื่องจากมีการติดต่อซื้อขายสินค้าระหว่างประเทศมากขึ้น สินค้าเหล่านั้นซึ่งรวมไปถึงอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าด้วย จึงต้องมีมาตรฐานในการกำหนดคุณภาพอุปกรณ์ดังกล่าว และมาตรฐานที่ใช้กันส่วนใหญ่ คือ มาตรฐาน IEC ซึ่งมีแนวโน้มจะเป็นมาตรฐานสากลในอนาคตต่อไป ดังนั้น เพื่อให้ข้อมูลกระแสฟอลต์ที่คำนวณได้ สามารถนำไปใช้พิจารณาร่วมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC ได้อย่างเหมาะสม วิธีการคำนวณฟอลต์ที่นำมาใช้จึงควรเป็นไปตามวิธีในมาตรฐาน IEC และเนื่องจากขนาดและความซับซ้อนของระบบไฟฟ้าในอุตสาหกรรมสมัยใหม่มีมากขึ้น การคำนวณกระแสฟอลต์จึงมีการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ ซึ่งนอกจากจะช่วยประหยัดเวลาและได้ความถูกต้องแล้ว ยังทำให้การคำนวณมีรูปแบบตามมาตรฐาน ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานกับมาตรฐานในงานด้านอื่นๆ ต่อไปได้อย่างถูกต้อง

#### 3.1 ทฤษฎีและการวิเคราะห์กระแสฟอลต์

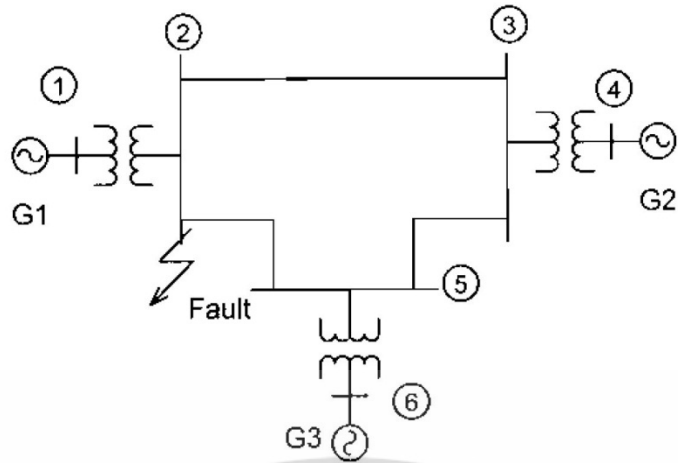
การคำนวณกระแสฟอลต์ในระบบกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีวิธีการที่เหมาะสม ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเครื่องคอมพิวเตอร์มาช่วยในการแก้ไขปัญหา โดยใช้หลักการของเทวินิน และจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ (Matrix) สำหรับเมตริกซ์ที่นิยมใช้กันมากและสะดวกที่สุดในการคำนวณกระแสฟอลต์ ได้แก่  $Z_{BUS}$  วิธีการคำนวณหา  $Z_{BUS}$  ที่เป็นที่ยอมรับมี 2 วิธี คือ การอินเวอร์ส (Inverse) ของ  $Y_{BUS}$  และการเพิ่มอุปกรณ์เข้าไปที่ละอุปกรณ์เพื่อจัดรูป  $Z_{BUS}$  (Add Branch – Add Link) ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสบัสเป็นไปตามสมการที่ 3.1

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

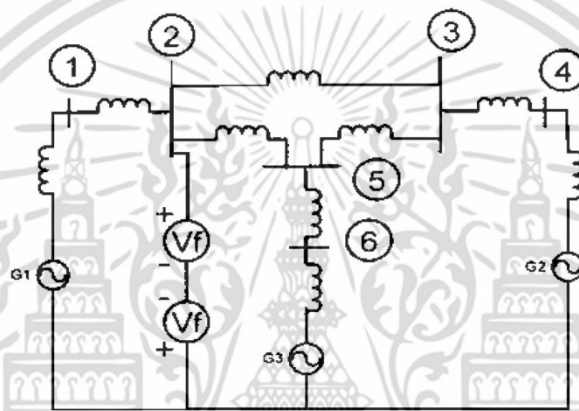
เมื่อ  $V_{BUS}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส

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

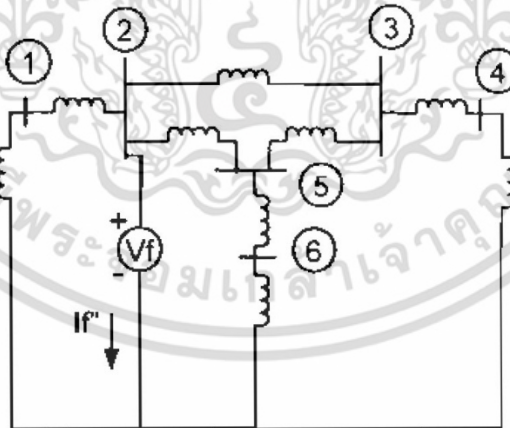
เมื่อพิจารณากระแสฟอลต์จากบัสอิมพีแดนซ์โดยใช้ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบในรูปที่ 3.1 ซึ่งมีทั้งหมด 6 บัสและสมมติว่าเกิดฟอลต์ที่บัส 2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 16 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างระบบไฟฟ้า 6 บัสและเกิดฟอลต์ที่บัส 2 [1]



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของระบบขณะเกิดฟอลต์ที่บัส 2 [1]



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลเทวินินของระบบตัวอย่าง [1]

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลเทวินินของระบบตัวอย่างดังรูปที่ 3.2 จะเห็นว่า มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพียงแหล่งเดียวคือ  $-V_f$  ที่บัส 2 และกระแสฟอลต์คือ  $I_f$  ในเมตริกซ์  $I_{BUS}$  เนื่องจากเป็นกระแสที่ไหลเข้าบัส ส่วนกระแสในบัสอื่นๆ เป็นศูนย์เพราะไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าในวงจรเทวินิน จากสมการที่ 3.1 จะได้สมการของระบบตัวอย่างดังสมการที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 17 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากสมการที่ 3.2 เราสามารถหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

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

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

$$\Delta V_1 = -Z_{12}I_f'' = -\frac{Z_{12}}{Z_{22}}V_t \quad (3.5)$$

$$\Delta V_2 = -V_t \quad (3.6)$$

$$\Delta V_3 = -Z_{32}I_f'' = -\frac{Z_{32}}{Z_{22}}V_t \quad (3.7)$$

⋮

$$\Delta V_6 = -Z_{62}I_f'' = -\frac{Z_{62}}{Z_{22}}V_t \quad (3.8)$$

แรงดันไฟฟ้าในสมการที่ 3.5 ถึง 3.8 เป็นแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ในระบบของวงจรเทวินิน ในกรณีต้องการหาแรงดันไฟฟ้าของระบบขณะเกิดลัดวงจรต้องรวมเข้ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบในสภาวะปกติด้วย ดังสมการที่ 3.9 ถึง 3.12

$$V_{1s} = V_{1N} + \Delta V_1 \quad (3.9)$$

$$V_{2s} = V_t - \Delta V_t = 0 \quad (3.10)$$

$$V_{3s} = V_{3N} + \Delta V_3 \quad (3.11)$$

⋮

$$V_{6s} = V_{6N} + \Delta V_6 \quad (3.12)$$

เมื่อ	$V_{is}$	คือ แรงดันไฟฟ้าของบัส $i$ ขณะเกิดฟอลต์
	$V_{iN}$	คือ แรงดันไฟฟ้าของบัส $i$ ขณะสภาวะปกติ
	$\Delta V_i$	คือ แรงดันไฟฟ้าของบัส $i$ ของวงจรสมมูลเทวินิน
	$V_t$	คือ แรงดันไฟฟ้าของบัส 2 ในสภาวะปกติ
	$I''$	คือ กระแสฟอลต์ในช่วงสับทรานเซียน (Subtransient)
	$I_f''$	คือ กระแสฟอลต์รวมทั้งหมดที่จุดเกิดฟอลต์

จากสมการที่ 3.3 ถึง 3.8 เราสามารถเขียนสมการในวงจรเทวินินสำหรับระบบไฟฟ้าจำนวน  $n$  บัส ที่เกิดฟอลต์ขึ้นที่บัส  $k$  และมีแรงดันไฟฟ้าที่บัส  $k$  สภาวะจ่ายโหลดปกติเท่ากับ  $V_t$  ได้ดังนี้

$$\Delta V_i = -\frac{Z_{ik}}{Z_{kk}}V_t = -I_f''Z_{ik} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 18 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_f'' = \frac{V_f}{Z_{kk}} \quad (3.14)$$

### 3.2 ส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Component)

ในการวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตรนั้นจำเป็นต้องใช้วิธีของส่วนประกอบสมมาตร โดยในปี ค.ศ. 1918 C.L. Fortesce ได้เสนอวิธีการสำหรับการแก้ปัญหาในระบบที่ไม่สมดุลของ n เฟสเซอร์ที่มีความสัมพันธ์กันด้วยระบบ n เฟสเซอร์ที่สมดุล เรียกว่า ส่วนประกอบเฟสเซอร์เดิม (Symmetrical Components of The Original Phasors) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟสได้ด้วยเฟสเซอร์ของส่วนประกอบต่อไปนี้

- ส่วนประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Component) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมุมเฟสต่างกัน  $120^\circ$  โดยมีลำดับเฟส (Phase Sequence) เหมือนกับเฟสเซอร์เดิม
- ส่วนประกอบลำดับลบ (Negative Sequence Component) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสต่างกัน  $120^\circ$  โดยมีลำดับเฟสตรงข้ามกับเฟสเดิม
- ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Component) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสเดียวกัน

สำหรับเฟสเซอร์ของแรงดัน  $V_a$ ,  $V_b$  และ  $V_c$  ที่ไม่สมดุล สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของส่วนประกอบสมมาตรได้ดังนี้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (3.15)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (3.16)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (3.17)$$

และในทำนองเดียวกัน เฟสเซอร์ของกระแส  $I_a$ ,  $I_b$  และ  $I_c$  ที่ไม่สมดุลคือ

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (3.18)$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \quad (3.19)$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \quad (3.20)$$

- เมื่อ  $V_1, I_1$  คือ ส่วนประกอบแรงดันและกระแสลำดับบวก  
 $V_2, I_2$  คือ ส่วนประกอบแรงดันและกระแสลำดับลบ  
 $V_0, I_0$  คือ ส่วนประกอบแรงดันและกระแสลำดับศูนย์

เมื่อกำหนดให้เฟส  $a$  เป็นเฟสอ้างอิงและใช้โอเปอเรเตอร์  $a$  ( $a = 1 \angle 120^\circ$ ) ดังนั้นส่วนประกอบสมมาตรลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_{b1} = a^2 V_{a1} \quad (3.21)$$

$$V_{c1} = a V_{a1} \quad (3.22)$$

$$V_{b2} = aV_{a2} \quad (3.23)$$

$$V_{c2} = a^2V_{a2} \quad (3.24)$$

$$V_{b0} = V_{c0} = V_{a0} \quad (3.25)$$

สามารถเขียนแรงดัน  $V_a$ ,  $V_b$  และ  $V_c$  ให้อยู่ในรูปของส่วนประกอบสมมาตรของเฟส  $a$  ได้ดังนี้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (3.26)$$

$$V_b = a^2V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (3.27)$$

$$V_c = aV_{a1} + a^2V_{a2} + V_{a0} \quad (3.28)$$

จัดรูปให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

หรือ

$$[V_{abc}] = [A][V_{012}] \quad (3.30)$$

เมื่อนำอินเวอร์สของเมตริกซ์ ( $A^{-1}$ ) คูณในสมการที่ 2.29 เพื่อหาส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันเฟส  $a$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

นำมาเขียนให้อยู่ในรูปสมการทั่วไปได้เป็น

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (3.33)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (3.34)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (3.35)$$

สำหรับกระแสการวิเคราะห์กระแส สามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาเขียนให้อยู่ในรูปสมการทั่วไปได้เป็น

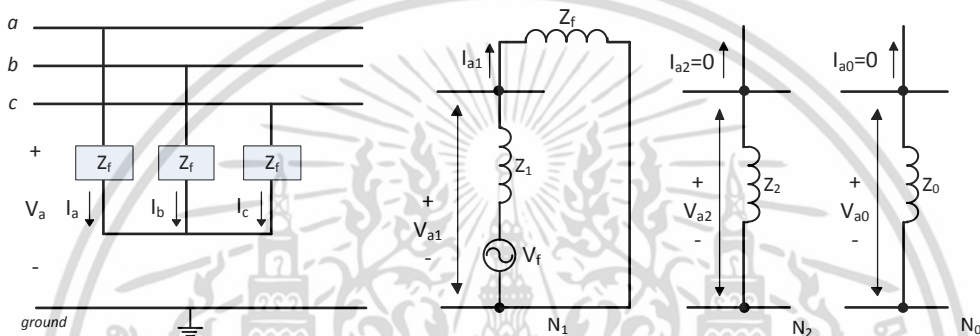
$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (3.38)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (3.39)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (3.40)$$

### 3.3 การวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

3.3.1 ฟอลต์แบบ 3 เฟส (Three Phase Fault) การเกิดฟอลต์แบบ 3 เฟสสมมูลนั้น จะมีอิมพีแดนซ์ในแต่ละสายเท่ากันและมีกระแสลำดับบวกไหลในระบบเท่านั้น และแรงดันไฟฟ้าทุกเฟส



รูปที่ 3.4 (a) ลักษณะการเกิดฟอลต์ 3 เฟสสมมูล (b) วงจรสมมูลเทวินิน [2]

จากรูปที่ 3.4 เมื่อพิจารณากระแสและแรงดันเฟส  $a$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (3.41)$$

โดยที่  $I_{a2} = I_{a0} = 0$  จะได้

$$I_a = I_{a1} \quad (3.42)$$

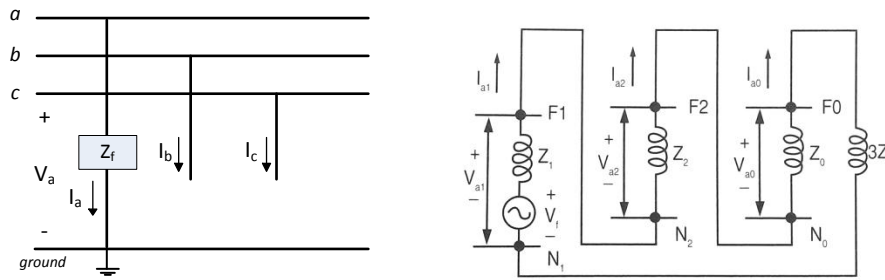
$$V_a = I_a Z_f \quad (3.43)$$

กระแสที่ไหลในระบบจะมีเฉพาะกระแสลำดับบวกเท่านั้น

$$V_{a1} = I_{a1} Z_f = V_f - I_{a1} Z_1 \quad (3.44)$$

$$I_a = I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \quad (3.45)$$

### 3.3.2 ฟอลต์แบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)



รูปที่ 3.5 (a) ลักษณะการเกิดฟอลต์หนึ่งเฟสลงดิน (b) วงจรสมมูลเทวินิน [2]

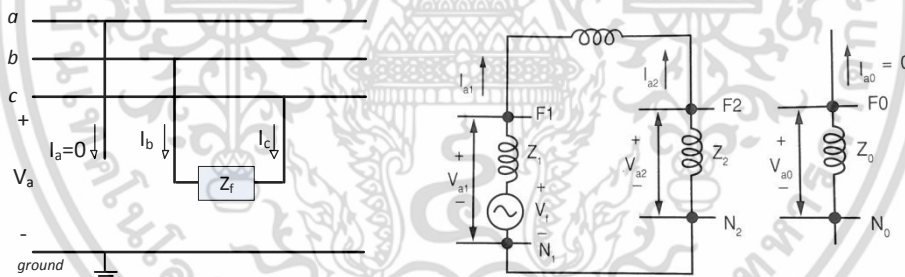
จากรูปที่ 3.5 เมื่อพิจารณากระแสที่ไหลในในวงจรสมมูลจะได้ว่า

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \quad (3.46)$$

จากสมการที่ 3.17 จะได้

$$I_a = 3I_{a1} = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (3.47)$$

3.3.3 ฟอลต์ระหว่างเฟส (Line to Line Fault) การเกิดฟอลต์ระหว่างสายกับสายผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_f$  โดยสมมติการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส b และ c ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 (a) ลักษณะการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส (b) วงจรสมมูลเทวินิน [2]

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบสมมาตรของกระแสจากวงจรสมมูลเทวินินกระแสลำดับศูนย์มีค่า = 0 และ

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (3.48)$$

จากสมการที่ 3.36 เมื่อพิจารณากระแสที่เฟส b และ เฟส c

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} \quad (3.49)$$

$$I_c = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \quad (3.50)$$

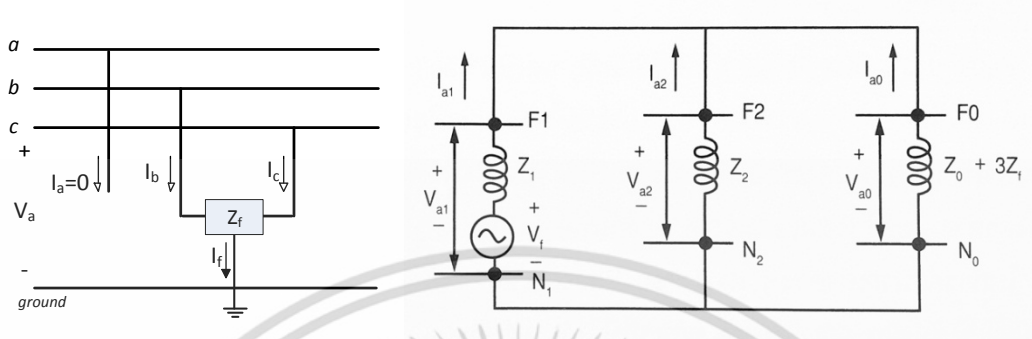
ขณะเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส b กับเฟส c กระแสฟอลต์จะมีขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น (3.51)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_b = -j\sqrt{3} \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (3.52)$$

3.3.4 ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) จะเกิดการลัดวงจรคล้ายกับการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส แต่จะมีการลัดวงจรลงดินด้วยดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 (a) ลักษณะการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (b) วงจรสมมูลเทวินิน [2]

ขณะเกิดฟอลต์แบบ 2 เฟสลงดินนั้น กระแสที่ไหลในเฟส a จะมีค่าเท่ากับศูนย์และกระแสฟอลต์หาได้จาก

$$I_f = I_b + I_c = 3I_{a0} \quad (3.53)$$

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลในรูปที่ 3-7 (ข)

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}} \quad (3.54)$$

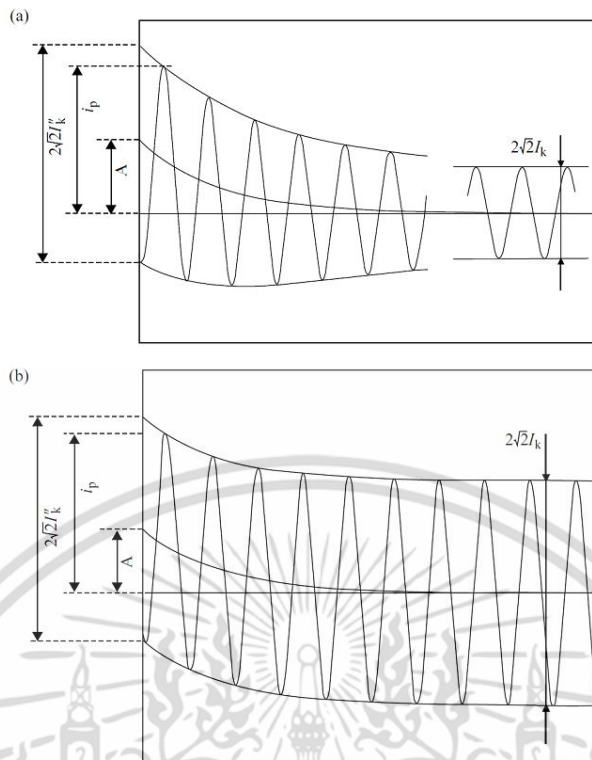
$$I_{a0} = I_{a1} \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (3.55)$$

### 3.4 การคำนวณกระแสฟอลต์ตามมาตรฐาน IEC 60909

โดยทั่วไปแล้วพฤติกรรมของกระแสลัดวงจรนั้นขึ้นอยู่กับบริเวณที่เกิดการลัดวงจรดังรูปที่ 3.8 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสลัดวงจรกับเวลาในกรณีที่เกิดการลัดวงจรใกล้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และในกรณีที่เกิดการลัดวงจรไกลกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามลำดับ ในการพิจารณาว่าเหตุการณ์นั้นเป็นการลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือไม่นั้น พิจารณาจากกระแสลัดวงจรที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์มีค่ามากกว่าสองเท่าของค่าพิกัดหรือไม่ หรือพิจารณาจากกระแสลัดวงจรที่จ่ายจากมอเตอร์ซึ่งโครนส์หรือซึ่งโครนส์มีค่ามากกว่า 5 % ของการลัดวงจรแบบไม่มีมอเตอร์หรือไม่ เป็นต้น

จากรูปที่ 3.8 ด้านล่างในการวิเคราะห์การลัดวงจรแบบใกล้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบกระแสสลับซึ่งประกอบด้วย องค์ประกอบกระแสสลับในสภาวะชั่วคราวย่อย (Sub transient A.C. component) และองค์ประกอบกระแสสลับในสภาวะชั่วคราว (Transient A.C. component) โดยที่องค์ประกอบกระแสสลับในสภาวะชั่วคราวย่อยนั้น อยู่ในช่วงเวลา 0 - 70 ms นับตั้งแต่เกิดการลัดวงจร และองค์ประกอบกระแสสลับในสภาวะชั่วคราว อยู่ในช่วงเวลาใดขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยอาจใช้เวลาถึง 2.2 s สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจรกับเวลา [8]

a) การลัดวงจรแบบใกล้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

b) การลัดวงจรแบบไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในสถานะต่างๆ กรณีที่เกิดการลัดวงจรใกล้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- สถานะชั่วคราวย่อยพิจารณาจากรีแอกแตนซ์ระหว่างขดลวดสเตเตอร์และขดลวดหน่วง (Damping Winding) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ารีแอกแตนซ์สถานะชั่วคราวย่อย  $X_d''$
- สถานะชั่วคราวพิจารณารีแอกแตนซ์ระหว่างขดลวดสเตเตอร์และขดลวดวงจรกระตุ้น (Exciter Winding) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ารีแอกแตนซ์สถานะชั่วคราว  $X_d'$
- สถานะอยู่ตัวพิจารณาจากค่ารีแอกแตนซ์อิมิตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส  $X_d$

จากรูปที่ 3.8 การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นคิดเฉพาะองค์ประกอบกระแสตรงเท่านั้น และละเลยค่าสถานะชั่วคราวทั้งหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรต่างมีวิธีการคำนวณดังนี้

### 3.4.1 ค่ากระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น (Initial symmetrical short-circuit current, $I_k''$ )

ค่ากระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น ( $I_k''$ ) เป็นค่าที่ใช้วิเคราะห์การลัดวงจรทั้งแบบสมมาตร และไม่สมมาตร โดย  $I_k''$  นี้จะยึดตามแรงดันสมมูล และค่าเทวินินอิมพีแดนซ์ ณ จุดที่เกิดการลัดวงจร ซึ่งสามารถหาค่าโดยใช้ระบบองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical component) ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณนี้จะอยู่ในรูปของระบบองค์ประกอบสมมาตร 012 ซึ่งจำเป็นต้องเปลี่ยนให้อยู่ในระบบ ABC โดย  $I_k''$  ในรูปแบบการลัดวงจรต่างๆ สามารถหาได้จากสูตรการคำนวณตามตารางที่ 3.1

โดยที่  $c$  เป็นค่าประกอบแรงดันตามตารางที่ 3.1  
 $U_n$  เป็นค่าแรงดันปกติของระบบ  
 $Z_1; Z_2; Z_0$  เป็นค่าอิมพีแดนซ์ในองค์ประกอบที่ 1, 2 และ 0 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวประกอบแรงดันตามมาตรฐาน IEC 60909-0 [8]

Nominal system voltage $U_n$	Voltage factor $c$ for calculation of	
	Maximal s.-c. current $C_{max}$	Minimal s.-c. current $C_{min}$
LV: 100 V up to 1000 V (inclusive) (IEC 60038, Table I)		
Voltage tolerance + 6%	1.05	0.95
Voltage tolerance + 6%	1.10	0.95
MV: > 1 kV up to 35 kV (inclusive) (IEC 60038, Table III)	1.10	1.00
HV: > 35 kV (IEC 60038, Table IV)	1.10	1.00

หมายเหตุ:  $c_{max} U_n$  ไม่เกินค่าแรงดันสูงสุดของอุปกรณ์  $U_m$

### 3.4.2 ค่ายอดของกระแสลัดวงจร (Peak short-circuit current, $i_p$ )

ค่ายอดของกระแสลัดวงจร ( $i_p$ ) สามารถคำนวณได้ในแต่ละประเภทของการลัดวงจรโดยยึดตามค่า R.M.S. ของค่ากระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น ( $I_k''$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$i_{p3} = k \times \sqrt{2I_{k3}''} \quad (3.56)$$

$$i_{p2} = k \times \sqrt{2I_{k2}''} \quad (3.57)$$

$$i_{p1} = k \times \sqrt{2I_{k1}''} \quad (3.58)$$

ซึ่งแสดงการคำนวณ  $i_p$  ของการลัดวงจรแบบสามเฟส, สองเฟส และหนึ่งเฟสลงดิน ตามลำดับ ซึ่ง  $I_{k3}''; I_{k2}''; I_{k1}''$  คือค่ากระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นของการลัดวงจรทั้งสามประเภทตามลำดับ สำหรับแบบสองเฟสลงดิน ( $i_{p2E}$ ) มีค่าน้อยกว่ากรณีทั้งสามกรณีมาก จึงไม่จำเป็นต้องคิดแยกและตัวประกอบ  $k$  คำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$k = 1.02 + 0.98 \times e^{-3(R/X)} \quad (3.59)$$

ตารางที่ 3.2 สูตรการคำนวณค่า  $I_k''$  ในประเภทต่างๆ ของการลัดวงจร [2]

Type of short-circuit	Equation	Remarks
Three-phase	$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_1 }$	Short-circuited phases A B and C
Double-phase short-circuit without earth connection	$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{ 2Z_1 }$	Short-circuited phases B and C
Double-phase short-circuit with earth connection	$I_{kE2E}'' = \frac{-\sqrt{3}cU_n Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0}$	Current flowing through earth
General	$I_{kE2Y}'' = \frac{-jcU_n (Z_0 - aZ_2)}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0}$	Current of phase B
	$I_{kE2B}'' = \frac{jcU_n (Z_0 - a^2 Z_2)}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0}$	Current of phase C Short-circuit phase B and C
Far-from-generator ( $Z_1 = Z_2$ )	$I_{kE2E}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{ Z_1 + 2Z_0 }$	Current flowing through earth
	$I_{kE2Y}'' = \frac{cU_n  Z_0/Z_1 - a }{ Z_1 + 2Z_0 }$	Current of phase B
	$I_{kE2B}'' = \frac{cU_n  Z_0/Z_1 - a^2 }{ Z_1 + 2Z_0 }$	Current of phase C Short-circuit phase B and C
Line-to-earth single-phase Short-circuit General	$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{ Z_1 + Z_2 + Z_0 }$	
Far-from-generator ( $Z_1 = Z_2$ )	$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{ 2Z_1 + Z_0 }$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 องค์ประกอบกระแสตรง (Decaying aperiodic component,  $i_{dc}$ )  
 ค่าองค์ประกอบกระแสตรงของการลัดวงจรสามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$i_{dc} = \sqrt{2} \times I_k'' \times e^{-2\pi f t \times (R/X)} \quad (3.60)$$

โดยที่  $f$  เป็นความถี่ของระบบ  
 $R$  ค่าความต้านทาน ณ จุดที่เกิดการลัดวงจร  
 $X$  ค่ารีแอกแตนซ์ ณ จุดที่เกิดการลัดวงจร

ค่าอัตราส่วน  $R/X$  ถูกคำนวณในระบบด้วยค่าความถี่สมมูลซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของการลัดวงจรดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ความถี่สมมูลสำหรับคำนวณค่าองค์ประกอบกระแสตรง [2]

Factor	$f \times t$	< 1	< 2.5	< 5	< 12.5
Ratio of equivalent frequency to power system frequency	$f_c / f$	0.27	0.15	0.092	0.055
Example: $f = 50$ Hz	$t$	< 0.02 s	< 0.05 s	< 0.1 s	< 0.25 s
	$f_c$	13.5 Hz	7.5 Hz	4.6 Hz	2.75 Hz
Example: $f = 60$ Hz	$t$	< 0.02 s	< 0.05 s	< 0.1 s	< 0.25 s
	$f_c$	16.2 Hz	9.0 Hz	5.52 Hz	3.3 Hz

3.4.4 ค่ากระแสลัดวงจรสมมาตรหยุดยั้ง (Symmetrical short-circuit breaking current,  $I_b$ )

ในกรณีการลัดวงจรใกล้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมียังมีองค์ประกอบกระแสสลับเกิดขึ้นซึ่งค่าองค์ประกอบกระแสสลับนี้จะค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่สภาวะชั่วคราว ตามรูปที่ 3.8 ค่ากระแสลัดวงจรจะถูกตัดโดยสวิตช์เกียร์ทันทีที่ถึงระยะเวลาดีเลย์ต่ำสุดของระบบป้องกัน การคำนวณค่า  $I_b$  ขึ้นอยู่กับค่า  $I_k''$  และตัวประกอบ  $\mu$  ตามสมการที่ 3.60 ดังนี้

$$I_b = \mu \times I_k'' \quad (3.61)$$

โดยที่ค่าตัวประกอบ  $\mu$  สามารถคำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$\mu = 0.84 + 0.26 \times e^{-0.26(I_{kg}''/I_{rg})} \quad \text{สำหรับ } t_{\min} = 0.02s \quad (3.62)$$

$$\mu = 0.71 + 0.51 \times e^{-0.30(I_{kg}''/I_{rg})} \quad \text{สำหรับ } t_{\min} = 0.05s \quad (3.63)$$

$$\mu = 0.62 + 0.72 \times e^{-0.32(I_{kg}''/I_{rg})} \quad \text{สำหรับ } t_{\min} = 0.10s \quad (3.64)$$

$$\mu = 0.56 + 0.94 \times e^{-0.38(I_{kg}''/I_{rg})} \quad \text{สำหรับ } t_{\min} = 0.25s \quad (3.65)$$

### 3.4.5 ค่ากระแสลัดวงจรในช่วงสภาวะอยู่ตัว (Steady-state short-circuit current, $I_k$ )

ค่ากระแสลัดวงจรในสภาวะอยู่ตัว ( $I_k$ ) ในกรณีเกิดการลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ผลกระทบของการอิ่มตัวของรีแอกแตนซ์, ค่าประกอบกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอื่นๆ สิ่งต่างๆ เหล่านี้ทำให้การคำนวณค่า  $I_k$  มีค่าไม่แน่นอน ซึ่งวิธีการคำนวณค่า  $I_k$  ตามมาตรฐาน IEC 60909-0 นี้ได้คำนวณค่า  $I_k$  ออกมาเป็นช่วงโดยมีค่าตัวประกอบ  $\lambda$  ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนค่ากระแสลัดวงจรสมมาตร เริ่มต้นกับค่ากระแสพิคก์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้น  $I_{k,max}$  และ  $I_{k,min}$  คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$I_{k,max} = \lambda_{max} \times I_{rG} \quad (3.66)$$

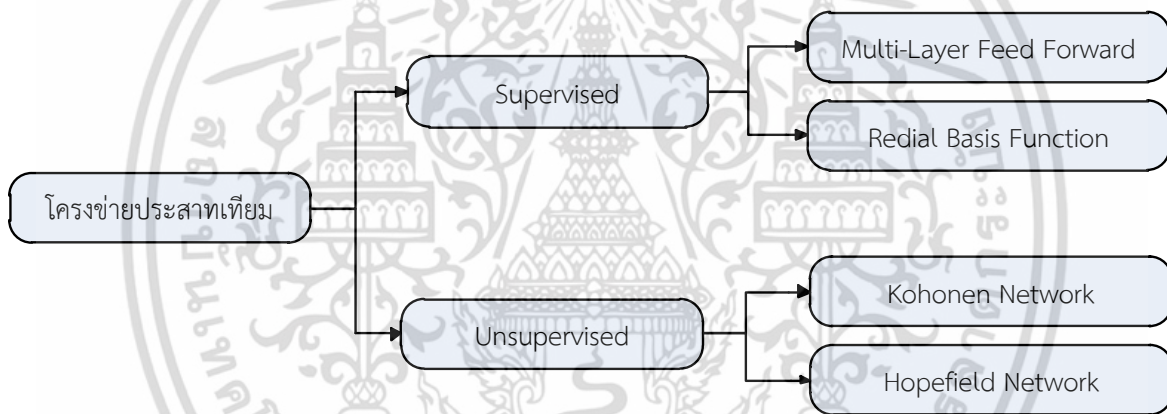
$$I_{k,min} = \lambda_{min} \times I_{rG} \quad (3.67)$$

โดยที่  $I_{rG}$  คือ ค่ากระแสพิคก์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
 $I_{kG}''$  คือ ค่ากระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
 $x_{d,sat}$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์อิ่มตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

## บทที่ 4

### โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network หรือ ANN) เป็นระบบที่มีโครงสร้างและการทำงานของการประมวลผลเหมือนกับสมองของมนุษย์ มีการปรับเปลี่ยนและการเรียนรู้เพื่อสามารถประมวลผลและหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงข่ายประสาทเทียมประกอบไปด้วยหน่วยพื้นฐานที่เรียกว่า เซลล์ประสาท (Neuron) ที่ต่อเชื่อมโยงกัน มีการปรับตัวเองแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเราสามารถสอนระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการเรียนรู้และจดจำข้อมูลหรือฟังก์ชันซับซ้อนต่างๆ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เชื่อมต่อระหว่างหน่วยพื้นฐานเหล่านั้น สำหรับการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมนั้น ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายสาขา เช่น ทางด้านงานวิศวกรรม วิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ จิตวิทยา แพทย์ คณิตศาสตร์ และ เศรษฐศาสตร์ เป็นต้น โดยเราสามารถแบ่งประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมได้ ดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 ประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นเฉพาะโครงข่ายประสาทเทียมแบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised Neural Network) ชนิด Multi-Layer Feed Forward เนื่องจากมีการนำไปใช้งานมากถึงร้อยละ 80 และมีการนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังอย่างแพร่หลาย

## 4.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised Neural Networks)

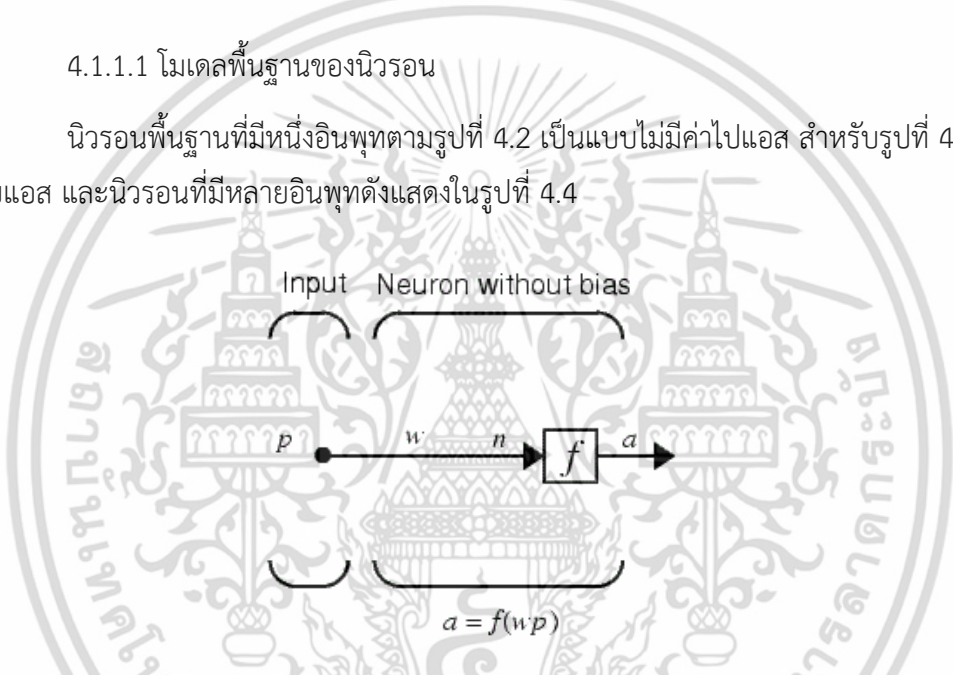
รูปแบบการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนจะต้องใช้ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต ที่เตรียมไว้มาให้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมได้ทำการเรียนรู้และจดจำรูปแบบความสัมพันธ์ต่างๆ ของข้อมูลเหล่านั้น

### 4.1.1 โครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้าแบบหลายชั้น (Multi-Layer Feed Forward Neural Networks)

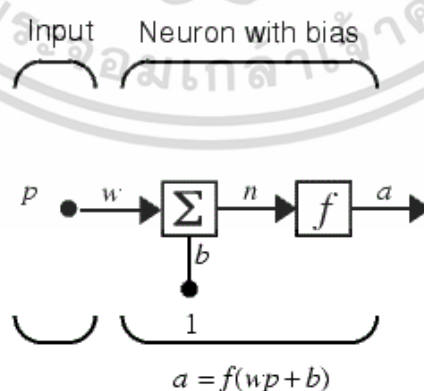
โครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้าแบบหลายชั้น จะมีการเชื่อมโยงระหว่างเซลล์ประสาทเทียมทุกตัว จากชั้นหนึ่งๆ ไปยังเซลล์ประสาทเทียมทุกตัวในชั้นต่อไป บางรูปแบบอาจมีการเชื่อมโยงข้ามชั้นก็ได้ ซึ่งส่วนต่างๆ ของโครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้าแบบหลายชั้นประกอบด้วย

#### 4.1.1.1 โมเดลพื้นฐานของนิวรอน

นิวรอนพื้นฐานที่มีหนึ่งอินพุตตามรูปที่ 4.2 เป็นแบบไม่มีค่าไบแอส สำหรับรูปที่ 4.3 เป็นแบบมีค่าไบแอส และนิวรอนที่มีหลายอินพุตดังแสดงในรูปที่ 4.4

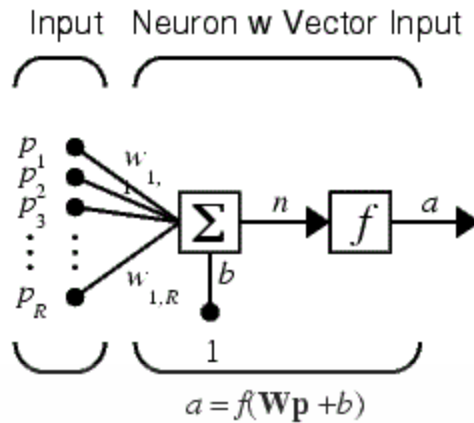


รูปที่ 4.2 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งนิวรอนหนึ่งอินพุตแบบไม่มีไบแอส [4]



รูปที่ 4.3 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งนิวรอนหนึ่งอินพุตแบบมีไบแอส [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งนิวรอนแบบหลายอินพุต [4]

- 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)

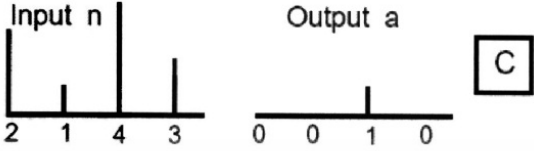
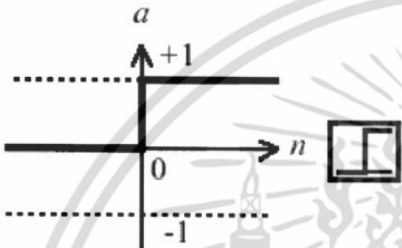
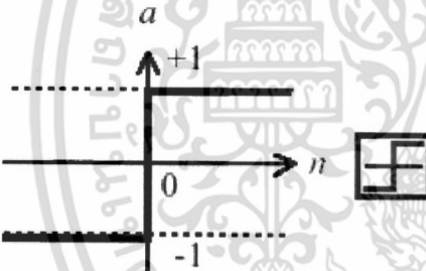
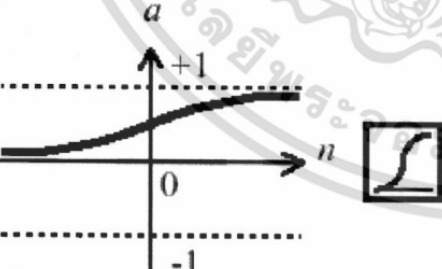
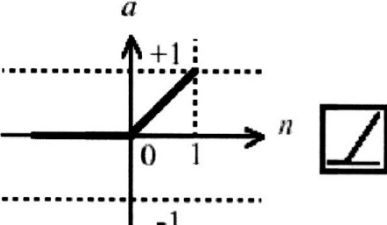
ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นตัวกำหนดค่าเอาต์พุต ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมมีอยู่หลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยเราอาจแบ่งฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นฐานออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. ฟังก์ชันเธอร์โฮลด์ (Threshold Function หรือ Hard Limit Function หรือ Step Function)
2. ฟังก์ชันเชิงเส้นอิ่มตัว (Saturating Linear Function หรือ Piecewise-Linear Function)
3. ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid Function)

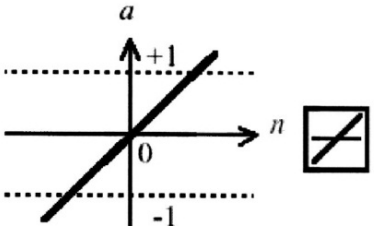
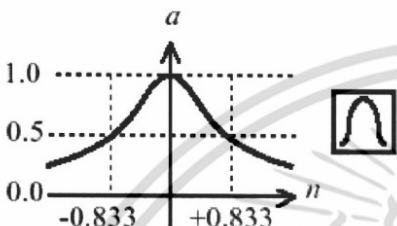
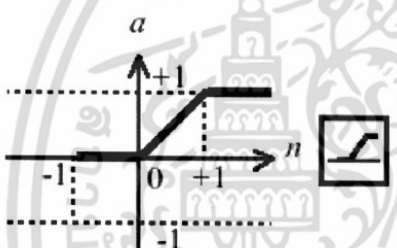
จากฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นฐานทั้ง 3 ชนิด ฟังก์ชันซิกมอยด์เป็นฟังก์ชันที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมกันอย่างมาก เนื่องจากเป็นฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ (Smoothness) โดยทั่วไปฟังก์ชันถ่ายโอนจะจำกัดช่วงเอาต์พุตอยู่ตั้งแต่ 0 ถึง 1 ในการประยุกต์ใช้งานบางกรณีอาจมีความจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันที่ได้ค่าออกมาเหนือช่วงดังกล่าว เช่น ต้องการเอาต์พุตอยู่ในช่วงตั้งแต่ -1 ถึง 1 สำหรับการพิจารณาเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนนั้นยังไม่มีข้อกำหนดที่แน่นอน แต่อาจจะพิจารณาจากองค์ประกอบดังต่อไปนี้

- ความเป็นเชิงเส้น หรือไม่เชิงเส้น
- ลักษณะของข้อมูลอินพุต
- ขอบเขตที่ต้องการและลักษณะของข้อมูลเอาต์พุต

ตารางที่ 4.1 ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน [6]

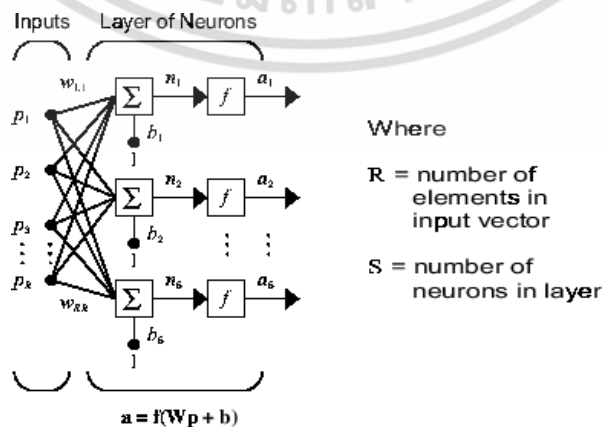
ชนิดฟังก์ชันถ่ายโอน	สมการฟังก์ชันถ่ายโอน
<p>Competitive transfer function</p> 	$a(n_i) = \begin{cases} 1; & i = i^* \\ 0; & i \neq i^* \end{cases}$ <p>when</p> $n_{i^*} \geq n_i, \forall i$ $i^* \leq i, \forall n_i = n_{i^*}$
<p>Hard limit transfer function</p> 	$a(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } n \geq 0 \\ 0 & \text{if } n < 0 \end{cases}$
<p>Symmetric hard limit transfer function</p> 	$a(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } n \geq 0 \\ -1 & \text{if } n < 0 \end{cases}$
<p>Log sigmoid transfer function</p> 	$a(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}$
<p>Positive linear transfer function</p> 	$a(n) = \begin{cases} n & \text{if } n \geq 0 \\ 0 & \text{if } n \leq 0 \end{cases}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดฟังก์ชันถ่ายโอน	สมการฟังก์ชันถ่ายโอน
Linear transfer function 	$a(n) = n$
Radial basis transfer function 	$a(n) = e^{-n^2}$
Saturating linear transfer function 	$a(n) = \begin{cases} 0 & n \leq 0 \\ n & \text{if } 0 \leq n \leq 1 \\ 1 & 1 \leq n \end{cases}$

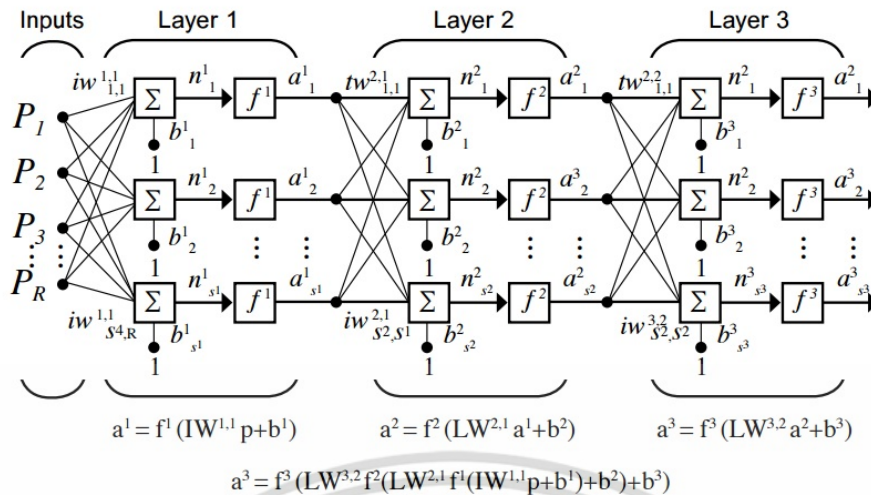
#### 4.1.1.3 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อนำนิเวรอนหลายๆ นิเวรอนมาเรียงขนานกันประกอบขึ้นเป็นชั้น (Layer) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และถ้านำแต่ละชั้นมาเรียงอนุกรมกันก็จะกลายเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น Multi-Layer Feed-Forward Neural Network ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหนึ่งชั้น [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น [3]

ในรูปที่ 4.5 แสดงนิรอนจำนวน 5 ตัวที่ต่อขนานกันประกอบขึ้นเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 1 ชั้น ส่วนในรูปที่ 4.6 จะแสดงโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ที่ประกอบด้วยชั้นอินพุท ชั้นซ่อน (Hidden Layer) ที่ 1, 2 และชั้นเอาต์พุท โดยจะสังเกตได้ว่าในแต่ละชั้นจะมีการเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight,  $w$ ) และค่าไบแอส (Bias,  $b$ )  $a^1, a^2, a^3$  คือเอาต์พุทของชั้นซ่อนที่ 1, ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นเอาต์พุท ตามลำดับ  $f^1, f^2, f^3$  คือฟังก์ชันถ่ายโอนของชั้นซ่อนที่ 1, ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นเอาต์พุทตามลำดับ

ค่า Error,  $e(i)$  เมื่อ  $i = 1, 2, 3, \dots, S^1$  ที่ชั้นเอาต์พุท คือ ผลต่างของเอาต์พุท  $a^3(i)$  ของโครงข่ายประสาทเทียม และค่าเป้าหมาย (target),  $t(i)$  ดังแสดงในสมการที่ 4.2

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

#### 4.1.1.4 ขั้นตอนการเรียนรู้

ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะต้องเตรียมข้อมูลฝึกสอนและต้องอาศัยขั้นตอนวิธีการเรียนรู้เพื่อปรับพารามิเตอร์สองตัวที่สำคัญในกระบวนการเรียนรู้ได้แก่ ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight,  $w$ ) และค่าไบแอส (Bias,  $b$ ) สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นซ่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 มักจะนิยมใช้กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation Learning)

ในกระบวนการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบที่นิยมใช้คือ Log-Sigmoid และ Tan-Sigmoid โดยเฉพาะข้อมูลฝึกสอนที่มีจำนวนมากและมีความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้น (Non-Linear) สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นซ่อน ที่ฝึกสอนแบบแพร่ค่าย้อนกลับ จะนิยมนำไปใช้ในการประมาณค่าฟังก์ชัน เช่น Approximation Function, Pattern Association, Pattern Classification หลักการของการแพร่ค่าย้อนกลับคือ การปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ตามสมการที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อน (Sum-Squared Error, SSE) ตามสมการที่ 4.9 ให้มีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 34 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

โดย  $N$  คือจำนวนของข้อมูลฝึกสอน

การฝึกสอนด้วยวิธีแพร่ค่าย้อนกลับ อาจจะทำให้เกิด Local Minimum มากกว่า Global Minimum ซึ่งถ้า Local Minimum ที่พบเป็นเพียงพอสสำหรับการแก้ปัญหาที่ได้อาจใช้งานได้ แต่ถ้ายังไม่สามารถแก้ปัญหาที่ได้อาจเพิ่มจำนวนชั้นซ่อนจาก 1 ชั้น เป็น 2 ชั้น ซึ่งแน่นอนว่า การเพิ่มจำนวนนิเวรอนหรือจำนวนชั้นซ่อนจะทำให้เวลาในการฝึกสอนเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับในที่นี้จะแนะนำขั้นตอนการเรียนรู้สำหรับการแพร่ค่าย้อนกลับ 2 วิธีคือ

1) The Generalized Delta Rule หรือ Gradient Descent Algorithm จะมีตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัว คือ Adaptive Learning Rate ( $\eta$ ) และ Momentum Term ( $m$ ) ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอส จะถูกปรับโดยสมการที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

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

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

โดยที่  $m$  มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และมักจะมีค่าเริ่มต้นไว้ที่ 0.9 ส่วน  $\eta$  จะตั้งค่าเริ่มต้นไว้ที่ค่าต่างๆ เช่น 0.01 และค่าตัวแปรทั้งสองจะถูกปรับระหว่างการเรียนรู้ดังนี้

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

1. ลดค่า  $\eta$
2. ตั้งค่า  $m = 0$

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

1. เพิ่มค่า  $\eta$
2. ใช้  $m$  ค่าเดิม

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

1. ใช้  $\eta$  ค่าเดิม
2. ใช้  $m$  ค่าเดิม

2) Lavenberg-Marquardt Algorithm ระหว่างการฝึกสอน ค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอส จะถูกปรับโดยสมการ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

$$\Delta w = [J^T(w)J(w) + \mu I]^{-1}J^T(w).e \quad (4.11)$$

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

โดย  $J(w)$  คือ Jacobian Matrix ของอนุพันธ์ของ Error เทียบกับค่าถ่วงน้ำหนัก ( $w$ ) ซึ่งนิยามตามสมการที่ 4.14

$J(b)$  คือ Jacobian Matrix ของอนุพันธ์ของ Error เทียบกับค่าไบแอส ( $b$ ) ซึ่งนิยามตามสมการที่ 4.15

$e$  คือ เมตริกซ์ของ Errors ระหว่างข้อมูลเป้าหมาย (Target Data) และเอาท์พุทของโครงข่ายประสาทเทียม

$\mu$  คือ ค่าคงที่ ซึ่งค่าเริ่มต้นจะถูกตั้งไว้ที่ค่าต่ำๆ

$$J(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e(1)}{\partial w_{3(1,1)}} & \frac{\partial e(1)}{\partial w_{3(1,2)}} & \dots & \frac{\partial e(1)}{\partial w_{3(1,S2)}} \\ \frac{\partial e(2)}{\partial w_{3(2,1)}} & \frac{\partial e(2)}{\partial w_{3(2,2)}} & \dots & \frac{\partial e(2)}{\partial w_{3(2,S2)}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial e(S3)}{\partial w_{3(S3,1)}} & \frac{\partial e(S3)}{\partial w_{3(S3,2)}} & \dots & \frac{\partial e(S3)}{\partial w_{3(S3,S2)}} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$J(b) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e(1)}{\partial b_3(1)} \\ \frac{\partial e(2)}{\partial b_3(2)} \\ \vdots \\ \frac{\partial e(S3)}{\partial b_3(S3)} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

ระหว่างการฝึกสอน  $\mu$  จะถูกปรับค่าดังนี้คือ  $\mu$  จะถูกคูณด้วยค่าคงที่เช่น 10 ถ้า SSE ใหม่มีค่าเพิ่มขึ้นและถูกหารด้วย 10 ถ้า SSE ใหม่มีค่าลดลง

ถ้าการ Normalization ของ  $J^T(w).e$  หรือ  $J^T(b).e$  มีค่าน้อยกว่าค่าต่ำสุดที่กำหนดไว้ หรือ  $\mu$  มีค่ามากกว่าค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ โปรแกรมที่ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะหยุดการฝึกสอนทันที

ข้อแตกต่างระหว่าง The Gradient Algorithm และ Lavenberg-Marquardt Algorithm

สำหรับ Lavenberg-Marquardt Algorithm ทุกอินพุตจะถูกป้อนเข้าไปในโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละรอบของการคำนวณ (Epoch หรือ Iteration) ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสจะถูกปรับเปลี่ยนค่าโดยสมการที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ ในแต่ละรอบของการคำนวณ จะใช้เวลาในการคำนวณนานและใช้หน่วยความจำมากกว่า The Generalised Delta Rule Algorithm แต่ Lavenberg-Marquardt Algorithm จะมีประสิทธิภาพดีกว่าและใช้จำนวนรอบของการคำนวณในการฝึกสอนน้อยกว่า ทำให้ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่า

ส่วน The Generalised Delta Rule Algorithm ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสสำหรับแต่ละอินพุตในทุกๆ รอบการคำนวณ จะถูกปรับเปลี่ยนค่าโดยสมการที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ สำหรับกระบวนการเรียนรู้ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ยังมีอีกหลายวิธี เช่น Gradient Descent, Resilient Back-propagation, Conjugate Gradient, Bayesian Regularization เป็นต้น โดยในการศึกษานี้ จะเลือกใช้วิธี Levenberg-Marquardt Algorithm ในกระบวนการเรียนรู้ ปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าไบแอส เนื่องจากวิธีนี้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงในการแก้ไขปัญหาประเภทการประมาณค่า และยังเป็นวิธีที่มีความรวดเร็วที่สุดในการปรับค่า [5]

## 4.2 การเลือกชนิดของอินพุตและเอาต์พุต

ลักษณะอินพุตและเอาต์พุต มีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ แบบต่อเนื่อง (Continuous) และแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงของระดับโพลตเป็นลักษณะแบบต่อเนื่อง ส่วนการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ (Fault) เป็นลักษณะแบบไม่ต่อเนื่อง

## 4.3 การเลือกรูปแบบของอินพุตและเอาต์พุต

ในกรณีที่ลักษณะของอินพุต และเอาต์พุตเป็นแบบต่อเนื่อง เราสามารถแทนค่าได้ด้วยจำนวนจริง (Real Number) ส่วนในกรณีที่ลักษณะของอินพุตและเอาต์พุตเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง เราสามารถแทนค่าได้ด้วยจำนวนเต็ม ตัวเลขแบบฐานสอง (Binary) หรือเกรย์โค้ด (Gray code)

## 4.4 การนอร์มอลไลซ์ข้อมูลสำหรับสอนโครงข่ายประสาทเทียม

วิธีการดั้งเดิมของการ Normalization ของข้อมูลฝึกสอนมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- ลดเวลาในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม
- เพิ่ม Accuracy ให้กับเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม

โดยการ Normalize ค่าอินพุตและเอาต์พุตก่อนกระบวนการฝึกสอน จะขึ้นอยู่กับการทำ Zero Mean ( $\mu = 0$ ) และ Unity Variance ( $\sigma = 1$ ) ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 37 อังอาจอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สำหรับอินพุทหรือเอาต์พุทใดๆ ถ้าแต่ละอินพุทและเอาต์พุทประกอบด้วย “n” Patterns ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) ใดๆ แล้ว เราสามารถทำการ Normalized โดยสมการที่ 4.16 ถึง 4.19

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

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

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

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

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

$mx$  = ค่าสูงสุดของ  $[Z]$

$mn$  = ค่าต่ำสุดของ  $[Z]$

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

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

$$output = aw \cdot Z_i + bw ; i = 1, 2, \dots, n \quad (4.22)$$

โดย  $a$  และ  $b$  คือช่วงของขอบเขต

ซึ่งเป็นการ Mapping แบบเชิงเส้นระหว่าง  $[0.1, 0.9]$  สำหรับ “n” Patterns ของแต่ละข้อมูลอินพุท และ  $[-0.9, 0.9]$  สำหรับ “n” Patterns ของแต่ละข้อมูลเอาต์พุท ในแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 (Single Hidden Layer) หรือชั้นซ่อนที่ 2 (Two Hidden Layers) จะนิยมใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 38 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ log-sigmoid
- ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ tan-sigmoid

สำหรับเอาต์พุตแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนเอาต์พุต (output layer) ควรจะใช้

- ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ tan-sigmoid

การ scaling หรือ bounding ของข้อมูลฝึกสอน

- ไม่มีความจำเป็นแต่ควรจะทำเมื่อนิวรอนในชั้นซ่อนเอาต์พุตมีฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีขอบเขตเป็นลักษณะ bounded
- ถ้าโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า ไม่มีขีดจำกัดอินพุตที่แน่นอน การ scaling ตัวแปรของอินพุตนั้น ก็ไม่มีความจำเป็น
- มีความสำคัญเมื่อข้อมูลถูกเรียนรู้โดยใช้เอาต์พุตของนิวรอน สามารถทำให้กระบวนการเรียนรู้ง่ายขึ้น ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ทั้งหมดยังคงมีค่าน้อยๆ
- เพื่อการปรับปรุง interpretability ของค่าถ่วงน้ำหนักในโครงข่าย

เพื่อที่จะได้ชุดของ “bias” และ “weight” ที่ดีที่สุด ค่า SSE ที่ถูกเลือกของเอาต์พุตสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม และเป้าหมายของเอาต์พุต ระหว่างการฝึกสอน (Training) และทดสอบ (Testing) จะถูกใช้ในการเลือกค่า “bias” และ “weight” สุดท้าย

เมตริกซ์  $[O]$  คือแต่ละเอาต์พุตที่ถูก normalized และ bounded ระหว่างการ training

เมตริกซ์  $[Q]$  คือ “ $n$ ” Patterns ที่ถูก interpolated ของแต่ละ NNs output ที่จะถูกเปรียบเทียบกับแต่ละ testing output ดังแสดงในสมการที่ 4.23 ถึง 4.24

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

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

สำหรับการทดสอบข้อมูลอินพุตชุดใหม่นั้น เมื่อมีข้อมูลใหม่ถูก tested หรือ recalled แล้ว “ $m$ ” Patterns ของแต่ละอินพุตใหม่จำเป็นต้องถูก 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 ANN จะถูก interpolated โดย เมตริกซ์  $[R]$  และเมตริกซ์  $[H]$  “ $m$ ” Patterns ของแต่ละ test output สำหรับ ANN ที่จะถูกเปรียบเทียบกับแต่ละ target test output จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.25-4.26

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

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

#### 4.5 การเลือกขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

แนวทางหนึ่งที่ใช้ในการเลือกจำนวนของนิวรอนในชั้นซ่อน ในหลายๆ ปัญหา คือ กฎของ “geometric pyramid” โดยที่จำนวนของนิวรอนเป็นลักษณะคล้ายรูปปิรามิด ซึ่งมีจำนวนลดลงจากอินพุตไปยังเอาต์พุต สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า (feed-forward) ที่ประกอบด้วย 1 ชั้นซ่อน จำนวนของนิวรอนในชั้นซ่อนจะคำนวณได้จากสมการที่ 4.27

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

เมื่อ  $c$  คือ จำนวนของตัวแปรอินพุต

$d$  คือ จำนวนของตัวแปรเอาต์พุต

สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า ที่ประกอบด้วย 2 ชั้นซ่อน จำนวนของนิวรอนในชั้นซ่อนในแต่ละชั้นซ่อน จะคำนวณได้จากสมการที่ 4.28 ถึง 4.29

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

$$\text{จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2} = d \cdot r \quad (4.29)$$

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

$c$  คือ จำนวนของตัวแปรอินพุท

$d$  คือ จำนวนของตัวแปรเอาต์พุท

นอกจากนี้ขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม จะสามารถหาได้โดยวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยจะเริ่มจากจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนน้อยๆ และถูกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าสูงสุดที่ตั้งไว้ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะถูกตรวจสอบโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละกลุ่มของข้อมูลฝึกสอน โดยกำหนดให้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนแรกมากกว่าชั้นซ่อนที่สองอยู่หนึ่งหรือสามนิวรอน

สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยกำหนดให้จำนวนนิวรอนในชั้นแรกมากกว่าจำนวนนิวรอนในชั้นที่สองอยู่หนึ่งนิวรอน ส่วนเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมนั้น จะขึ้นอยู่กับจำนวนของนิวรอน ซึ่งอยู่ในชั้นซ่อนและมีความสัมพันธ์กันในลักษณะ Exponential

#### 4.6 วิธีการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

ลักษณะทั่วไปที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม ด้วยวิธีการฝึกสอนที่ใช้มีความสำคัญที่ต้องแน่ใจว่าโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม มีขนาดไม่ใหญ่จนเกินความจำเป็น ซึ่งขึ้นอยู่กับความไม่เป็นเชิงเส้นของการประยุกต์ใช้ที่ถูกรวบรวม

ในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมนั้น อาจจะใช้ข้อมูลที่แตกต่างกัน 3 ชุด ได้แก่ ข้อมูลสำหรับฝึกสอน (training) ข้อมูลสำหรับตรวจสอบความก้าวหน้าในการเรียนรู้ (validation) และข้อมูลสำหรับทดสอบ (test) ซึ่งจะเป็นข้อมูลชุดใหม่ที่โครงข่ายประสาทเทียมไม่เคยเห็นมาก่อน (unseen data) ซึ่งหลังจากการเรียนรู้สิ้นสุดลง โครงข่ายประสาทเทียมจะประมาณค่าเอาต์พุทของข้อมูลชุดทดสอบ

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อความสะดวกและง่ายในการนำไปใช้งาน จึงได้นำข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและทดสอบมาใช้กับโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ โดยเลือกใช้วิธีการฝึกสอนแบบ Levenberg-Marquardt Algorithm โดยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อน และชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอนของแต่ละชั้นเลือกโดยวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อหาค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับการวิเคราะห์กระแสฟลอตต์ในระบบกำลังไฟฟ้า

## บทที่ 5

# ระบบอนุมานนิเวศที่ปรับตัวเองได้

ระบบอนุมานนิเวศที่ปรับตัวเองได้ด้วยวิธีการเรียนรู้แบบโครงข่ายประสาทเทียม (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems : ANFIS) ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อลบข้อจำกัดของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งมีความสามารถในการเรียนรู้ได้ แต่ไม่สามารถอธิบายเหตุผลถึงการได้มาซึ่งคำตอบหรือการตัดสินใจ ในการเรียนรู้ข้อมูลที่มีความคลุมเครือ เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาลักษณะความคลุมเครือนี้ จึงได้มีการนำฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) เข้ามาช่วยโดยทฤษฎีฟัซซี (Fuzzy Set Theory) ซึ่งมีค่าความเป็นสมาชิกของเซตระหว่าง 0 ถึง 1 ในการอธิบายลักษณะของข้อมูลที่คลุมเครือได้ ใช้หลักการของเหตุผลเข้ามาเกี่ยวข้องในระดับสูง โดยใช้ตัวแปรทางภาษาที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งจะบอกค่าระดับความชัดเจนในรูปของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) เพียงแต่ฟัซซีลอจิกไม่สามารถเรียนรู้ในการปรับแต่งโครงสร้างได้ด้วยตนเอง และยังคงต้องการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญหรือผู้ที่มาบังคับควบคุมในการคัดเลือกกฎที่จะนำมาใช้คำนวณ

จากข้อจำกัดของโครงข่ายประสาทเทียมและฟัซซีลอจิก จึงได้มีการวิจัยคิดค้นวิธีการผสมผสานระบบและประยุกต์ระบบทั้งสองเข้าด้วยกัน เพื่อจะแก้ไขปัญหาข้อด้อยของแต่ละวิธี กล่าวคือ เป็นการรวมความสามารถในการเรียนรู้และปรับตัวเองของโครงข่ายประสาทเทียม กับความรู้ของผู้เชี่ยวชาญและความสามารถในการให้เหตุผลของฟัซซีลอจิก กลายเป็นระบบประสานอัจฉริยะ (Hybrid Intelligent System, HIS) มีชื่อวาระบบฟัซซีนิวรอนเน็ตเวิร์ค (Fuzzy Neural Network) หรือเป็นที่รู้จักกันมาก ได้แก่ ANFIS หรือ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems เป็นระบบอนุมานฟัซซีบนพื้นฐานโครงข่ายที่ปรับตัวเองได้ด้วยวิธีการเรียนรู้แบบโครงข่ายประสาทเทียม

### 5.1 พื้นฐานแนวคิดแบบฟัซซี

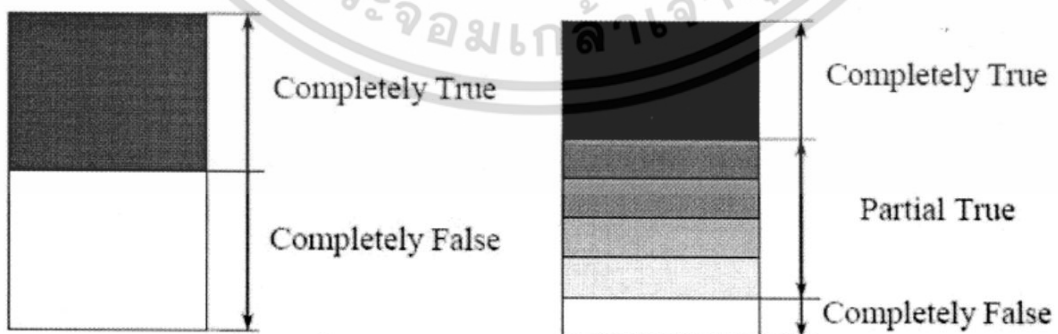
ฟัซซีลอจิกหรือตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความคลุมเครือ ไม่ชัดเจนคล้ายกับตรรกะทางความคิดของมนุษย์ คิดค้นโดย L.A. Zadeh ในปี ค.ศ. 1965 ที่อาศัยฟัซซีเซต (Fuzzy Set) เพื่อสื่อถึงความไม่แน่นอน โดยในฟัซซีเซตนี้จะกำหนดค่าความเป็นสมาชิก (Degree of Membership) ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 ซึ่งแตกต่างจากเซตแบบฉบับ (Classical Set) ที่มีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกเพียงสองค่าเท่านั้นคือ 0 หมายถึงไม่เป็นสมาชิก และ 1 หมายถึงเป็นสมาชิก การกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่สนใจนั้นอาศัยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู ฟังก์ชันซิกมอยด์ ฟังก์ชันเกาส์เซียน เป็นต้น การเลือกใช้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกจะขึ้นอยู่กับข้อมูลของตัวแปรนั้นๆ นอกจากนี้ ฟัซซีเซตยังใช้กับตัวแปรเชิงภาษา (linguistic Variables) เพื่อแสดงคุณภาพหรือปริมาณได้อีกด้วย โครงสร้างพื้นฐานของระบบฟัซซี แสดงดังรูป 5.1 โดยการทำงานของระบบฟัซซีมี 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การแปลงค่าของข้อมูลด้านเข้า (Crisp Input) โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ขั้นตอนที่ 2 การอนุมานหรือเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 42 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตีความ (Fuzzy Inferencing) เป็นการนำค่าฟัซซีด้านเข้า เพื่อตีความหรืออนุมานผ่านกฎฟัซซีที่ตั้งขึ้นมาและได้ผลลัพธ์เป็นค่าฟัซซีด้านออก โดยกฎฟัซซีที่นิยมใช้คือ กฎฟัซซีแบบ ถ้า-แล้ว (Fuzzy If-Then Rule) ที่อาศัยหลักการของเหตุและผล และในขั้นตอนสุดท้าย การทำค่าฟัซซีให้เป็นค่าปกติ (Defuzzification) เป็นการนำค่าฟัซซีด้านออกมาแปลงเป็นค่าปกติ (Crisp Output) ซึ่งมีหลายวิธี เช่น วิธีถัวเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก, วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการทำงานของฟัซซีลอจิก คล้ายกับโครงข่ายประสาทเทียม ในการประมาณค่าความสัมพันธ์ ต่างกันที่ฟัซซีลอจิกไม่ได้ใช้การเรียนรู้ แต่อาศัยองค์ความรู้ที่มีอยู่ในฐานข้อมูล (Knowledge Base)



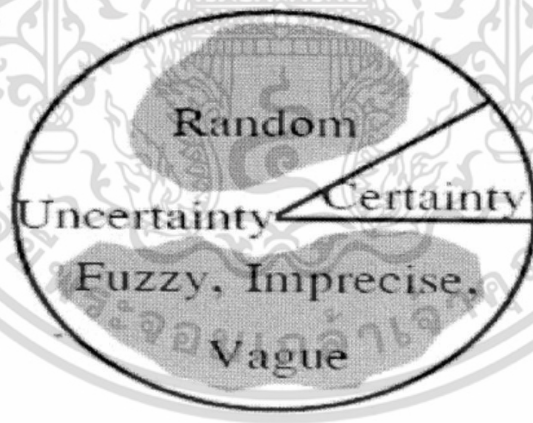
รูปที่ 5.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบฟัซซี [4]

เหตุผลแบบฟัซซี (Fuzzy Logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูล โดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิธีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ฟัซซีลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่าเหตุผลแบบเท็จจริง (Boolean Logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial True) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (Completely True) กับเท็จ (Completely False) ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น ดังแสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 เหตุผลแบบจริงเท็จ (Boolean Logic) และเหตุผลแบบฟัซซี (Fuzzy Logic) [6]

ความเป็นฟัซซี (Fuzziness) มีชื่อเรียกว่า มัลติวาลานซ์ (Multivalance) ซึ่งมีค่าที่ความเป็นสมาชิกมากกว่า 2 ค่า และแตกต่างกับไบวาลานซ์ (Bivalance) ที่มีความเป็นสมาชิกเพียง 2 ค่า ฟัซซีเซต (Fuzzy Set) เป็นเครื่องมือและกำหนดรูปแบบ (Modeling) ของลักษณะความไม่แน่นอนที่เป็นความคลุมเครือ ความไม่ตายตัว รวมถึงการขาดข้อมูลบางส่วน โดยทฤษฎีของฟัซซีเซตจะใช้ลักษณะความหมายของตัวแปร (Linguistic) มากกว่าปริมาณ (Quantitative) ของตัวแปร เช่น การหาความหมายของ “คนที่อ้วน” เราไม่สามารถนิยามค่าความอ้วนที่ตรงกันและระบุเป็นหนึ่งเดียว (Identical) สำหรับคนที่อ้วน นาย A 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 แต่หากพิจารณาจากกลุ่มคนที่น้ำหนัก 90 กิโลกรัม บุคคลนี้ก็จะไม่จัดอยู่ในกลุ่มคนที่อ้วน แสดงให้เห็นว่า ความอ้วนไม่ได้มีลักษณะความไม่แน่นอนแบบสุ่ม จากการศึกษาปัญหาต่างๆ ไป จะแสดงถึงรูปแบบลักษณะการกระจายของปัญหา รูปที่ 5.3 เป็นการแสดงให้เห็นว่าแนวทางในการตัดสินใจของปัญหาทั้งหมดมีเพียงส่วนน้อยที่เป็นสิ่งแน่นอน (Certainty) ที่เหลือคือสิ่งที่ไม่แน่นอน ซึ่งประกอบด้วยความไม่แน่นอนที่มีลักษณะแบบสุ่ม และความไม่แน่นอนที่มีลักษณะเป็นฟัซซี หรือคลุมเครือ ซึ่งมีมากกว่าร้อยละ 40 เพราะปัญหาส่วนมากเกี่ยวข้องกับการตัดสินใจของมนุษย์ซึ่งจะตัดสินใจตามพื้นฐานความคิดของตนเป็นหลัก



รูปที่ 5.3 ความไม่แน่นอน (Uncertainty) [6]

ฟัซซีจะสร้างวิธีทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความคลุมเครือ ความไม่แน่นอนของระบบที่เกี่ยวข้องกับความคิดความรู้สึกของมนุษย์ เมื่อพิจารณาส่วนประกอบต่างๆ ในความไม่แน่นอนเพื่อกำหนดเงื่อนไขในการตัดสินใจ (Decision Making) โดยอาศัยเซตของความไม่เป็นสมาชิก

## 5.2 โครงสร้างของระบบนิเวศน์ประสาทแบบปรับตัวได้

โครงสร้างพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 5.4 โหนดรูปสี่เหลี่ยมแสดงถึงโหนดที่มีพารามิเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้ ในขณะที่โหนดรูปวงกลมแสดงถึงโหนดที่ไม่สามารถปรับค่าของพารามิเตอร์ได้ ซึ่งเป็นกรณีที่มีข้อมูลด้านเข้า 2 ตัว คือ  $x_1$  และ  $x_2$  และมีข้อมูลด้านออกเพียงตัวเดียว คือ  $y$  และมีกฎฟuzzy แบบ Takagi-Sugeno-Kang (TSK) จำนวน 2 กฎดังนี้

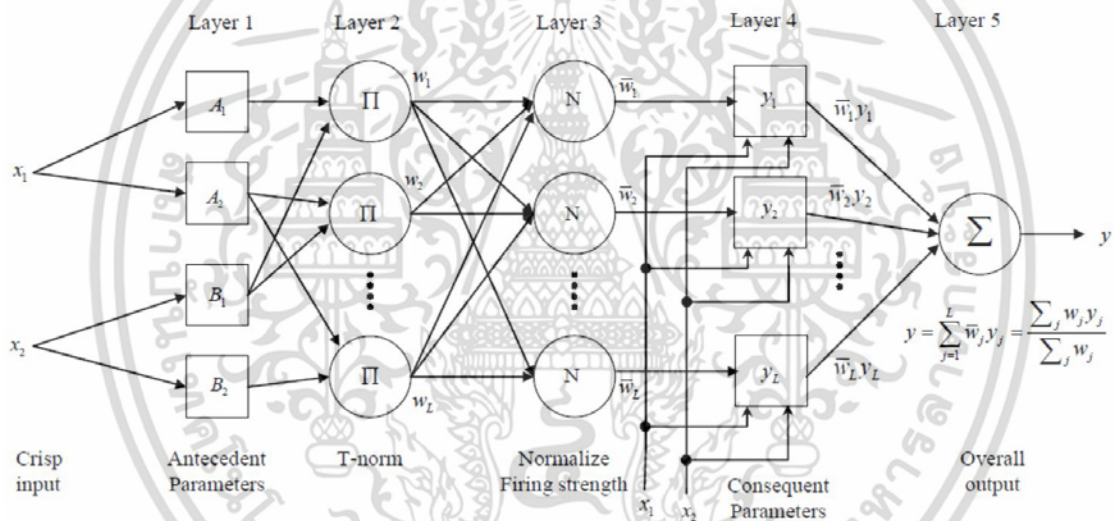
$$\text{กฎข้อที่ 1 : ถ้า } x_1 \text{ คือ } A_1 \text{ และ } x_2 \text{ คือ } B_1 \text{ แล้ว } y_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1$$

$$\text{กฎข้อที่ 2 : ถ้า } x_1 \text{ คือ } A_2 \text{ และ } x_2 \text{ คือ } B_2 \text{ แล้ว } y_2 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2$$

⋮

$$\text{กฎข้อที่ } L : \text{ ถ้า } x_1 \text{ คือ } A_L \text{ และ } x_2 \text{ คือ } B_L \text{ แล้ว } y_L = p_Lx_1 + q_Lx_2 + r_L$$

โดยที่  $A_1, A_2, B_1$  และ  $B_2$  เป็นฟuzzyเซตของพจน์ภาษา เช่น เล็ก กลาง ใหญ่ ส่วน  $p_1, p_2, q_1, q_2, r_1$  และ  $r_2$  เป็นพารามิเตอร์ของข้อมูลตามกฎฟuzzy



รูปที่ 5.4 โครงสร้างของระบบอนุมานนิเวศน์ประสาทแบบปรับตัวได้ [4]

โครงสร้างของ ANFIS แบ่งออกเป็น 5 ชั้น ได้แก่

### 5.2.1 Premise Parameters Layer

ชั้นที่ 1 ทำหน้าที่แปลงข้อมูลด้านเข้า ( $x$ ) เป็นค่าฟuzzy โดยการคำนวณค่าความเป็นสมาชิก ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก  $\mu_{A_i}(x_1)$  และ  $\mu_{B_i}(x_2)$  อาจเป็นฟังก์ชันรูประฆังคว่ำหรือฟังก์ชันอื่นๆ ที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ เช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู และโหนดในชั้นนี้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแสดงว่าค่าพารามิเตอร์สามารถปรับค่าได้ ซึ่งพารามิเตอร์ในโหนดนี้ หมายถึงพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เรียกว่า พารามิเตอร์ข้อตั้ง (Premise Parameters)

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x_1), i = 1, 2 \quad (5.1)$$

$$O_i^1 = \mu_{B_i}(x_2), i = 3, 4 \quad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $O_i^1$  คือ ผลลัพธ์ของชั้นที่ 1 โดยค่าความเป็นสมาชิกเป็นสมาชิกด้านเข้า  
 $\mu_{A_i}(x_1)$  คือ ค่าความเป็นสมาชิกด้านเข้า  $x_1$  ในฟัซซีเซต  $A_i$  ของโหนดที่  $i$   
 และ  $\mu_{B_i}(x_2)$  คือ ค่าความเป็นสมาชิกด้านเข้า  $x_2$  ในฟัซซีเซต  $B_i$  ของโหนดที่  $i$   
 ซึ่งชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอาจเป็นแบบระฆังคว่ำ

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{x-c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (5.3)$$

หรือแบบเกาเสียน เช่น

$$\mu_{A_i}(x) = \exp \left( - \left( \frac{x-c_i}{a_i} \right)^2 \right) \quad (5.4)$$

เมื่อ  $\{a_i, b_i, c_i\}$  เป็นเซตพารามิเตอร์  $c_i$  เป็นค่ากลางของฟังก์ชัน,  $a_i$  และ  $b_i$  เป็นตัวกำหนดความชันของฟังก์ชัน ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอื่นๆ ที่สามารถหาค่าอนุพันธ์ได้ เช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function) ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Trapezoidal Membership Function)

### 5.2.2 T-norm Operator Layer

ชั้นที่ 2 ทำหน้าที่คูณสัญญาณที่ส่งมาจากชั้นที่ 1 เข้าด้วยกันโดยใช้ T-norm Operator และส่งออกไปยังชั้นที่ 3 ซึ่งจำนวนโหนดในชั้นนี้จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของกฎฟัซซีและสัญญาณที่ส่งออกไป ( $w$ ) เป็น Firing Strength ของกฎแต่ละข้อ โหนดในชั้นนี้เป็นรูปวงกลมคือ ไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้ โดยมีสัญลักษณ์เป็นเครื่องหมาย  $\Pi$

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x_1)\mu_{B_i}(x_2), i = 1,2 \quad (5.5)$$

เมื่อ  $w_i$  เป็นค่า Firing Strength จากกฎแต่ละข้อ

### 5.2.3 Normalized Firing Strength Layer

ชั้นที่ 3 ทำหน้าที่ปรับค่า Firing Strength ให้มีผลรวมจากทุกกฎทุกข้อมีค่าเป็นหนึ่ง โดยการหาค่า Firing Strength ด้วยผลรวมของ Firing Strength จากกฎทุกข้อ ผลลัพธ์ที่ได้เรียกว่า Normalized Firing Strength ( $\bar{w}$ ) โหนดในชั้นนี้เป็นรูปวงกลมแสดงว่าไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้ โดยมีสัญลักษณ์เป็นเครื่องหมาย  $N$

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1,2 \quad (5.6)$$

### 5.2.4 Consequent Parameters Layer

ชั้นที่ 4 ทำหน้าที่คำนวณผลลัพธ์จากข้อตามกฎฟัซซี โดยให้ผลลัพธ์เป็น  $\bar{w}_i(p_i x_1 + q_i x_2 + r_i)$  สำหรับกฎข้อที่  $i$  โหนดในชั้นนี้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแสดงว่าพารามิเตอร์ของโหนดนี้ ( $p_i, q_i$  และ  $r_i$ ) สามารถปรับค่าได้ พารามิเตอร์เหล่านี้เรียกว่า พารามิเตอร์ของข้อตาม (Consequent Parameters) สำหรับข้อมูลด้าน

ออกจากชั้นนี้หาได้จากสมการที่ 5.7

$$O_i^4 = \bar{w}_1 y_i = \bar{w}_1 (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i), \quad i = 1, 2 \quad (5.7)$$

โดยที่  $(p_i, q_i$  และ  $r_i)$  เป็นเซตของค่าพารามิเตอร์ใน Rule Consequent ซึ่งใช้การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least means square) สำหรับการกำหนดค่าพารามิเตอร์

### 5.2.5 Overall Output Layer

ชั้นที่ 5 ทำหน้าที่รวบรวมสัญญาณจากทุกโหนดของชั้นที่ 4 เข้าด้วยกัน ได้เป็นข้อมูลด้านออก ( $y$ ) โหนดในชั้นนี้เป็นรูปวงกลมแสดงว่าไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้ โดยมีสัญลักษณ์ของโหนดเป็นเครื่องหมาย  $\Sigma$  สำหรับข้อมูลด้านออกหาได้จากสมการที่ 5.8

$$O_i^5 = \bar{w}^T y = \sum_{i=1}^2 \bar{w}_1 y_i = \frac{\sum_{i=1}^2 w_i y_i}{w_1 + w_2} \quad (5.8)$$

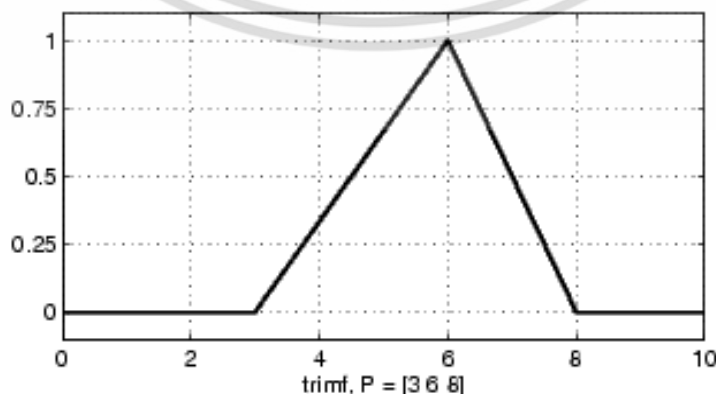
## 5.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี เพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรหรือสมมาตรกันทุกประการก็ได้ ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีหลายชนิด ดังนี้ [4]

### 5.3.1 ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function)

ฟังก์ชันสามเหลี่ยมมีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์คือ  $\{a, b, c\}$

$$\text{Triangular}(x: a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a)/(b - a) & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b) & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (5.9)$$



รูปที่ 5.5 Triangular Function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 Trapezoidal Function ฟังก์ชันนี้จะมีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมคางหมู โดยจะมีรูปร่างขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ตัว คือ  $a, b, c$  และ  $d$  ตามสมการที่ 5.10 ฟังก์ชันชนิดนี้เป็นฟังก์ชันที่นิยมใช้กันอีกฟังก์ชันหนึ่งเช่นเดียวกับฟังก์ชันสามเหลี่ยม

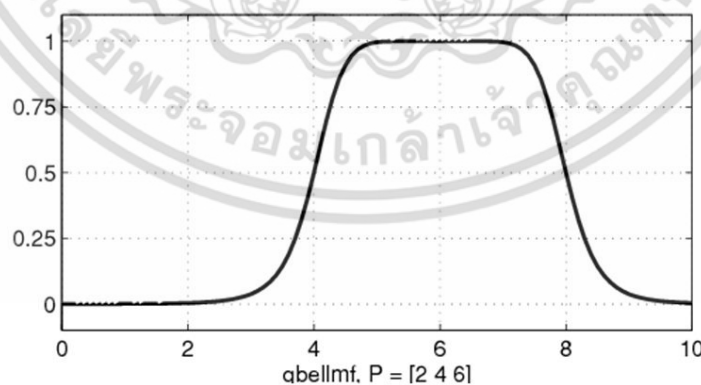
$$\text{Trapezoidal } f(x: a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a)/(b - a) & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ (d - x)/(d - c) & c \leq x \leq d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (5.10)$$



รูปที่ 5.6 Trapezoidal Function

5.3.3 Bell-shaped Function ฟังก์ชันรูประฆังคว่ำ มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ตัวคือ  $\{a, b, c\}$

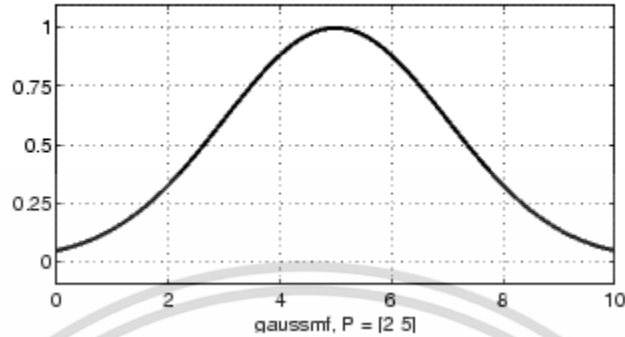
$$\text{Bell-shaped } f(x: a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (5.11)$$



รูปที่ 5.7 Bell-shaped Function

5.3.4 Gaussian Function ฟังก์ชันเกาส์เซียนมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ตัวคือ  $\sigma$  และ  $c$

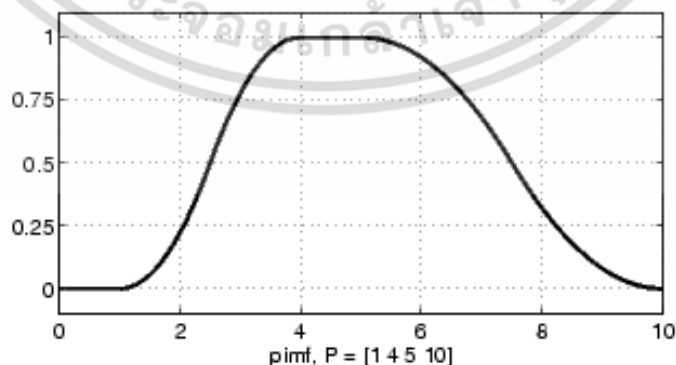
$$\text{Gaussian } f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.12)$$



รูปที่ 5.8 Gaussian Function

5.3.5 Pi Function ฟังก์ชันชนิดนี้จะเป็นรูปร่างคล้ายระฆัง โดยจะมีด้านข้างทั้ง 2 ด้านเป็น S-function ฟังก์ชันชนิดนี้มีรูปร่างคล้ายกับ Triangular Function เพียงแต่ต่างกันตรงที่ด้านข้างของ Pi-Function ที่จะเป็น S-function จะค่อยๆ ลาดลงเป็นศูนย์มากกว่า ถ้าเทียบกับ Triangular Function รูปที่ 3 จะสังเกตเห็นได้ว่า ตัวแปร  $b$  คือค่าความกว้างที่ Crossover point ของ Pi-Function เท่ากับศูนย์ ที่  $x = c \pm b$  และ Crossover point จะอยู่ที่  $x = \frac{c \pm b}{2}$  เมื่อมีค่าเป็น 0.5

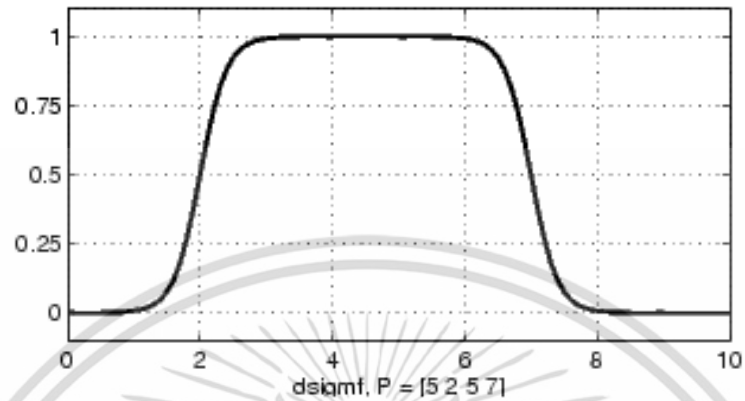
$$\text{Pi Function } (x, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ 2((x-a)/(b-a))^2 & a \leq x \leq (a+b)/2 \\ 1 - 2((x-a)/(b-a))^2 & (a+b)/2 \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ 1 - 2((x-c)/(d-c))^2 & c \leq x \leq (c+d)/2 \\ 2((x-d)/(d-c))^2 & (c+d)/2 \leq x \leq d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (5.13)$$



รูปที่ 5.9 Pi-Function

5.3.6 dsig Function เป็นผลต่างฟังก์ชันที่เกิดจากผลของ Sigmoidal Functions 2 ฟังก์ชันที่มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่า คือ  $a$  และ  $c$

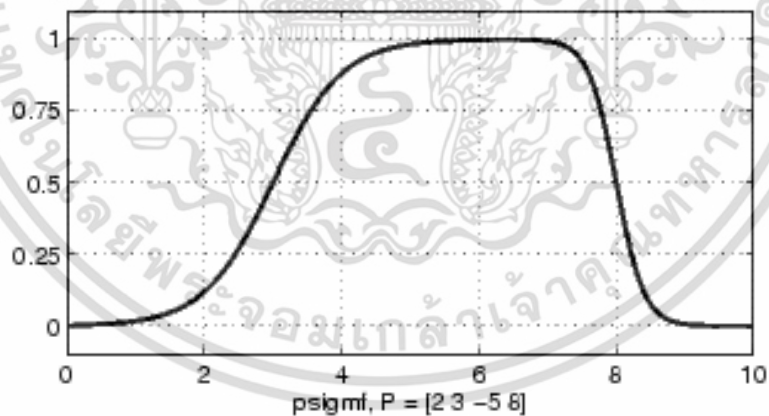
$$\text{Sigmoidal } f(x: a_1, c_1, a_2, c_2) = \frac{1}{1+e^{-a_1(x-c_1)}} - \frac{1}{1+e^{-a_2(x-c_2)}} \quad (5.14)$$



รูปที่ 5.10 dsig function

5.3.7 psig function เป็นผลคูณฟังก์ชันที่เกิดจากผลของ sigmoidal function 2 ฟังก์ชันที่มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่า คือ  $a$  และ  $c$

$$\text{Sigmoidal } f(x: a_1, c_1, a_2, c_2) = \frac{1}{1+e^{-a_1(x-c_1)}} \times \frac{1}{1+e^{-a_2(x-c_2)}} \quad (5.15)$$



รูปที่ 5.11 psig function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 ขั้นตอนการเรียนรู้แบบผสมของ ANFIS

การเรียนรู้แบบผสมผสาน (Hybrid Learning) เป็นการผสมผสานการเรียนรู้ระหว่างวิธีปรับตามความลาดชัน (Gradient Method) คือการปรับด้วยวิธีความลาดชันสูงสุดของค่าที่ผิดพลาดในส่วนของการปรับพารามิเตอร์หลักฐาน และวิธีประเมินกำลังสองต่ำสุด (Least Squares Estimate) วิธีปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยการประเมินค่ากำลังสองต่ำสุดในส่วนการปรับพารามิเตอร์ผลลัพธ์ในแต่ละรอบการเรียนรู้ จากโครงสร้างของ ANFIS เมื่อค่า พารามิเตอร์หลักฐานถูกกำหนดไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลง เอาท์พุททั้งหมดสามารถแสดงอยู่ในรูปของผลรวมเชิงเส้นของพารามิเตอร์ผลลัพธ์ในลักษณะของเอาท์พุท  $y$  ในรูป 5.3 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{w_1}{w_1+w_2} y_1 + \frac{w_2}{w_1+w_2} y_2 \\
 &= \bar{w}_1 y_1 + \bar{w}_2 y_2 \\
 &= (\bar{w}_1 x_1) p_1 + (\bar{w}_1 x_2) q_1 + r_1 \\
 &\quad + (\bar{w}_2 x_1) p_2 + (\bar{w}_2 x_2) q_1 + r_2
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

ซึ่งคือเส้นตรงในพารามิเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์  $p_1, q_1, r_1, p_2, q_2$  และ  $r_2$  ดังนั้นขั้นตอนวิธีการเรียนรู้แบบผสม มีการพัฒนาในส่วนก่อนหน้านี้ สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงมากขึ้น โดยเฉพาะในส่วนคำนวณไปข้างหน้าของขั้นตอนวิธีการเรียนรู้แบบผสม โหนดเอาท์พุทส่งผ่านไปข้างหน้าจนกระทั่งชั้นที่ 4 และพารามิเตอร์ผลลัพธ์ถูกตรวจสอบโดยวิธีการกำลังสองต่ำสุด ในส่วนการคำนวณค่าย้อนกลับสัญญาณค่าผิดพลาดถูกแพร่กลับมา และพารามิเตอร์หลักฐานถูกปรับค่าตามความลาดชัน ตารางที่ 5.1 สรุปกิจกรรมในแต่ละส่วน

ตารางที่ 5.1 การส่งผ่านในกระบวนการเรียนรู้แบบผสมสำหรับ ANFIS

	ส่งผ่านไปข้างหน้า	ส่งผ่านย้อนกลับ
พารามิเตอร์หลักฐาน	คงที่	ปรับด้วยวิธีความลาดชันที่สุด
พารามิเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์	ปรับด้วยวิธีประเมินค่ากำลังสองต่ำสุด	คงที่
สัญญาณ	โหนดเอาท์พุท	สัญญาณความผิดพลาด

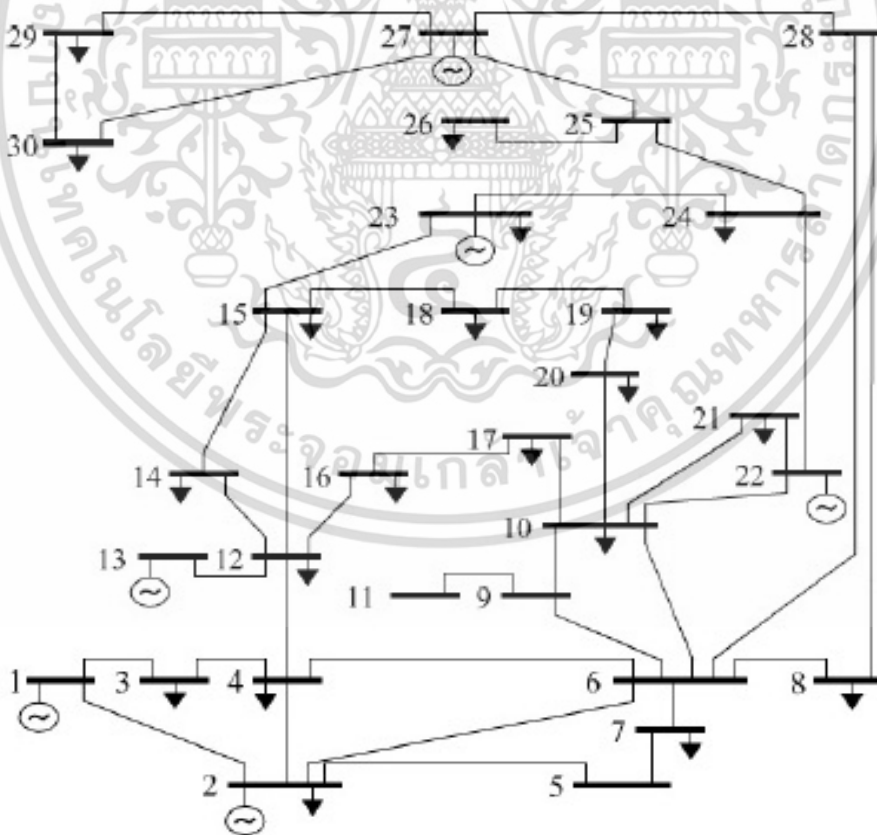
## บทที่ 6

# การวิเคราะห์กระแสฟอลต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม และระบบอนุมานนิเวศวิทยาแบบปรับตัวได้

### 6.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการจำลอง

ระบบที่ใช้ในการจำลองเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลของกระแสฟอลต์ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ระบบไฟฟ้า 2 ระบบ ได้แก่ ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส และระบบไฟฟ้าจริงในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม Powerworld กับผลที่ได้จากระบบประสาทเทียม กับระบบไฟฟ้ามาตรฐานและระบบไฟฟ้าจริง

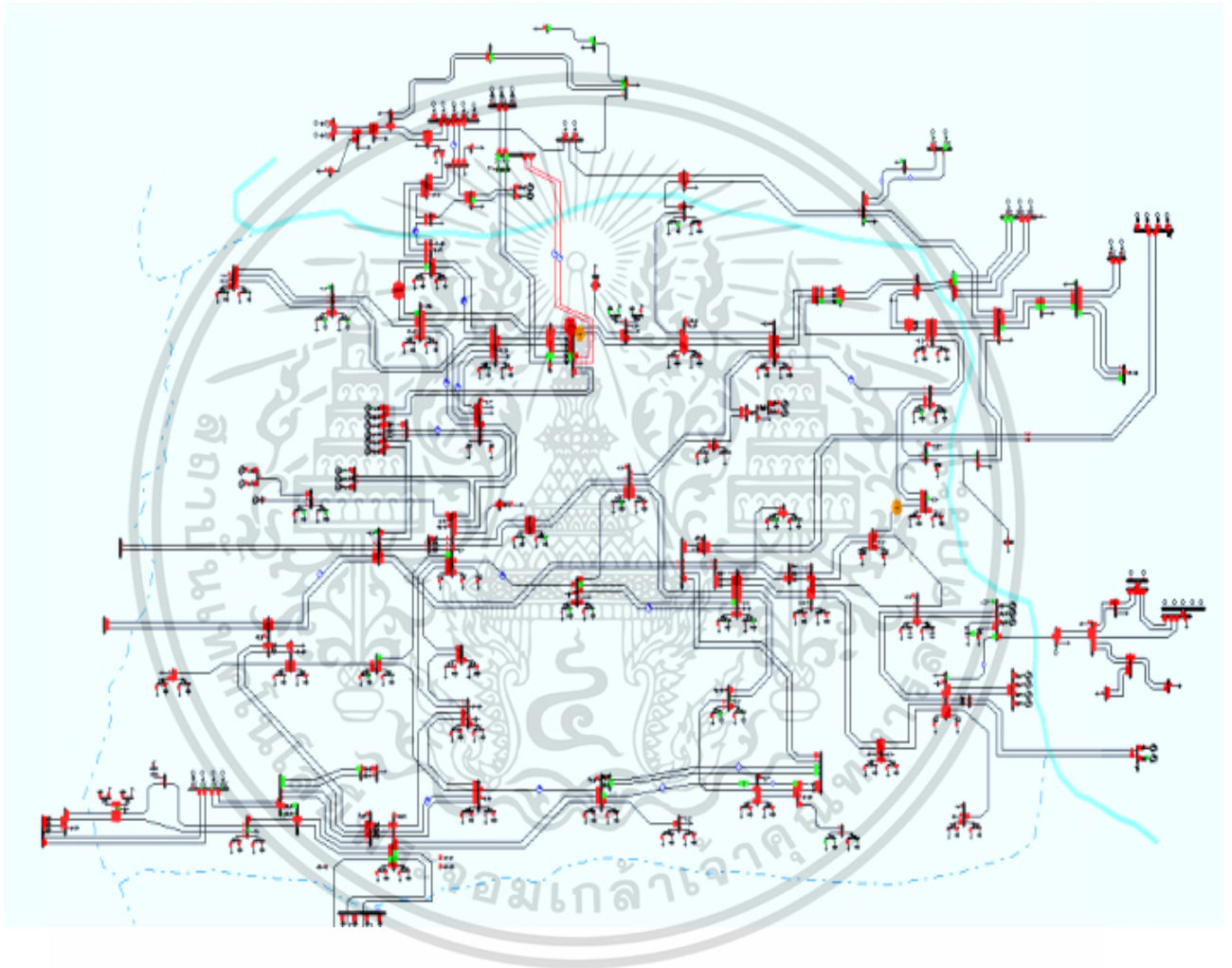
6.1.1 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส เป็นระบบไฟฟ้ามาตรฐานขนาดกลาง ประกอบไปด้วยบัสทั้งหมด 30 บัส แบ่งเป็นขนาดแรงดัน 132 kV จำนวน 9 บัส แรงดัน 33 kV จำนวน 18 บัส และ แรงดัน 11 kV จำนวน 3 บัส มีสายส่งเชื่อมโยงทั้งหมด 41 วงจร เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 เครื่อง และมีกำลังผลิตรวมทั้งระบบ 460 MW



รูปที่ 6.1 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.2 ระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ซึ่งประกอบไปด้วยบัสทั้งหมด 73 บัส แบ่งเป็นระดับแรงดัน 230 kV จำนวน 17 บัส และขนาดแรงดัน 115 kV จำนวน 56 บัส มีสายส่งทั้งหมด 85 วงจร แบ่งเป็นสายส่งระดับแรงดัน 230 kV จำนวน 12 วงจร และสายส่งระดับแรงดัน 115 kV จำนวน 73 วงจร มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 38 เครื่อง กำลังผลิตติดตั้งรวมในพื้นที่ 2,980 MW แบ่งเป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ 32 เครื่อง เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันแก๊ส 4 เครื่อง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำ 2 เครื่อง



รูปที่ 6.2 ระบบไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.

## 6.2 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตสำหรับฝึกสอนและทดสอบ

สำหรับข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่นำมาใช้สำหรับฝึกสอนและทดสอบระบบโครงข่ายประสาทยูเอ็ม จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Powerworld เป็นหลัก เนื่องจากสามารถกำหนดรูปแบบของข้อมูลได้หลากหลาย ทำให้มีปริมาณและคุณภาพของข้อมูลที่เพียงพอต่อการฝึกสอนโครงข่ายประสาทยูเอ็ม ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้ในการฝึกสอนและทดสอบ ประกอบไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 53 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1 ข้อมูลอินพุตสำหรับใช้ฝึกสอนและทดสอบ จะเลือกข้อมูลที่มีผลต่อขนาดกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งปัจจัยที่สำคัญของขนาดกระแสฟอลต์นั้น มีอยู่ด้วยกันหลายปัจจัย เช่น ชนิดของฟอลต์ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์ของจุดที่เกิดฟอลต์ เป็นต้น ดังนั้น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำ จึงได้กำหนดปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อขนาดกระแสฟอลต์ เป็นอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม ดังนี้

6.2.1.1 ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ เนื่องจาก ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น สามารถเกิดขึ้นได้ทุกจุด และทุกอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ทั้งในบัสหรือในสถานีไฟฟ้าและในสายส่ง ซึ่งโดยปกติแล้ว ขนาดหรือความรุนแรงของกระแสฟอลต์นั้น จะมากที่สุดเมื่อเกิดขึ้นบนบัสหรือสถานีไฟฟ้าและจะมีขนาดน้อยลงเมื่อเกิดขึ้นไกลออกไปจากบัส เช่น การเกิดฟอลต์บนสายส่ง สำหรับการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้สำหรับโครงข่ายประสาทเทียม จึงได้กำหนดให้ การระบุตำแหน่งที่ฟอลต์ ประกอบไปด้วย อินพุต 3 ค่า ดังนี้

อินพุต 1 เป็นหมายเลขบัสด้านที่อยู่ใกล้กับจุดเกิดฟอลต์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า (Near Bus) เป็นจำนวนเต็ม มีค่าเริ่มตั้งแต่ 1 จนถึง จำนวนบัสทั้งหมดที่ระบบที่กำลังทำการศึกษา

อินพุต 2 เป็นหมายเลขบัสของบัสที่อยู่ไกลออกไปจากจุดที่เกิดฟอลต์ (Far BUS) สำหรับกรณีที่เกิดฟอลต์ขึ้นที่บัส ค่าอินพุตนี้จะป้อนค่าเดียวกับค่าอินพุตที่ 1

อินพุต 3 เป็นตำแหน่งของการเกิดฟอลต์บนสายส่ง โดยจะเป็นค่าร้อยละของความยาวในสายส่งแต่ละเส้น มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

6.2.1.2 ชนิดของฟอลต์ เป็นอินพุตที่ 4 ซึ่งระบุชนิดของฟอลต์ที่เกิดขึ้น มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 4 ดังนี้

ค่าเท่ากับ 1 คือ ฟอลต์แบบ 3 เฟส (Three phase Fault)

ค่าเท่ากับ 2 คือ ฟอลต์แบบ 1 เฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)

ค่าเท่ากับ 3 คือ ฟอลต์ระหว่างเฟส (Line to Line Fault)

ค่าเท่ากับ 4 คือ ฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)

6.2.2 ข้อมูลเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม เป็นค่าของขนาดกระแสฟอลต์ ที่เกิดบนจุดที่เกิดฟอลต์ มีค่าเป็นกิโลแอมแปร์ (kA) ซึ่งขณะทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม จะใช้เป็นค่าเปรียบเทียบกับเพื่อหาประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม เทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Powerworld เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้ได้จนสามารถให้คำตอบที่มีความแม่นยำได้

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

	Detail	Data value
INPUT1	หมายเลขบัสใกล้ (Near BUS)	1, 2, 3, ...
INPUT2	หลายเลขบัสไกล (Far BUS)	1, 2, 3... (กรณีเกิดฟอลต์ที่บัสให้ใช้ค่าเดียวกับ INPUT 1)
INPUT3	ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากบัสใกล้	0.25 = ห่างจากบัส 25% 0.50 = ห่างจากบัส 50% 0.75 = ห่างจากบัส 75% 1.00 = เกิดฟอลต์ที่บัส
INPUT4	ชนิดของฟอลต์	1 = 3 Phase Fault 2 = Single Line to Ground Fault 3 = Line to Line Fault 4 = Double Line to Ground Fault
OUTPUT	กระแสฟอลต์จุดที่เกิดฟอลต์	kA

### 6.3 วิธีการจำลองการวิเคราะห์ค่ากระแสฟอลต์

วิธีการจำลองในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ 2 วิธี คือ การจำลองโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และการจำลองโดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟิวซีแบบปรับตัวได้ (ANFIS) เพื่อจำลองหาค่ากระแสฟอลต์และตำแหน่งที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับระบบตัวอย่าง IEEE 30 บัส และระบบไฟฟ้าจริงพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

#### 6.3.1 การจำลองโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

##### 6.3.1.1 เจ็อนไซในการฝึกสอน

ในการฝึกสอน (Training) เป็นการพยายามทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีการเรียนรู้ในลักษณะการประมวลผลตามที่เราต้องการ โดยลักษณะการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียม จะเป็นการป้อนชุดข้อมูลอินพุตให้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมปรับค่าถ่วงน้ำหนักทุกๆ โหนดให้สอดคล้องกับอินพุตหลายๆ รูปแบบ เพื่อให้ได้ค่าตอบเอาต์พุต ตามที่ต้องการ โดยใช้กระบวนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและปรับค่าไบแอสด้วยวิธี Lavenberg-Marquardt Algorithm ซึ่งมีเจ็อนไซพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการสิ้นสุดการฝึกสอนดังนี้

##### 1) Performance Gradient Factor

ค่า Gradient Factor เป็นพารามิเตอร์ ที่ใช้ในการพิจารณาถึง การสิ้นสุดการฝึกสอนสำหรับการฝึกสอนในแต่ละรอบนั้น จะมีการปรับถ่วงค่าน้ำหนักและค่าไบแอส ซึ่งจำทำให้ค่า Performance

Gradient Factor มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาด ( $e$ ) ที่เกิดขึ้นในรอบการสอน (Epoch) นั้นๆ ซึ่งการฝึกสอนจะสิ้นสุดเมื่อค่า Performance Gradient Factor น้อยกว่า  $1e-10$

## 2) $\mu$ Factor

$\mu$  หรือ Learning Factor เป็นค่าคงที่ที่ใช้เร่งการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอสให้ลู่เข้าหาคำตอบ ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละรอบนั้น หากค่า Gradient Factor มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีการปรับค่า  $\mu$  ให้เพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่า Gradient Factor มีแนวโน้มที่จะลดลง จากนั้นค่า  $\mu$  จะถูกปรับลงเรื่อยๆ และมีการปรับเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อค่า Gradient Factor มีค่าเพิ่มขึ้นโดยที่ค่า  $\mu$  เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.001 การปรับค่า  $\mu$  เพิ่มขึ้นนั้นจะทำการคูณด้วย Increased Factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 และการปรับค่า  $\mu$  ลดลงนั้นจะทำการคูณด้วย Decreased Factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 และการฝึกสอนจะสิ้นสุดลงเมื่อค่า  $\mu$  มีค่ามากกว่า  $1e-10$

## 3) ปริมาณข้อมูลฝึกสอน (Quantity of training Data)

ปริมาณข้อมูลที่นำมาใช้ในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมนั้น จะเป็นเงื่อนไขที่มีผลต่อประสิทธิภาพการหาคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม โดยทั่วไปปัญหาที่ซับซ้อน ควรใช้ข้อมูลฝึกสอนจำนวนมากเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพการหาคำตอบที่ดีขึ้น ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลฝึกสอนอีกด้วย

## 4) คุณภาพของข้อมูลฝึกสอน

การกระจายของชุดข้อมูลฝึกสอน โดยโครงข่ายประสาทเทียมจะสามารถหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลฝึกสอนจะต้องมีการกระจายที่ดีพอและข้อมูลทดสอบควรอยู่ในช่วงดังกล่าว

### 6.3.1.2 ขั้นตอนการฝึกสอนและทดสอบระบบโครงข่ายประสาทเทียม

ค่าเริ่มต้นที่ใช้เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias) ในการเลือกค่าเริ่มต้นสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับนี้โดยทั่วไปจะมี 2 วิธี คือกำหนดค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสด้วยตนเอง หรือกำหนดให้โปรแกรมทำการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสด้วยวิธีการสุ่มเลือก สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการสุ่มเลือกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส เนื่องจากการฝึกสอนในแต่ละรอบนั้นมีทิศทางการลู่เข้าสู่คำตอบที่แตกต่างกันออกไป

ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสนั้นมีอยู่หลายวิธี สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสด้วยวิธี Lavenberg-Marquardt Algorithm ซึ่งมีประสิทธิภาพและมีความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงที่สุด โดยในการทดสอบนี้ได้กำหนดให้มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นจำนวน 300 รอบ (Epoch) สำหรับการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในแต่ละรอบนั้น จะคำนวณหาค่าผิดพลาดของคำตอบที่ข้อมูลชุดฝึกสอนและข้อมูลชุดทดสอบแต่ละชุดเพื่อเปรียบเทียบค่ารากของค่าคาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean Squared Error : RMSE) ของชุดข้อมูลทดสอบในรอบการคำนวณปัจจุบันกับค่า RMSE ของข้อมูลทดสอบที่ได้จากการคำนวณในรอบก่อนหน้านี้ และทำการบันทึกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในรอบที่ทำให้ค่า RMSE ของชุดข้อมูลทดสอบมีค่าต่ำที่สุด

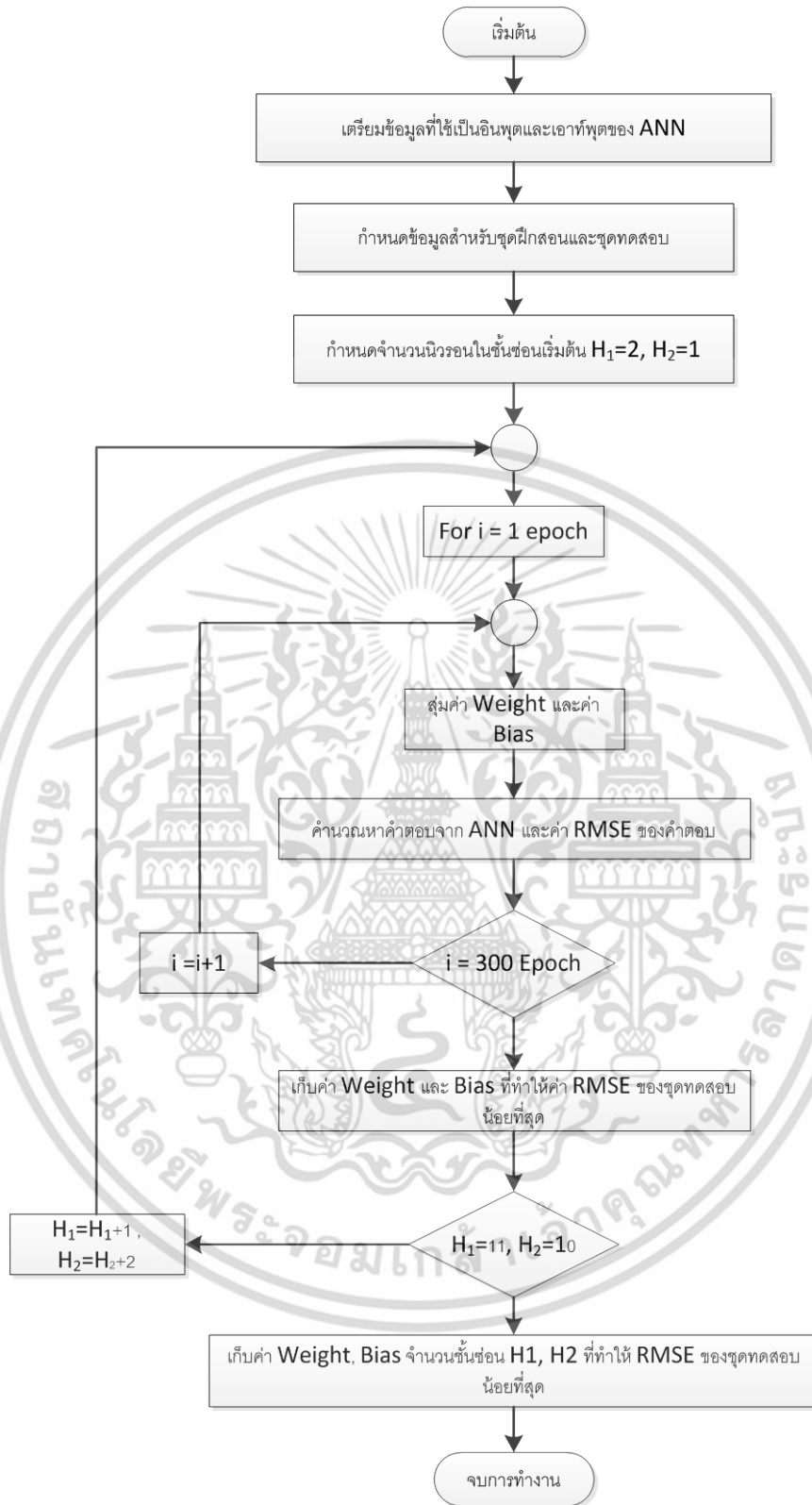
จำนวนรอบของการฝึกสอน เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสจนครบแล้ว ถือว่าเป็นหนึ่งรอบของการฝึกสอน ซึ่งหลังจากจบหนึ่งรอบของการฝึกสอนแล้วจะทำการสุ่มเลือกค่าถ่วงน้ำหนักขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะเป็นค่าที่ต่างจากค่าเริ่มต้นที่ผ่านมาและจะทำจนครบรอบที่เรากำหนดไว้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้จำนวนรอบของการฝึกสอนในแต่ละโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมเท่ากับ 10 รอบต่อโครงสร้าง และเลือกรอบของการฝึกสอนที่ทำให้ค่า RMSE ของชุดทดสอบมีค่าต่ำสุด

จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียมจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน นั่นคือ ถ้าจำนวนนิวรอนมาก เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนก็จะมากตามไปด้วยแต่จำนวนนิวรอนนั้นไม่ได้เป็นสิ่งที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีคุณภาพ นั่นคือจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่มากไม่ได้เป็นตัวชี้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมจะมีประสิทธิภาพดี ในบางปัญหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่น้อยก็อาจจะมีประสิทธิภาพดีกว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมากกว่าก็เป็นไปได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ โดยกำหนดให้จำนวนนิวรอนของชั้นซ่อนที่ 1 มากกว่าจำนวนนิวรอนของชั้นซ่อนที่ 2 อยู่จำนวน 1 นิวรอน

สำหรับขั้นตอนการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับนั้น จะทำการเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อนทั้ง 2 ชั้นและชั้นเอาต์พุต เลือกจากฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Log-Sigmoid, Tan-sigmoid และ Linear แล้วทำการเปรียบเทียบว่าโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมระบบไหนที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดซึ่งดูจากค่า รากของค่าคาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean Squared Error : RMSE) [21] ของชุดทดสอบตามสมการที่ 6.1

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (6.1)$$

เมื่อ  $Y_i$  คือ ค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Power world  
 $\hat{Y}_i$  คือ ค่าที่ได้จากการทำนายโดยโครงข่ายประสาทเทียม  
 $n$  คือ จำนวนข้อมูลฝึกสอนหรือทดสอบ



รูปที่ 6.3 แผนผังแสดงการทดสอบระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.3.2 การจำลองโดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟฟซีแบบปรับตัวได้

### 6.3.2.1 เงื่อนไขในการฝึกสอน

ในการฝึกสอนระบบอนุมานนิวโรฟฟซีแบบปรับตัวได้นั้น ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid) ซึ่งมีเงื่อนไขพื้นฐานที่เกี่ยวข้องดังนี้

#### 1) $\eta$ และ $m$ Factor

$\eta$  คือ Adaptive Learning Rate และ  $m$  คือ Momentum Term เป็นค่าคงที่ที่ใช้เร่งการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอสให้ลู่เข้าหาคำตอบ โดย  $m$  มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และจะตั้งค่าเริ่มต้นไว้ที่ 0.9 ส่วน  $\eta$  จะปรับค่าเริ่มต้นไว้ที่ 0.01 และค่าตัวแปรทั้งสองจะถูกปรับขณะทำการฝึกสอนระบบอนุมานนิวโรฟฟซี โดยในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละรอบนั้น กรณิค่า Gradient Factor มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีการปรับค่า  $\eta$  ให้ลดลง และค่า  $m$  เท่ากับศูนย์ จนกระทั่งค่า Gradient Factor มีแนวโน้มลดลง จากนั้นค่า  $\eta$  จะถูกปรับขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อมีการปรับเพิ่มขึ้นอีก ค่า Gradient factor มีค่าเพิ่มขึ้น การปรับค่า  $\eta$  และ  $m$  นั้นจะใช้เป็นค่าเดิมและการฝึกสอนจะสิ้นสุดลง

#### 2) Least Squares Method

เป็นวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า จากชุดข้อมูลที่ทราบค่า โดยรูปแบบจะเป็นเชิงเส้น (Linear) ค่าสัมประสิทธิ์เลขยกกำลังสองของทุกสัมประสิทธิ์จะมีค่าเป็นหนึ่งทุกตัว ดังนั้นรูปแบบข้อมูลจึงเป็นเชิงเส้น

#### 3) ปริมาณข้อมูลฝึกสอน

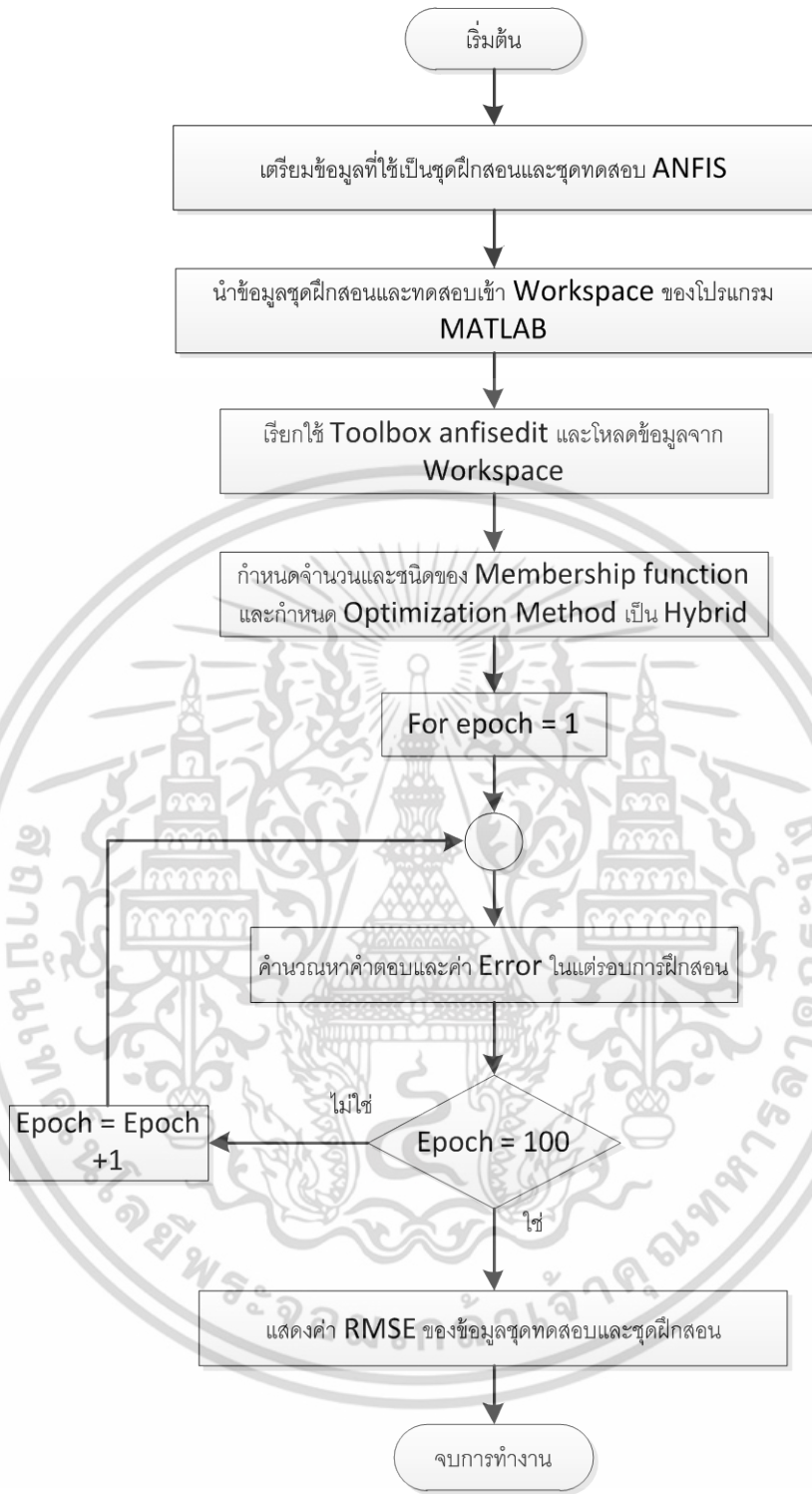
จำนวนข้อมูลที่นำมาใช้ในการฝึกสอนและทดสอบระบบอนุมานนิวโรฟฟซีแบบปรับตัวได้นั้น จะเป็นเงื่อนไขหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการหาคำตอบของระบบอนุมานนิวโรฟฟซีแบบปรับตัวได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ปัญหาที่มีความซับซ้อน การเลือกใช้ข้อมูลฝึกสอนจำนวนมาก จะทำให้ระบบอนุมานนิวโรฟฟซีแบบปรับตัวได้มีประสิทธิภาพการหาคำตอบดีขึ้น แต่ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลฝึกสอนด้วย

#### 4) คุณภาพของข้อมูลฝึกสอน

สำหรับข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนที่มีคุณภาพนั้น ควรมีการกระจายตัวของข้อมูลที่ดี และข้อมูลที่ใช้ทดสอบควรอยู่ในช่วงของการกระจายดังกล่าว เพื่อให้ระบบอนุมานนิวโรฟฟซีสามารถหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 6.3.2.2 ขั้นตอนการฝึกสอนและทดสอบระบบอนุมานนิวโรฟฟซีแบบปรับตัวได้

สำหรับขั้นตอนการฝึกสอนระบบอนุมานนิวโรฟฟซีแบบปรับตัวได้ เริ่มต้นจากการปรับเปลี่ยนชนิดของฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function) จนครบทั้งหมด และทำการปรับจำนวนโหนดของฟังก์ชันสมาชิกโดยเริ่มจากค่าน้อยๆ และค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) และกำหนดเงื่อนไขกระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybride) รอบการเรียนรู้ 100 epochs แล้วทำการเปรียบเทียบว่า โครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟฟซีแบบปรับตัวได้ระบบไหนที่ให้คำตอบได้ดีที่สุด โดยดูจากค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบ โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แผนผังแสดงการทดสอบของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### ผลการทดลอง

การจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ค่ากระแสฟอลต์และตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการทดสอบหาค่ากระแสฟอลต์และตำแหน่งที่เกิดกับระบบทดสอบ 2 ระบบ คือ ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส และระบบส่งไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยด้วยโปรแกรม PowerWorld เพื่อหากระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรชนิด Single-line-to ground, Line-to-line และ Double line-to-ground ที่ตำแหน่งของแต่ละบัสทุกบัส และที่ตำแหน่ง 25%, 50% และ 75% ของความยาวสายส่งในแต่ละวงจร โดยทำการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และชนิดของฟอลต์ที่เกิดขึ้นและทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุดคือ ชุดฝึกสอนสำหรับฝึกสอนโครงข่ายประสาทดัดเทียม และชุดทดสอบสำหรับประเมินประสิทธิภาพในการหาค่าตอบของระบบโครงข่ายประสาทดัดเทียมและระบบอนุमानนิเวศน์ที่ปรับเปลี่ยนได้

#### 7.1 ผลการทดสอบของระบบ IEEE 30 บัส

ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส เป็นระบบไฟฟ้ามาตรฐานระดับกลางประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 เครื่อง บัสแรงดัน 132, 33 และ 11 kV จำนวน 9 บัส 18 บัส และ 3 บัสตามลำดับ มีสายส่งเชื่อมโยงทั้งหมด 41 วงจร กำลังผลิตรวมทั้งระบบ 460 MW ใช้ข้อมูลการวิเคราะห์กระแสฟอลต์จากโปรแกรม PowerWorld เป็นข้อมูลขนาดกระแสฟอลต์ที่บัส และฟอลต์ที่ตำแหน่ง 25%, 50% และ 75% บนสายส่ง ใช้ข้อมูลทั้งหมด 396 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลชุดฝึกสอน 336 ชุด และชุดทดสอบ 60 ชุด ทำการจำลองหาค่ากระแสฟอลต์โดยใช้ตำแหน่งและชนิดของฟอลต์เป็นอินพุต และกำหนดชุดข้อมูลทดสอบที่ตำแหน่งบนสายส่งนอกเหนือไปจากตำแหน่งที่ 25%, 50% และ 75% ของความยาวสายส่ง เพื่อใช้สำหรับทดสอบระบบโครงข่ายประสาทดัดเทียมในตำแหน่งฟอลต์ที่โครงข่ายประสาทดัดเทียมไม่เคยเรียนรู้มาก่อนอีก 10 ชุด ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงจำนวนชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับฝึกสอนและทดสอบของระบบ IEEE 30 บัส

	BUS	Line	รวม
ข้อมูลฝึกสอน	20	316	336
ข้อมูลทดสอบ	10	50	60
ข้อมูล Unseen	-	10	10

### 7.1.1 การทดสอบโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อได้ข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทดสอบแล้ว จึงทำการทดสอบระบบโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้ข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม เปรียบเทียบกับข้อมูลจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Powerworld เพื่อหารูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนในแต่ละชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียม ที่สามารถให้คำตอบของข้อมูลชุดทดสอบ (Test Data) ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด และนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์หารูปแบบของจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อนที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมต่อไป ซึ่งผลการทดสอบหาประเภทฟังก์ชันแสดงได้ดังตารางที่ 7.2 จากการทดสอบ พบว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และฟังก์ชันเอาต์พุต ที่สามารถวิเคราะห์หาคำตอบมีความผิดพลาดน้อยที่สุด คือ ฟังก์ชัน Log-Sigmoid, Tan-Sigmoid และ Log-Sigmoid ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการทดสอบหาโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม โดยการเปลี่ยนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และชั้นซ่อนที่ 2 และทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของเอาต์พุตในแต่ละโครงสร้าง ผลที่ได้ดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.2 แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่างๆ ของระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

ที่	ฟังก์ชันถ่ายโอน			ค่าความผิดพลาด (RMSE)
	ชั้นซ่อนที่ 1	ชั้นซ่อนที่ 2	ฟังก์ชันเอาต์พุต	
1	Tan-Sigmoid	Tan-Sigmoid	Tan-Sigmoid	0.20075
2	Tan-Sigmoid	Tan-Sigmoid	Log-Sigmoid	0.21324
3	Tan-Sigmoid	Tan-Sigmoid	Linear	0.20494
4	Tan-Sigmoid	Log-Sigmoid	Tan-Sigmoid	0.19823
5	Tan-Sigmoid	Log-Sigmoid	Log-Sigmoid	0.20138
6	Tan-Sigmoid	Log-Sigmoid	Linear	0.18655
7	Tan-Sigmoid	Linear	Tan-Sigmoid	0.28496
8	Tan-Sigmoid	Linear	Log-Sigmoid	0.32147
9	Tan-Sigmoid	Linear	Linear	0.27514
10	Log-Sigmoid	Tan-Sigmoid	Tan-Sigmoid	0.18921
11	Log-Sigmoid	Tan-Sigmoid	Log-Sigmoid	0.19324
12	Log-Sigmoid	Tan-Sigmoid	Linear	0.17143
13	Log-Sigmoid	Log-Sigmoid	Tan-Sigmoid	0.21354
14	Log-Sigmoid	Log-Sigmoid	Log-Sigmoid	0.23176
15	Log-Sigmoid	Log-Sigmoid	Linear	0.20543
16	Log-Sigmoid	Linear	Tan-Sigmoid	0.27295
17	Log-Sigmoid	Linear	Log-Sigmoid	0.29121
18	Log-Sigmoid	Linear	Linear	0.26739
19	Linear	Tan-Sigmoid	Tan-Sigmoid	0.32696
20	Linear	Tan-Sigmoid	Log-Sigmoid	0.35124
21	Linear	Tan-Sigmoid	Linear	0.28391

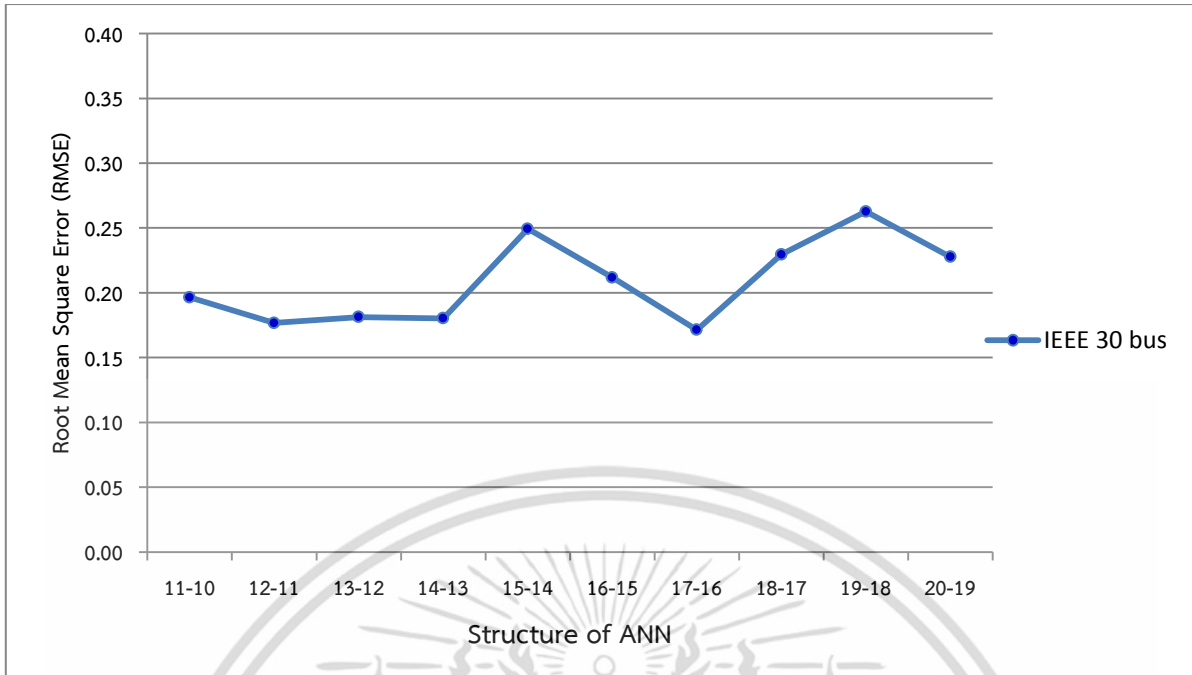
เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ วัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ 62 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่	ฟังก์ชันถ่ายโอน			ค่าความผิดพลาด (RMSE)
	ชั้นซ่อนที่ 1	ชั้นซ่อนที่ 2	ฟังก์ชันเอาต์พุต	
22	Linear	Log-Sigmoid	Tan-Sigmoid	0.28844
23	Linear	Log-Sigmoid	Log-Sigmoid	0.36421
24	Linear	Log-Sigmoid	Linear	0.34409
25	Linear	Linear	Tan-Sigmoid	1.43854
26	Linear	Linear	Log-Sigmoid	1.56317
27	Linear	Linear	Linear	1.44031

ตารางที่ 7.3 แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของโครงสร้างแบบต่างๆ ของระบบประสาทเทียม

จำนวนนิวรอน		ค่าความผิดพลาด (RMSE)
ชั้นซ่อนที่ 1	ชั้นซ่อนที่ 2	
11	10	0.1964
12	11	0.1767
13	12	0.1813
14	13	0.1803
15	14	0.2493
16	15	0.2118
17	16	0.1714
18	17	0.2295
19	18	0.2627
20	19	0.2277



รูปที่ 7.1 กราฟแสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของแต่ละโครงสร้างของ ANN สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ามาตรฐาน IEEE 30 บัส

7.1.2 การทดสอบโดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้

การทดสอบจะใช้ข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบเดียวกันกับการทดสอบโดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อเปรียบเทียบค่าตอบที่ได้ระหว่างระบบโครงข่ายประสาทเทียมกับระบบอนุมานนิวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้ สำหรับการทดสอบโดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้นั้นในขั้นแรก จะทำการทดสอบเพื่อหาฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้วิเคราะห์หาค่าตอบ โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาด (RMSE) ของชุดทดสอบ ด้วยกระบวนการเรียนรู้ของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyแบบผสม (Hybrid) และจำนวนรอบการคำนวณ 300 epochs เปรียบเทียบกันค่าจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Powerworld ดังตารางที่ 7.4

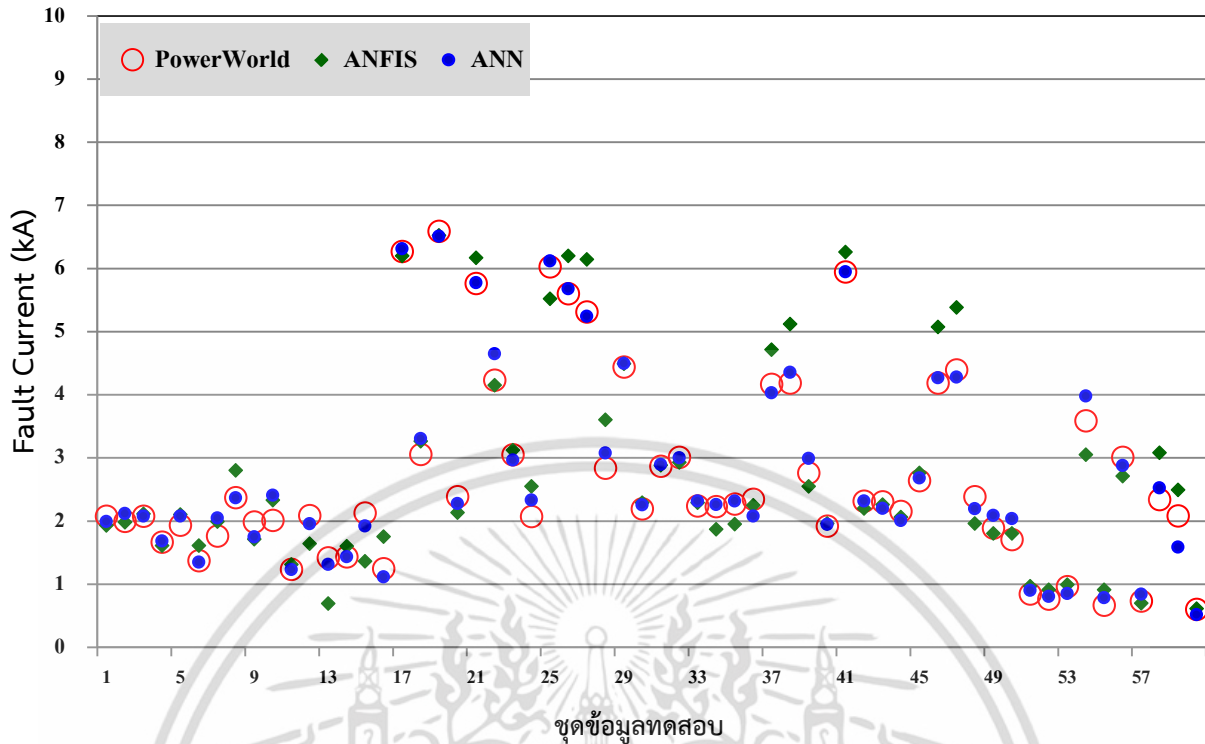
ตารางที่ 7.4 แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกต่างๆ

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	ค่าความผิดพลาด(RMSE)
trimf	0.61972
trapmf	0.47828
gbellmf	0.44538
gaussmf	0.51147
gauss2mf	0.42983
primf	0.46981
<b>dsigmf</b>	<b>0.41096</b>
psigmf	0.42259

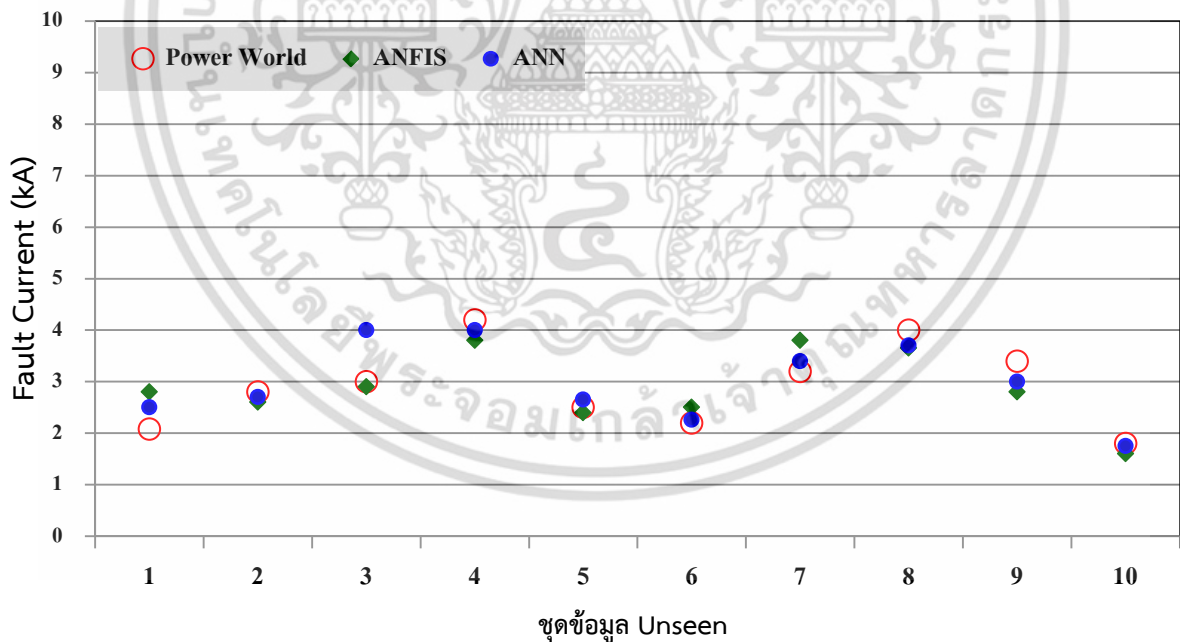
จากผลการทดสอบในตารางที่ 7.3 พบว่า ระบบอนุมานนิวโรฟuzzy แบบปรับตัวได้ที่เลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ dsigmf มีค่าความผิดพลาด (RMSE) น้อยที่สุด จึงได้เลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก dsigmf ทำการทดสอบเพื่อหาโครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟuzzy แบบปรับตัวที่เหมาะสม โดยทำการปรับจำนวนโหนดของแต่ละอินพุท และเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของข้อมูลชุดทดสอบ ได้ผลดังตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของโครงสร้างแบบต่างๆ ของ ANFIS

ที่	จำนวนโหนดของอินพุท				ค่าความผิดพลาด (RMSE)
	INPUT 1	INPUT 2	INPUT 3	INPUT 4	
1	2	2	2	2	0.94817
2	2	2	2	3	0.93933
3	2	2	3	2	0.97721
4	2	2	3	3	0.94943
5	2	3	2	2	0.92112
6	2	3	2	3	0.91397
7	2	3	3	2	0.91641
8	2	3	3	3	0.90883
9	3	2	2	2	0.92283
10	3	2	2	3	0.91372
11	3	2	3	2	0.50817
12	3	2	3	3	0.47466
13	3	3	2	2	0.49911
14	3	3	2	3	0.46470
15	3	3	3	2	0.49808
16	3	3	3	3	0.41096
17	3	3	3	4	0.39342
18	3	4	3	3	0.71801
19	3	3	4	3	0.45932
20	4	3	3	3	0.78285
21	3	3	4	4	1.60542
22	4	4	3	3	1.90978
23	4	3	4	3	5.03986
24	3	4	3	4	0.71243



รูปที่ 7.2 กราฟแสดงค่าเอาต์พุตที่ได้จาก ANN และ ANFIS เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Powerworld ของระบบ IEEE 30 บัส ของชุดข้อมูลทดสอบ



รูปที่ 7.3 กราฟแสดงค่าเอาต์พุตที่ได้จาก ANN และ ANFIS เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Powerworld ของระบบ IEEE 30 บัส ของชุดข้อมูลที่ระบบไม่เคยเรียนรู้ (Unseen)

## 7.2 ผลการทดลองของระบบส่งไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ระบบส่งไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่นำมาวิเคราะห์ในครั้งนี้ ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 38 เครื่องและกำหนดกำลังผลิตรวมในพื้นที่ 2,980 MW มีบัสทั้งหมด 73 บัส แบ่งเป็นระดับแรงดัน 230 kV จำนวน 17 บัส, 115 kV จำนวน 56 บัส มีสายส่งเชื่อมโยงทั้งหมด 85 วงจร แบ่งเป็นสายส่ง 230 kV 12 วงจร และ 115kV 73 วงจร ใช้ข้อมูลการวิเคราะห์กระแสฟลด์จากโปรแกรม PowerWorld เป็นข้อมูลขนาดกระแสฟลด์ที่บัส และฟลด์ที่ตำแหน่ง 25%, 50% และ 75% บนสายส่ง ใช้ข้อมูลสำหรับการทดสอบทั้งหมด 780 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลชุดฝึกสอน 640 ชุด และชุดทดสอบ 140 ชุด ทำการจำลองหาค่ากระแสฟลด์โดยใช้ ตำแหน่งและชนิดของฟลด์เป็นอินพุต และกำหนดชุดข้อมูลทดสอบที่ตำแหน่งบนสายส่งนอกเหนือไปจากตำแหน่งที่ 25%, 50% และ 75% ของความยาวสายส่ง เพื่อใช้สำหรับทดสอบระบบโครงข่ายประสาทเทียมในตำแหน่งฟลด์ที่โครงข่ายประสาทเทียมไม่เคยเรียนรู้มาก่อนอีก 20 ชุด ดังตารางที่ 7.6

ตารางที่ 7.6 แสดงจำนวนชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับฝึกสอนและทดสอบของระบบไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

	BUS	Line	รวม
ข้อมูลฝึกสอน	50	590	640
ข้อมูลทดสอบ	23	117	140
ข้อมูล Unseen	-	20	20

### 7.2.1 การทดสอบโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

หลักจากที่เตรียมข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทดสอบทั้งหมดแล้ว จากนั้นจึงทำการทดสอบระบบโครงข่ายประสาทเทียม เริ่มจากนำข้อมูลชุดฝึกสอนมาฝึกสอนระบบโครงข่ายประสาทเทียมและทำการทดสอบระบบโครงข่ายประสาทเทียมด้วยข้อมูลชุดทดสอบ โดยใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt จำนวนรอบการเรียนรู้ 300 epochs โดยค่า Weight Bias เริ่มต้นจากการสุ่ม จากนั้นนำข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม เปรียบเทียบกับข้อมูลจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Powerworld เพื่อหารูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนในแต่ละชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียม ที่สามารถให้คำตอบของข้อมูลชุดทดสอบ (Test Data) ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด และนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์หารูปแบบของจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อนที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมต่อไป

ตารางที่ 7.7 แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่างๆ ของระบบทดสอบ ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.

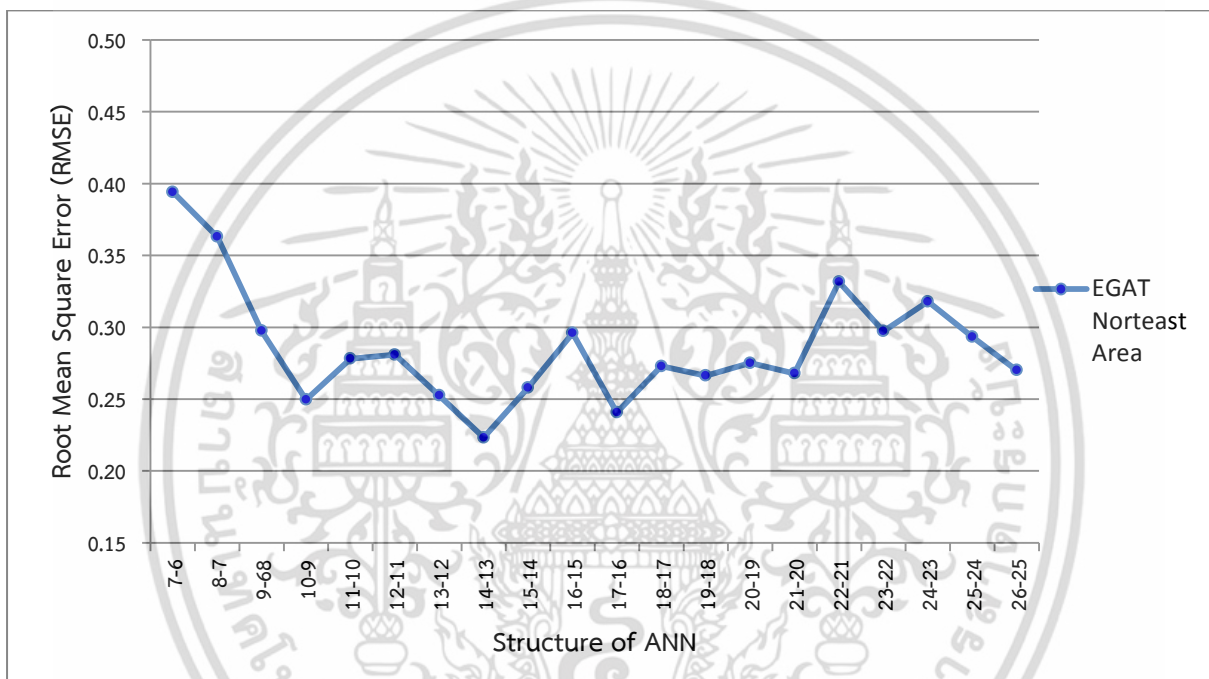
ที่	ฟังก์ชันถ่ายโอน			ค่าความผิดพลาด (RMSE)
	ชั้นซ่อนที่ 1	ชั้นซ่อนที่ 2	ฟังก์ชันเอ้าท์พุท	
1	Tan-Sigmoid	Tan-Sigmoid	Tan-Sigmoid	0.29813
2	Tan-Sigmoid	Tan-Sigmoid	Log-Sigmoid	0.34215
3	Tan-Sigmoid	Tan-Sigmoid	Linear	0.25394
4	Tan-Sigmoid	Log-Sigmoid	Tan-Sigmoid	0.22334
5	Tan-Sigmoid	Log-Sigmoid	Log-Sigmoid	0.42245
6	Tan-Sigmoid	Log-Sigmoid	Linear	0.26505
7	Tan-Sigmoid	Linear	Tan-Sigmoid	0.64376
8	Tan-Sigmoid	Linear	Log-Sigmoid	0.72138
9	Tan-Sigmoid	Linear	Linear	0.64113
10	Log-Sigmoid	Tan-Sigmoid	Tan-Sigmoid	0.34640
11	Log-Sigmoid	Tan-Sigmoid	Log-Sigmoid	0.42157
12	Log-Sigmoid	Tan-Sigmoid	Linear	0.32489
13	Log-Sigmoid	Log-Sigmoid	Tan-Sigmoid	0.28671
14	Log-Sigmoid	Log-Sigmoid	Log-Sigmoid	0.36791
15	Log-Sigmoid	Log-Sigmoid	Linear	0.30725
16	Log-Sigmoid	Linear	Tan-Sigmoid	0.63167
17	Log-Sigmoid	Linear	Log-Sigmoid	0.72438
18	Log-Sigmoid	Linear	Linear	0.65172
19	Linear	Tan-Sigmoid	Tan-Sigmoid	0.42585
20	Linear	Tan-Sigmoid	Log-Sigmoid	0.63217
21	Linear	Tan-Sigmoid	Linear	0.59329
22	Linear	Log-Sigmoid	Tan-Sigmoid	0.49575
23	Linear	Log-Sigmoid	Log-Sigmoid	0.68421
24	Linear	Log-Sigmoid	Linear	0.53061
25	Linear	Linear	Tan-Sigmoid	1.01659
26	Linear	Linear	Log-Sigmoid	1.13278
27	Linear	Linear	Linear	1.04985

ผลการทดสอบหาประเภทฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาค่าตอบของระบบไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. แสดงได้ดังตารางที่ 7.5 จากการศึกษาทดสอบ พบว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และฟังก์ชันเอาต์พุต ที่สามารถวิเคราะห์หาค่าตอบมีความผิดพลาดน้อยที่สุดสำหรับระบบทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย คือ ฟังก์ชัน Tan-Sigmoid, Log-Sigmoid และ Tan-Sigmoid ตามลำดับ จากนั้นจึงเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าว ทำการทดสอบหาโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม โดยการเปลี่ยนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และชั้นซ่อนที่ 2 และทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของเอาต์พุตในแต่ละโครงสร้าง เพื่อหาโครงสร้างของระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถหาค่าตอบของการวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. ได้ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Powerworld มากที่สุด ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 7.7

**ตารางที่ 7.8** แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบจากโครงสร้างแบบต่างๆ ของระบบประสาทเทียม สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.

ที่	จำนวนนิวรอน		ค่าความผิดพลาด (RMSE)
	ชั้นซ่อนที่ 1	ชั้นซ่อนที่ 2	
1	7	6	0.39411
2	8	7	0.36309
3	9	8	0.29755
4	10	9	0.24962
5	11	10	0.27819
6	12	11	0.28098
7	13	12	0.25252
8	14	13	0.22322
9	15	14	0.25803
10	16	15	0.29602
11	17	16	0.24071
12	18	17	0.27290
13	19	18	0.26628
14	20	19	0.27512
15	21	20	0.26791
16	22	21	0.33163
17	23	22	0.29726
18	24	23	0.31795
19	25	24	0.29337
20	26	25	0.27011

จากตารางที่ 7.8 แสดงค่าความผิดพลาดของคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม เทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Powerworld จะเห็นได้ว่า โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม มีผลต่อเอาท์พุทที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม โดยที่โครงข่ายประสาทเทียมที่มีขนาดเล็กหรือจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นชอนน้อย ค่าตอบที่ได้ยังมีความผิดพลาดสูง และเมื่อเพิ่มขนาดของโครงข่ายประสาทเทียมโดยการเพิ่มจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นชอน จะให้คำตอบที่มีความผิดพลาดน้อย แต่เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมมีขนาดใหญ่มากขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ค่าตอบที่ได้จะเริ่มมีความผิดพลาดคงที่ หรือไม่ได้มีความแม่นยำมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาศึกษาวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. พบว่า โครงสร้างที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นชอนที่ 1 เท่ากับ 14 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นชอนที่ 2 เท่ากับ 13 นิวรอน จะให้คำตอบที่มีความผิดพลาด RMSE น้อยที่สุด คือ 0.223



รูปที่ 7.4 กราฟแสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของแต่ละโครงสร้างของ ANN สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.

### 7.2.2 การทดสอบโดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟซีแบบปรับตัวได้

การทดสอบหาคำตอบของระบบอนุมานนิวโรฟซีแบบปรับตัวได้สำหรับระบบไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. จะใช้ข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบเดียวกันกับการทดสอบโดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีข้อมูลสำหรับการทดสอบทั้งหมด 780 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลชุดฝึกสอน 640 ชุด และชุดทดสอบ 140 ชุด ทำการจำลองหาค่ากระแสฟอลต์โดยใช้ ตำแหน่งและชนิดของฟอลต์เป็นอินพุทเพื่อเปรียบเทียบคำตอบที่ได้ระหว่างระบบโครงข่ายประสาทเทียมกับระบบอนุมานนิวโรฟซีแบบปรับตัวได้ สำหรับการทดสอบโดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟซีแบบปรับตัวได้นั้น ในขั้นแรก จะทำการทดสอบเพื่อหาฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้วิเคราะห์หาคำตอบสำหรับระบบไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาด (RMSE) ของชุดทดสอบ ด้วยกระบวนการเรียนรู้ของระบบอนุมานนิวโรฟซีแบบผสม (Hybrid) และจำนวนรอบการคำนวณ 300 epochs และการทดสอบเพื่อหาฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมนี้ จะกำหนดจำนวนโหนด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 70 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแต่ละอินพุตเท่ากับ 3 โหนด เพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Powerworld ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 7.9 จากนั้นทำการทดสอบเพื่อหาโครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟuzzy ที่แบบปรับตัวได้ที่เหมาะสม โดยทำการปรับจำนวนโหนดของแต่ละอินพุตทั้ง 4 อินพุต ละทำการเปรียบเทียบค่าตอบที่ได้จากค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 7.10

**ตารางที่ 7.9** แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกต่างๆ สำหรับวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	ค่าความผิดพลาด(RMSE)
trimf	0.66794
trapmf	0.59003
<b>gbellmf</b>	<b>0.56794</b>
gaussmf	0.61033
gauss2mf	0.73534
primf	0.65775
dsigmf	0.63770
psigmf	0.73003

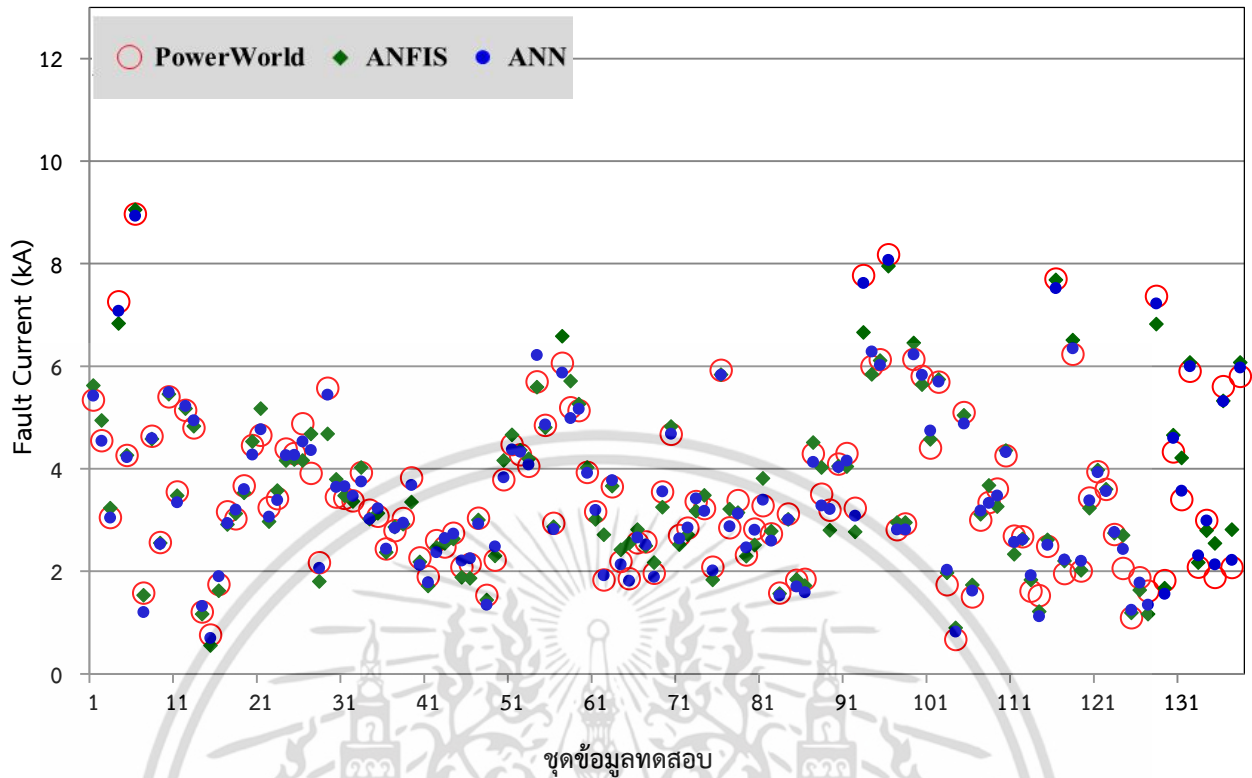
จากตารางที่ 7.9 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างโครงสร้างของระบบอนุมานฟuzzy ที่แบบปรับตัวได้ที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุตเป็น gbellmf มีผลการให้คำตอบที่ดีที่สุด โดยมีค่า RMSE ของชุดทดสอบเท่ากับ 0.56794 จากนั้นจึงได้เลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก gbellmf ทำการทดสอบหาโครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟuzzy ที่แบบปรับตัวได้ที่เหมาะสม โดยทำการเพิ่มจำนวนโหนดของแต่ละอินพุตแบบลองผิดลองถูก และเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของข้อมูลชุดทดสอบ ได้ผลดังตารางที่ 7.10

**ตารางที่ 7.10** แสดงค่าความผิดพลาด RMSE ของชุดทดสอบของโครงสร้างแบบต่างๆ ของ ANFIS สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.

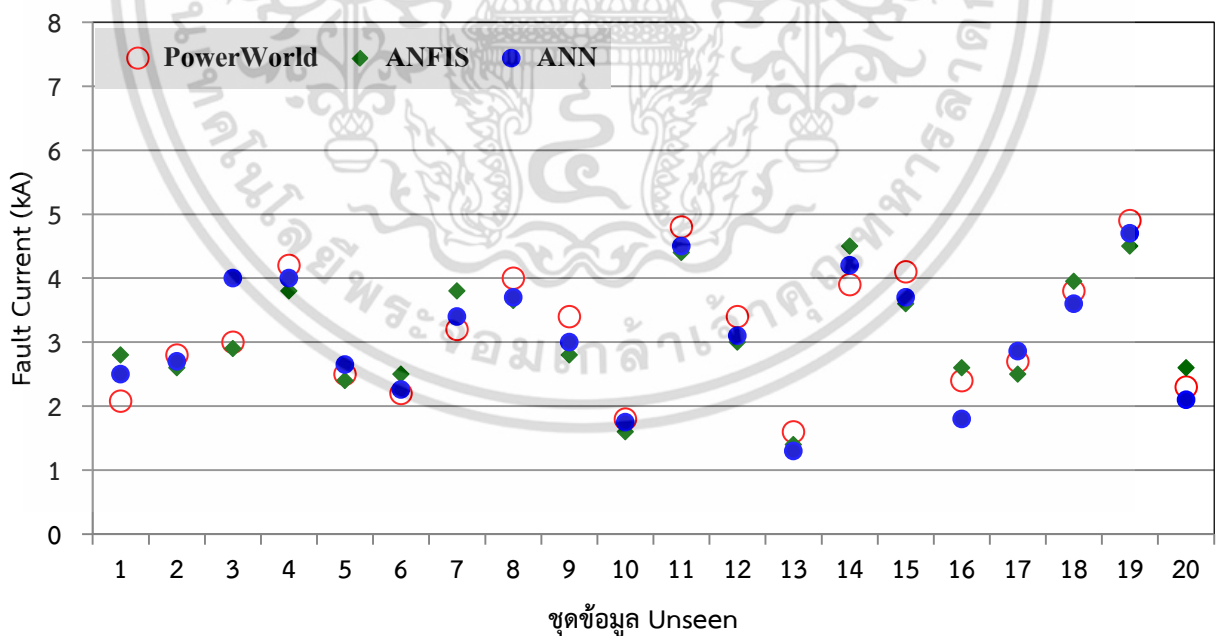
ที่	จำนวนโหนดของอินพุต				ค่าความผิดพลาด (RMSE)
	INPUT 1	INPUT 2	INPUT 3	INPUT 4	
1	2	2	2	2	0.72618
2	2	2	2	3	0.71960
3	2	2	3	2	0.71389
4	2	2	3	3	0.67217
5	2	3	2	2	0.62486
6	2	3	2	3	0.61138
7	2	3	3	2	0.63875
8	2	3	3	3	0.59960
9	3	2	2	2	0.68950
10	3	2	2	3	0.65731

ที่	จำนวนโหนดของอินพุท				ค่าความผิดพลาด (RMSE)
	INPUT 1	INPUT 2	INPUT 3	INPUT 4	
11	3	2	3	2	0.65328
12	3	2	3	3	0.65143
13	3	3	2	2	0.59384
14	3	3	2	3	0.57780
15	3	3	3	2	0.57735
16	3	3	3	3	0.56794
17	3	3	3	4	0.53407
18	3	4	2	2	0.65463
19	4	3	2	2	0.73279
20	3	3	4	4	0.42347
21	4	4	2	2	0.54903
22	5	4	2	2	0.37741
23	4	5	2	2	0.40782
24	5	5	2	2	0.48868
25	5	5	3	2	0.38418
26	5	5	2	3	0.43419
27	6	5	2	2	0.39453
28	5	6	2	2	0.41644
29	5	4	2	2	0.39782
30	6	4	2	2	0.38475
31	7	4	2	2	0.45572

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.5 กราฟแสดงค่าเอาต์พุตที่ได้จาก ANN และ ANFIS เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Powerworld ของระบบไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กพผ. ของชุดข้อมูลทดสอบ



รูปที่ 7.6 กราฟแสดงค่าเอาต์พุตที่ได้จาก ANN และ ANFIS เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Powerworld ของไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กพผ. ของชุดข้อมูลที่ระบบไม่เคยเรียนรู้ (Unseen)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.4 และ 7.5 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบค่ากระแสฟอลต์ของระบบไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. ที่ได้จากระบบโครงข่ายประสาทยูเอ็ม และระบบอนุमानนิวโรฟซซีแบบปรับตัวได้ เปรียบเทียบกับค่ากระแสฟอลต์ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Powerworld จะพบว่า ค่ากระแสฟอลต์ที่ได้จากระบบโครงข่ายประสาทยูเอ็ม มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Powerworld มากกว่าระบบอนุमानนิวโรฟซซีแบบปรับตัวได้ เมื่อพิจารณาจากค่าความผิดพลาด RMSE จากตารางที่ 7.8 และ 7.10 จะเห็นได้ว่า ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดของระบบโครงข่ายประสาทยูเอ็ม มีค่าเท่ากับ 0.2232 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความผิดพลาดของระบบอนุमानนิวโรฟซซีแบบปรับตัวได้ที่มีค่าเท่ากับ 0.3774

ตารางที่ 7.11 สรุปการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง ANN และ ANFIS

	ANN		ANFIS	
	IEEE 30 bus	EGAT	IEEE 30 bus	EGAT
Model	Back-Propagation	Back-Propagation	Sugeno	Sugeno
Transfer Function, MF	1st Layer Log-Sigmoid	1st Layer Tan-Sigmoid	Input 1 Number of MFs 3, dsigmf	Input 1 Number of MFs 5, gbellmf
	2nd Layer Tan-Sigmoid	2nd Layer Log-Sigmoid	Input 2 Number of MFs 3, dsigmf	Input 2 Number of MFs 4, gbellmf
	Output Layer Linear	Output Layer Tan-Sig	Input 3 Number of MFs 3, dsigmf	Input 3 Number of MFs 2, gbellmf
			Input 4 Number of MFs 4, dsigmf	Input 4 Number of MFs 2, gbellmf
			Output MF, linear	Output MF, linear
Training (sets)	336	640	336	640
Testing (sets)	60	140	60	140
Training Method	Levenberg-Marquardt	Levenberg-Marquardt	Hybrid	Hybrid
Epochs	100	300	300	300
Train RMSE	0.1235	0.1924	0.3123	0.2815
Test RMSE	0.1714	0.2232	0.3934	0.3774
Unseen RMSE	0.2627	0.3217	0.4247	0.4018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 74 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และ ระบบอนุमानนิวโรฟซีแบบปรับตัวได้ เพื่อนำมาวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตร ที่ตำแหน่งของบัสและบนสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์กระแสฟอลต์ที่ใช้ค่าค่าพิกัดตำแหน่งที่เกิดฟอลต์และชนิดของฟอลต์เป็นอินพุท ซึ่งผลที่ได้จากการจำลอง ระบบโครงข่ายประสาทเทียมสามารถให้คำตอบมีค่าความผิดพลาด RMSE น้อยกว่าคำตอบที่ได้จากระบบอนุमानนิวโรฟซีแบบปรับตัวได้ ในข้อมูลชุดทดสอบ ทำให้ค่าคำตอบของระบบโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Powerworld ซึ่งค่ากระแสฟอลต์ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ สามารถนำไปใช้ในการประเมินค่ากระแสลัดวงจรของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง หรือการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกัน เนื่องจากสามารถวิเคราะห์หาค่ากระแสฟอลต์ที่ตำแหน่งต่างๆ บนบัสและสายส่งได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

สมมุติฐานที่ทำให้ค่า RMSE ของการวิเคราะห์กระแสฟอลต์ของระบบโครงข่ายประสาทเทียมดีกว่า ระบบอนุमानนิวโรฟซีแบบปรับตัวได้

- 1) จำนวนของข้อมูลและการกระจายของชุดข้อมูล
- 2) การแบ่งชุดข้อมูลฝึกสอน และชุดข้อมูลทดสอบ
- 3) การเลือกใช้การบวนการเรียนรู้ที่แตกต่างกัน

สำหรับการเลือกใช้โครงสร้างของ ANN ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์กระแสฟอลต์นั้น พบว่าโครงสร้างของ ANN ที่ให้คำตอบของกระแสฟอลต์มีค่าความคลื่อน RMSE น้อย จะเป็นโครงสร้างที่มีจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อนอยู่ระหว่าง 12-18 นิวรอน สำหรับการนำไปใช้งาน จึงควรกำหนดโครงสร้างของ ANN ให้อยู่ในช่วงดังกล่าวจึงสามารถให้คำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 8.1 เปรียบเทียบค่า RMSE ของชุดข้อมูลระหว่าง ANN และ ANFIS

	ชุดข้อมูล	ANN	ANFIS
ระบบ IEEE 30 Bus	ข้อมูลฝึกสอน	0.1235	0.3123
	ข้อมูลทดสอบ	0.1714	0.3934
	ข้อมูล Unseen	0.2627	0.4247
ระบบ กฟผ.	ข้อมูลฝึกสอน	0.1924	0.2815
	ข้อมูลทดสอบ	0.2232	0.3774
	ข้อมูล Unseen	0.3217	0.4018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8.1 การประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม

การนำระบบโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้วิเคราะห์หาค่ากระแสฟอลต์ เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ไม่ต้องใช้ข้อมูลหรือตัวแปรที่มีความซับซ้อน หรือค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ที่อยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากระบบโครงข่ายประสาทเทียม สามารถเรียนรู้และพัฒนาระบบประสาทเทียมเพื่อให้คำตอบได้อย่างถูกต้อง จากการทดลองพบว่า ระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนและเลือกรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์ สามารถหาคำตอบได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

## 8.2 ข้อดีและข้อเสียของการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการวิเคราะห์หาค่ากระแสฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

การประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม มาวิเคราะห์กระแสฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์อย่างหนึ่งที่สามารถนำมาใช้หาคำตอบซึ่งมีข้อดีและข้อเสียดังนี้

### ข้อดี

- 1) สามารถคำนวณหาคำตอบที่มีความซับซ้อนได้อย่างรวดเร็ว
- 2) รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนมีให้เลือกใช้งานได้หลายชนิด
- 3) ไม่จำเป็นต้องสร้างสมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 4) ไม่ต้องทราบข้อมูลพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 5) ถ้าระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง สามารถเพิ่มข้อมูลใหม่เข้ามาในระบบโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำการเรียนรู้ได้ โดยไม่จำเป็นต้องลบข้อมูลเดิมออก

### ข้อเสีย

- 1) จำเป็นต้องมีการเตรียมข้อมูลสำหรับการฝึกสอนในครั้งแรก
- 2) ไม่สามารถระบุถึงชนิดและจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อนได้ว่าจะต้องใช้ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบใด และจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเท่าไร จึงต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก
- 3) จากการทดลองพบว่า ถ้ามีจำนวนอินพุตมาก และเลือกโครงสร้างระบบประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนมีมาก จะทำให้ระบบใช้เวลาในการฝึกสอนและทดสอบช้า

## 8.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) การทดสอบนี้สามารถนำไปใช้ในการทดสอบกับระบบไฟฟ้าอื่นที่แตกต่างออกไป
- 2) สามารถนำข้อมูลอื่นๆ เข้ามาร่วมกับข้อมูลตำแหน่งชนิดของฟอลต์ เช่น ข้อมูลโหลดแรงดันที่บัส เพื่อปรับปรุงให้แบบจำลองสามารถวิเคราะห์ได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น
- 3) สิ่งที่ต้องพัฒนาต่อไป คือ GUI (Graphical User Interface) ของระบบโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้สามารถใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น และการปรับปรุงโครงสร้าง ชนิดของฟังก์ชัน รวมถึงจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อน ให้สามารถทำงานได้เร็วขึ้นเมื่อมีจำนวนข้อมูลมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Hadi Saadat. 2004. **Power System Analysis second edition**. NewYork : McGraw-Hill.
- [2] พิชัย อารีย์. 2552. **การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] S. Jiriwibhakorn. 2011. **Applications of Neural Networks in Power Systems**. Faculty of Engineering. Bangkok King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [4] ชาญชัย จิตรัฐ. 2556. “การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับการวิเคราะห์กระแสผิดพ่วงในระบบไฟฟ้ากำลัง” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] พุฒิชจร บุญมี. 2547. “การหาตำแหน่งของฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] สุรสิทธิ์ สงบ. 2555. “การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม องค์ประกอบแบบสมมาตรและพีชชีเซต ในการระบุหาตำแหน่งและประเภทของการเกิดฟอลต์ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [7] วุฒิกกร ตรีวิทยานนท์. 2554. “ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ความผิดปกติของแบบอัตโนมัติสำหรับเครือข่ายสายส่ง” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] กองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า. 2559. **คู่มือการศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรด้วยโปรแกรม DIGSILENT**. นนทบุรี : ฝ่ายระบบควบคุมและป้องกัน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- [9] กองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า. 2556. **คู่มือจัดทำรายงานค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร**. นนทบุรี : ฝ่ายระบบควบคุมและป้องกัน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- [10] กองวางแผนปฏิบัติการระบบส่ง. 2559. **คู่มืออุปกรณ์และสายส่งกำลังไฟฟ้า**. นนทบุรี : ฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- [11] สุขชาติ ปรีชาธร. 2555. **วิศวกรรมการป้องกันระบบไฟฟ้าแรงสูง**. เล่มที่ 1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น
- [12] เจตพล อังกิตานนท์. 2550. “การวิเคราะห์ความผิดปกติพ่วงในระบบไฟฟ้ากำลังแบบไม่สมมาตรโดยใช้โปรแกรมภาษาฟอร์แทรน 77”. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 77 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Angrisani, L., Daponte, P. and Apuzzo, M. 1998. "A Method Based on Wavelet Networks for the Detection and Classification of Transients." IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, St.Paul, Minnesota, USA, 18-21 May 1998.
- [14] J. J. Mora. 2006. "Fault Location in Power Distribution Systems using ANFIS Nets and Current Patterns." IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition, Latin America.
- [15] M. Tarafdar. 2007. "Fault classification and location of power transmission lines using artificial neural network." International Power Engineering Conference (IPEC 2007), Singapore, Dec, 2007.
- [16] Jang. J.-S.R. 1993. "ANFIS : Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System." IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol.23, pp.665-685, May/June
- [17] Stephen Marx. And Dean Bender. 2013. "An Introduction to Symmetrical Components, System Modeling and Fault Calculation." 30th Annual HAND-ON Relay School, Washington State University
- [18] C. Jidrchu and S. Jirivipakorn. April-June, 2013. "Implementation of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference systems in Fault Current Analysis." Kasetsart Engineering Journal, Vol.26, No.84, pp.59-68.
- [19] J. W. Hi Hines. 1997. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering MATLAB Supplement. John Wiley and Sons, New York.
- [20] Martin T. Hagan, Howard B. Demuth Mark Beale. 1996 "Neural Network Design", Oklahoma State University
- [21] Fausent Laurene. 1994. "Fundamental of Neural Network. Englewood Cliffs." New Jersey : Prentice Hall International, Inc.
- [22] Demuth, H., Beale, M., and Hagan, M. 2005. Neural Network Toolbox for Use with MATLAB. 9ED. The Nath Works, Inc.
- [23] ราชบัณฑิตยสภา. 2558. พจนานุกรมศัพท์สถิติศาสตร์ ฉบับราชบัณฑิตยสภา. กรุงเทพฯ : สำนักงานราชบัณฑิตยสภา
- [24] [Online] <http://publish.illinois.edu/smartergrid/ieee-30-bus-system>, Information Trust Institute, University of Illinois.
- [25] [Online] <http://www.mathworks.com/help/fuzzy/anfis.html>



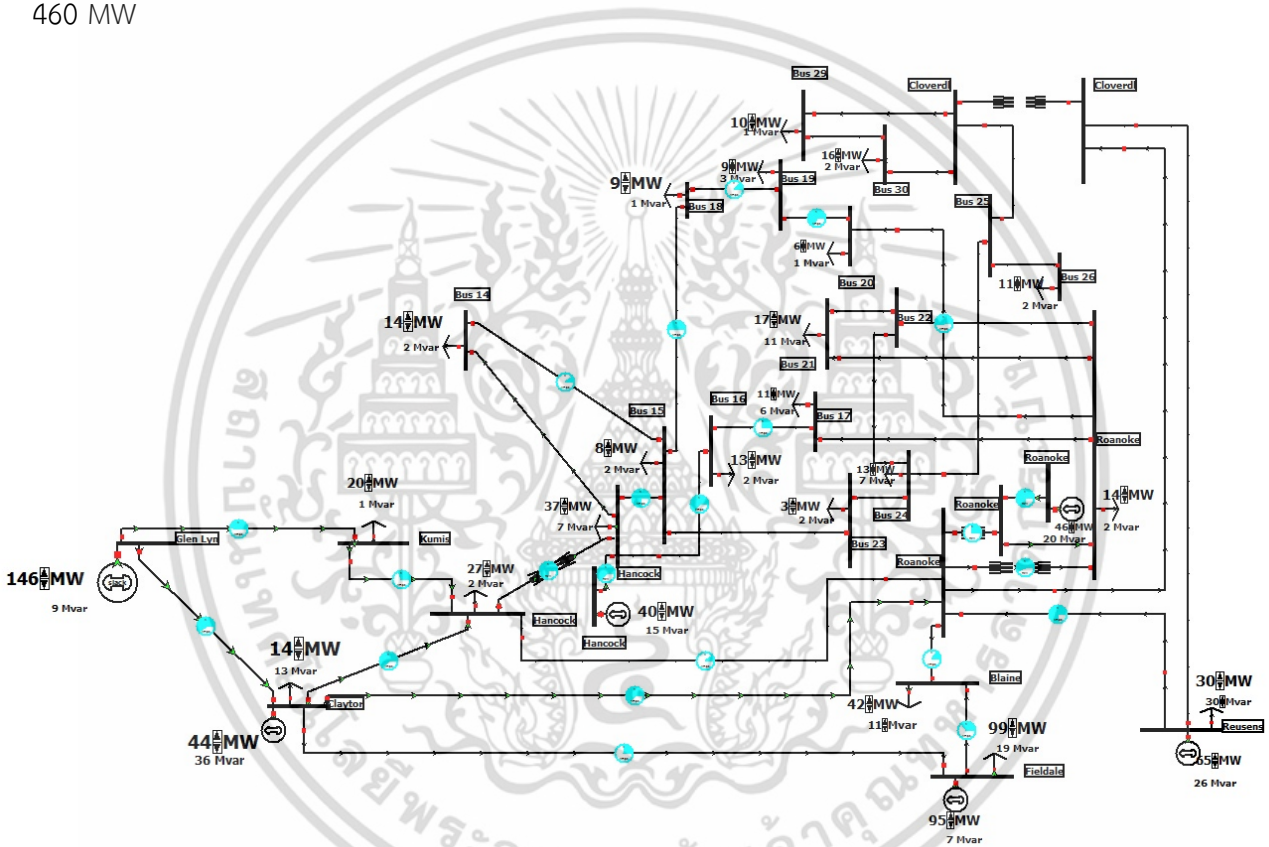
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ระบบไฟฟ้าที่ใช้ทำการศึกษา

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบไปด้วยระบบไฟฟ้า 2 ระบบ คือระบบทดสอบ IEEE 30 บัส ดังหัวข้อที่ ก.1 และอีกระบบได้ใช้ระบบไฟฟ้าจริงในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ดังหัวข้อที่ ก.2

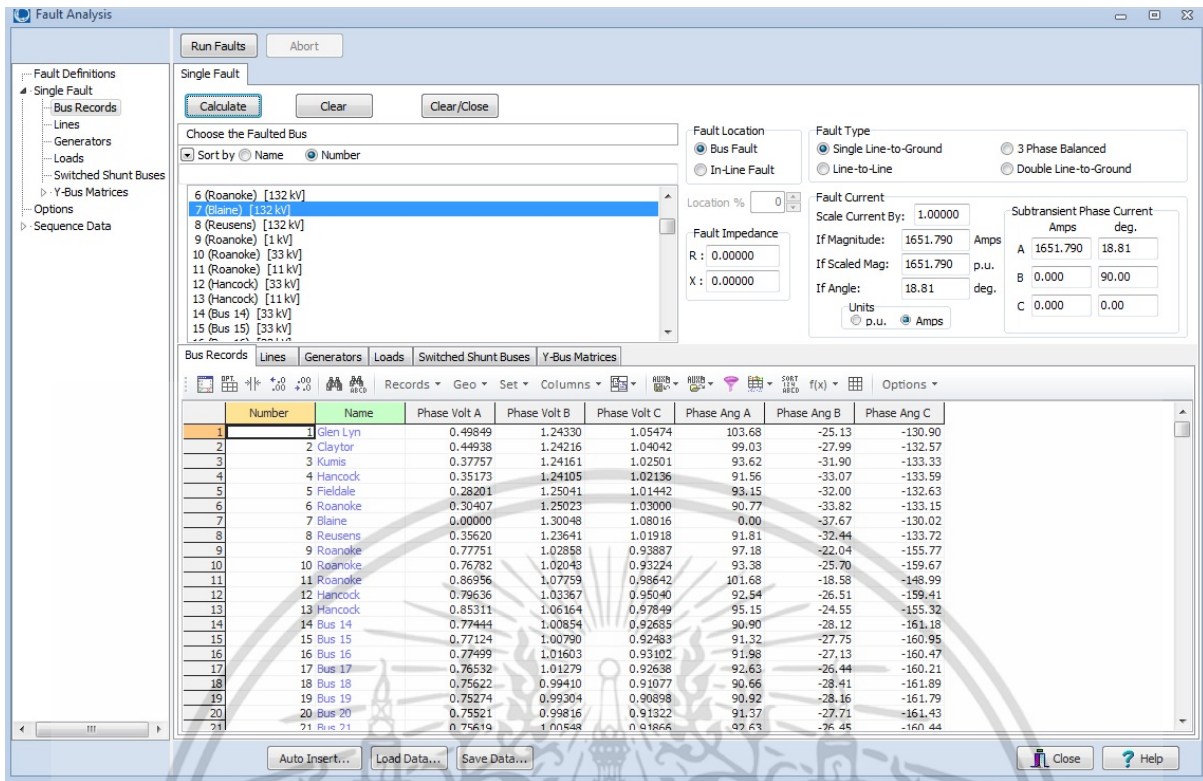
## ก.1 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส เป็นระบบไฟฟ้ามาตรฐานขนาดกลาง ประกอบไปด้วยบัสทั้งหมด 30 บัส แบ่งเป็นขนาดแรงดัน 132 kV จำนวน 9 บัส แรงดัน 33 kV จำนวน 18 บัส และ แรงดัน 11 kV จำนวน 3 บัส มีสายส่งเชื่อมโยงทั้งหมด 41 วงจร เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 เครื่อง และมีกำลังผลิตรวมทั้งระบบ 460 MW



รูปที่ ก.1.1 ระบบไฟฟ้าทดสอบ IEEE 30 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แล80ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1.2 การวิเคราะห์กระแสฟอลต์ของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส จากโปรแกรม PowerWorld

ตารางที่ ก.1.1 ข้อมูลที่ได้จากการจำลองหากระแสฟอลต์ของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส จากโปรแกรม Powerworld

No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$	No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$
1	1	1	1	SLG	1.9638	201	12	15	0.75	DLG	2.4969
2	1	1	1	L-L	2.2227	202	12	16	0.25	SLG	3.8589
3	1	1	1	DLG	1.5666	203	12	16	0.25	L-L	6.1087
4	1	2	0.25	SLG	1.9796	204	12	16	0.25	DLG	2.6077
5	1	2	0.25	L-L	2.2507	205	12	16	0.5	SLG	3.5897
6	1	2	0.25	DLG	1.5739	206	12	16	0.5	L-L	5.5974
7	1	2	0.5	SLG	2.0165	207	12	16	0.5	DLG	2.4433
8	1	2	0.5	L-L	2.2995	208	12	16	0.75	SLG	3.4232
9	1	2	0.5	DLG	1.5988	209	12	16	0.75	L-L	5.3091
10	1	2	0.75	SLG	2.0773	210	12	16	0.75	DLG	2.3368
11	1	2	0.75	L-L	2.3719	211	14	14	1	SLG	2.8358
12	1	2	0.75	DLG	1.6431	212	14	14	1	L-L	4.2378
13	1	3	0.25	SLG	1.7264	213	14	14	1	DLG	1.9668
14	1	3	0.25	L-L	2.0271	214	14	15	0.25	SLG	2.8581
15	1	3	0.25	DLG	1.3503	215	14	15	0.25	L-L	4.2479
16	1	3	0.5	SLG	1.6249	216	14	15	0.25	DLG	1.9858
17	1	3	0.5	L-L	1.9588	217	14	15	0.5	SLG	2.9703
18	1	3	0.5	DLG	1.2525	218	14	15	0.5	L-L	4.4371
19	1	3	0.75	SLG	1.6218	219	14	15	0.5	DLG	2.0575
20	1	3	0.75	L-L	1.9966	220	14	15	0.75	SLG	3.1938

No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$	No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$
21	1	3	0.75	DLG	1.2343	221	14	15	0.75	L-L	4.8592
22	2	2	1	SLG	2.1665	222	14	15	0.75	DLG	2.1926
23	2	2	1	L-L	2.4725	223	15	15	1	SLG	3.5665
24	2	2	1	DLG	1.7104	224	15	15	1	L-L	5.6469
25	2	4	0.25	SLG	1.8232	225	15	15	1	DLG	2.4063
26	2	4	0.25	L-L	2.1663	226	15	18	0.25	SLG	3.2313
27	2	4	0.25	DLG	1.4127	227	15	18	0.25	L-L	5.0166
28	2	4	0.5	SLG	1.7027	228	15	18	0.25	DLG	2.2023
29	2	4	0.5	L-L	2.0777	229	15	18	0.5	SLG	3.0098
30	2	4	0.5	DLG	1.3011	230	15	18	0.5	L-L	4.6223
31	2	4	0.75	SLG	1.7343	231	15	18	0.5	DLG	2.0633
32	2	4	0.75	L-L	2.1619	232	15	18	0.75	SLG	2.8683
33	2	4	0.75	DLG	1.3078	233	15	18	0.75	L-L	4.3839
34	2	5	0.25	SLG	1.8169	234	15	18	0.75	DLG	1.9716
35	2	5	0.25	L-L	2.1237	235	15	23	0.25	SLG	3.2379
36	2	5	0.25	DLG	1.4199	236	15	23	0.25	L-L	5.0527
37	2	5	0.5	SLG	1.6680	237	15	23	0.25	DLG	2.2030
38	2	5	0.5	L-L	1.9657	238	15	23	0.5	SLG	3.0101
39	2	5	0.5	DLG	1.2978	239	15	23	0.5	L-L	4.6650
40	2	5	0.75	SLG	1.6445	240	15	23	0.5	DLG	2.0573
41	2	5	0.75	L-L	1.9325	241	15	23	0.75	SLG	2.8535
42	2	5	0.75	DLG	1.2787	242	15	23	0.75	L-L	4.4163
43	2	6	0.25	SLG	1.8475	243	15	23	0.75	DLG	1.9536
44	2	6	0.25	L-L	2.1903	244	16	16	1	SLG	3.2791
45	2	6	0.25	DLG	1.4328	245	16	16	1	L-L	5.0976
46	2	6	0.5	SLG	1.7487	246	16	16	1	DLG	2.2372
47	2	6	0.5	L-L	2.1246	247	16	17	0.25	SLG	3.2521
48	2	6	0.5	DLG	1.3383	248	16	17	0.25	L-L	5.0818
49	2	6	0.75	SLG	1.8121	249	16	17	0.25	DLG	2.2158
50	2	6	0.75	L-L	2.2428	250	16	17	0.5	SLG	3.2801
51	2	6	0.75	DLG	1.3697	251	16	17	0.5	L-L	5.1752
52	3	3	1	SLG	1.7193	252	16	17	0.5	DLG	2.2269
53	3	3	1	L-L	2.1559	253	16	17	0.75	SLG	3.3658
54	3	3	1	DLG	1.2914	254	16	17	0.75	L-L	5.3908
55	3	4	0.25	SLG	1.7604	255	16	17	0.75	DLG	2.2712
56	3	4	0.25	L-L	2.2152	256	17	17	1	SLG	3.5102
57	3	4	0.25	DLG	1.3188	257	17	17	1	L-L	5.7459
58	3	4	0.5	SLG	1.8103	258	17	17	1	DLG	2.3471
59	3	4	0.5	L-L	2.2861	259	18	18	1	SLG	2.7507
60	3	4	0.5	DLG	1.3522	260	18	18	1	L-L	4.2045
61	3	4	0.75	SLG	1.8701	261	18	18	1	DLG	1.8911
62	3	4	0.75	L-L	2.3703	262	18	19	0.25	SLG	2.7238
63	3	4	0.75	DLG	1.3924	263	18	19	0.25	L-L	4.1648
64	4	4	1	SLG	1.9417	264	18	19	0.25	DLG	1.8730
65	4	4	1	L-L	2.4706	265	18	19	0.5	SLG	2.7141
66	4	4	1	DLG	1.4405	266	18	19	0.5	L-L	4.1577

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ 82 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$	No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$
67	4	6	0.25	SLG	1.9556	267	18	19	0.5	DLG	1.8653
68	4	6	0.25	L-L	2.4790	268	18	19	0.75	SLG	2.7212
69	4	6	0.25	DLG	1.4531	269	18	19	0.75	L-L	4.1827
70	4	6	0.5	SLG	1.9830	270	18	19	0.75	DLG	1.8676
71	4	6	0.5	L-L	2.5059	271	19	19	1	SLG	2.7429
72	4	6	0.5	DLG	1.4750	272	19	19	1	L-L	4.2374
73	4	6	0.75	SLG	2.0254	273	19	19	1	DLG	1.8785
74	4	6	0.75	L-L	2.5524	274	19	20	0.25	SLG	2.7592
75	4	6	0.75	DLG	1.5072	275	19	20	0.25	L-L	4.2702
76	5	5	1	SLG	1.7387	276	19	20	0.25	DLG	1.8885
77	5	5	1	L-L	2.0121	277	19	20	0.5	SLG	2.7806
78	5	5	1	DLG	1.3564	278	19	20	0.5	L-L	4.3133
79	5	7	0.25	SLG	1.6512	279	19	20	0.5	DLG	1.9014
80	5	7	0.25	L-L	1.9508	280	19	20	0.75	SLG	2.8073
81	5	7	0.25	DLG	1.2766	281	19	20	0.75	L-L	4.3672
82	5	7	0.5	SLG	1.6105	282	19	20	0.75	DLG	1.9175
83	5	7	0.5	L-L	1.9365	283	20	20	1	SLG	2.8545
84	5	7	0.5	DLG	1.2348	284	20	20	1	L-L	4.4560
85	5	7	0.75	SLG	1.6110	285	20	20	1	DLG	1.9470
86	5	7	0.75	L-L	1.9676	286	21	21	1	SLG	3.5133
87	5	7	0.75	DLG	1.2247	287	21	21	1	L-L	5.9468
88	6	6	1	SLG	2.0844	288	21	21	1	DLG	2.3202
89	6	6	1	L-L	2.6207	289	21	22	0.25	SLG	3.5025
90	6	6	1	DLG	1.5509	290	21	22	0.25	L-L	5.9229
91	6	7	0.25	SLG	1.9026	291	21	22	0.25	DLG	2.3139
92	6	7	0.25	L-L	2.4118	292	21	22	0.5	SLG	3.4953
93	6	7	0.25	DLG	1.4145	293	21	22	0.5	L-L	5.9074
94	6	7	0.5	SLG	1.7668	294	21	22	0.5	DLG	2.3095
95	6	7	0.5	L-L	2.2560	295	21	22	0.75	SLG	3.4916
96	6	7	0.5	DLG	1.3119	296	21	22	0.75	L-L	5.8999
97	6	7	0.75	SLG	1.6642	297	21	22	0.75	DLG	2.3072
98	6	7	0.75	L-L	2.1395	298	22	22	1	SLG	3.4910
99	1	1	1	DLG	1.2335	299	22	22	1	L-L	5.8999
100	1	1	1	SLG	1.9155	300	22	22	1	DLG	2.3065
101	6	7	0.75	L-L	2.4010	301	22	24	0.25	SLG	3.2355
102	6	8	0.25	DLG	1.4314	302	22	24	0.25	L-L	5.3795
103	6	8	0.25	SLG	1.7950	303	22	24	0.25	DLG	2.1520
104	6	8	0.25	L-L	2.2426	304	22	24	0.5	SLG	3.0572
105	6	8	0.5	DLG	1.3459	305	22	24	0.5	L-L	5.0634
106	6	8	0.5	SLG	1.7101	306	22	24	0.5	DLG	2.0379
107	6	8	0.5	L-L	2.1287	307	22	24	0.75	SLG	2.9382
108	6	8	0.75	DLG	1.2856	308	22	24	0.75	L-L	4.8952
109	6	8	0.75	SLG	2.0073	309	22	24	0.75	DLG	1.9557
110	6	8	0.75	L-L	2.5103	310	23	23	1	SLG	2.7120
111	6	28	0.25	DLG	1.5009	311	23	23	1	L-L	4.2108
112	6	28	0.25	SLG	1.9484	312	23	23	1	DLG	1.8558

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และ 83 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$	No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$
113	6	28	0.25	L-L	2.4224	313	23	24	0.25	SLG	2.6391
114	6	28	0.5	DLG	1.4638	314	23	24	0.25	L-L	4.1312
115	6	28	0.5	SLG	1.9050	315	23	24	0.25	DLG	1.8014
116	6	28	0.5	L-L	2.3534	316	23	24	0.5	SLG	2.6335
117	6	28	0.75	DLG	1.4377	317	23	24	0.5	L-L	4.1876
118	6	28	0.75	SLG	1.6530	318	23	24	0.5	DLG	1.7869
119	6	28	0.75	L-L	2.0491	319	23	24	0.75	SLG	2.6945
120	7	7	1	DLG	1.2454	320	23	24	0.75	L-L	4.3915
121	7	7	1	SLG	1.8752	321	23	24	0.75	DLG	1.8107
122	7	7	1	L-L	2.3008	322	24	24	1	SLG	2.8027
123	8	8	1	DLG	1.4215	323	24	24	1	L-L	4.7396
124	8	8	1	SLG	1.5448	324	24	24	1	DLG	1.8567
125	8	8	1	L-L	1.9339	325	24	25	0.25	SLG	2.3853
126	8	28	0.25	DLG	1.1650	326	24	25	0.25	L-L	4.1239
127	8	28	0.25	SLG	1.4247	327	24	25	0.25	DLG	1.5750
128	8	28	0.25	L-L	1.8065	328	24	25	0.5	SLG	2.0974
129	8	28	0.5	DLG	1.0690	329	24	25	0.5	L-L	3.7759
130	8	28	0.5	SLG	1.4360	330	24	25	0.5	DLG	1.3707
131	8	28	0.5	L-L	1.8396	331	24	25	0.75	SLG	1.8893
132	8	28	0.75	DLG	1.0711	332	24	25	0.75	L-L	3.5968
133	8	28	0.75	SLG	4.0234	333	24	25	0.75	DLG	1.2163
134	8	28	0.75	L-L	7.0087	334	25	25	1	SLG	1.7046
135	10	10	1	DLG	2.6273	335	25	25	1	L-L	3.4851
136	10	10	1	SLG	3.8660	336	25	25	1	DLG	1.0772
137	10	10	1	L-L	6.5980	337	25	26	0.25	SLG	1.4701
138	10	17	0.25	DLG	2.5440	338	25	26	0.25	L-L	2.8048
139	10	17	0.25	SLG	3.7351	339	25	26	0.25	DLG	0.9471
140	10	17	0.25	L-L	6.2686	340	25	26	0.5	SLG	1.2932
141	10	17	0.5	DLG	2.4735	341	25	26	0.5	L-L	2.3550
142	10	17	0.5	SLG	3.6265	342	25	26	0.5	DLG	0.8449
143	10	17	0.5	L-L	6.0033	343	25	26	0.75	SLG	1.1552
144	10	17	0.75	DLG	2.4144	344	25	26	0.75	L-L	2.0359
145	10	17	0.75	SLG	3.5675	345	25	26	0.75	DLG	0.7626
146	10	17	0.75	L-L	5.9234	346	25	27	0.25	SLG	1.6234
147	10	20	0.25	DLG	2.3734	347	25	27	0.25	L-L	3.4756
148	10	20	0.25	SLG	3.2613	348	25	27	0.25	DLG	1.0147
149	10	20	0.25	L-L	5.2543	349	25	27	0.5	SLG	1.5546
150	10	20	0.5	DLG	2.1963	350	25	27	0.5	L-L	3.5091
151	10	20	0.5	SLG	3.0544	351	25	27	0.5	DLG	0.9600
152	10	20	0.5	L-L	4.8264	352	25	27	0.75	SLG	1.4960
153	10	20	0.75	DLG	2.0733	353	25	27	0.75	L-L	3.5879
154	10	20	0.75	SLG	3.8360	354	25	27	0.75	DLG	0.9117
155	10	20	0.75	L-L	6.5870	355	26	26	1	SLG	0.9990
156	10	21	0.25	DLG	2.5192	356	26	26	1	L-L	1.7192
157	10	21	0.25	SLG	3.7027	357	26	26	1	DLG	0.6646
158	10	21	0.25	L-L	6.3014	358	27	27	1	SLG	1.4612

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ บริษัท ไร่เชิง นนทบุรี จำกัด ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ 84 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$	No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$
159	10	21	0.5	DLG	2.4403	359	27	27	1	L-L	3.7572
160	10	21	0.5	SLG	3.6144	360	27	27	1	DLG	0.8780
161	10	21	0.5	L-L	6.1228	361	27	29	0.25	SLG	1.2917
162	10	21	0.75	DLG	2.3864	362	27	29	0.25	L-L	3.0103
163	10	21	0.75	SLG	3.6650	363	27	29	0.25	DLG	0.7924
164	10	21	0.75	L-L	6.1931	364	27	29	0.5	SLG	1.1776
165	10	22	0.25	DLG	2.4228	365	27	29	0.5	L-L	2.5881
166	10	22	0.25	SLG	3.4887	366	27	29	0.5	DLG	0.7322
167	10	22	0.25	L-L	5.8212	367	27	29	0.75	SLG	1.0997
168	10	22	0.5	DLG	2.3183	368	27	29	0.75	L-L	2.3324
169	10	22	0.5	SLG	3.4509	369	27	29	0.75	DLG	0.6896
170	10	22	0.5	L-L	5.7595	370	27	30	0.25	SLG	1.2338
171	10	22	0.75	DLG	2.2926	371	27	30	0.25	L-L	2.7849
172	10	22	0.75	SLG	4.2747	372	27	30	0.25	DLG	0.7625
173	10	22	0.75	L-L	6.9685	373	27	30	0.5	SLG	1.1042
174	12	12	1	DLG	2.8511	374	27	30	0.5	L-L	2.3404
175	12	12	1	SLG	4.2295	375	27	30	0.5	DLG	0.6927
176	12	12	1	L-L	6.4932	376	27	30	0.75	SLG	1.0312
177	12	13	0.25	DLG	2.8990	377	27	30	0.75	L-L	2.1241
178	12	13	0.25	SLG	4.2081	378	27	30	0.75	DLG	0.6514
179	12	13	0.25	L-L	6.0946	379	28	28	1	SLG	1.5867
180	12	13	0.5	DLG	2.9641	380	28	28	1	L-L	2.0536
181	12	13	0.5	SLG	4.2100	381	28	28	1	DLG	1.1734
182	12	13	0.5	L-L	5.7622	382	29	29	1	SLG	1.0009
183	12	13	0.75	DLG	3.0487	383	29	29	1	L-L	2.0806
184	12	13	0.75	SLG	3.5854	384	29	29	1	DLG	0.6306
185	12	13	0.75	L-L	5.5904	385	29	30	0.25	SLG	0.9626
186	12	14	0.25	DLG	2.4411	386	29	30	0.25	L-L	1.9612
187	12	14	0.25	SLG	3.2013	387	29	30	0.25	DLG	0.6097
188	12	14	0.25	L-L	4.8768	388	29	30	0.5	SLG	0.9430
189	12	14	0.5	DLG	2.2035	389	29	30	0.5	L-L	1.9051
190	12	14	0.5	SLG	2.9928	390	29	30	0.5	DLG	0.5986
191	12	14	0.5	L-L	4.5018	391	29	30	0.75	SLG	0.9400
192	12	14	0.75	DLG	2.0715	392	29	30	0.75	L-L	1.9019
193	12	14	0.75	SLG	3.9872	393	29	30	0.75	DLG	0.5963
194	12	14	0.75	L-L	6.3824	394	30	30	1	SLG	0.9394
195	12	15	0.25	DLG	2.6800	395	30	30	1	L-L	2.4969
196	12	15	0.25	SLG	3.8015	396	30	30	1	DLG	3.8589
197	12	15	0.25	L-L	6.0267						
198	12	15	0.5	DLG	2.5656						
199	12	15	0.5	SLG	3.6954						
200	12	15	0.5	L-L	5.8391						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 85 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

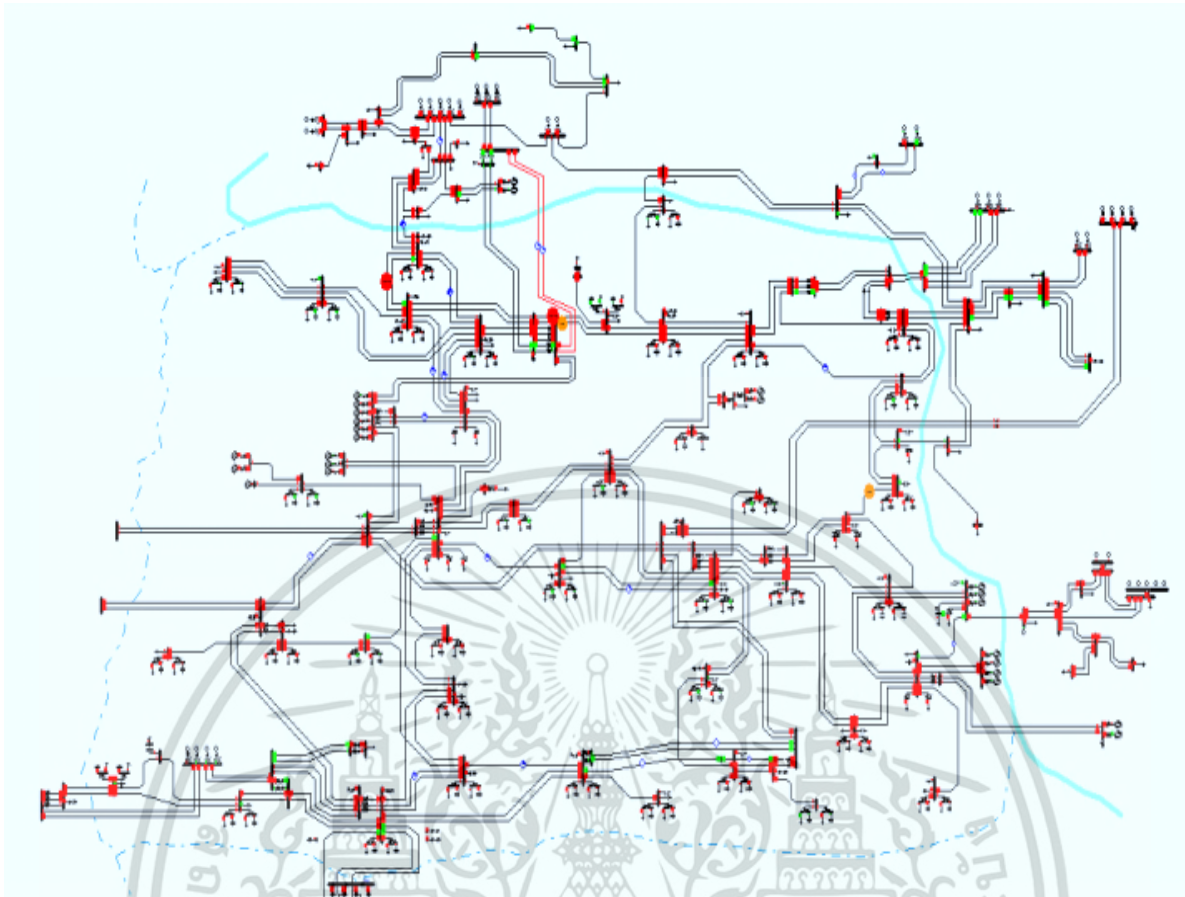
## ข้อมูลระบบไฟฟ้า IEEE 30 bus

DATA (BUS, [BusNum,BusName,AreaName,BusNomVolt,BusPUVolt,BusKVolt,BusAngle,BusLoadMW,  
BusLoadMVR,BusGenMW,BusGenMVR,BusSS,BusG,BusB,AreaNum,ZoneNum])

```
{
  1 "Glen Lyn" "1" 132.00 1.06000 139.920 98.43 "" "" 154.50 8.05 "" 0.00 0.00 1 1
  2 "Claytor" "1" 132.00 1.04501 137.941 95.81 14.29 13.25 46.00 38.66 "" 0.00 0.00 1 1
  3 "Kumis" "1" 132.00 1.01602 134.115 92.91 21.29 1.25 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  4 "Hancock" "1" 132.00 1.00766 133.011 92.06 28.31 1.67 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  5 "Fieldale" "1" 132.00 1.01002 133.322 92.75 104.56 19.83 100.00 9.53 "" 0.00 0.00 1 1
  6 "Roanoke" "1" 132.00 1.00687 132.907 91.83 "" "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  7 "Blaine" "1" 132.00 0.99551 131.407 91.08 44.30 11.38 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  8 "Reusens" "1" 132.00 1.01002 133.323 92.41 31.31 31.31 68.00 31.55 "" 0.00 0.00 1 1
  9 "Roanoke" "1" 1.00 1.04473 1.045 89.98 "" "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  10 "Roanoke" "1" 33.00 1.03781 34.248 86.22 14.40 2.08 "" "" "" 0.00 20.46 1 1
  11 "Roanoke" "1" 11.00 1.08202 11.902 95.05 "" "" 48.00 21.52 "" 0.00 0.00 1 1
  12 "Hancock" "1" 33.00 1.05028 34.659 86.00 39.45 7.83 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  13 "Hancock" "1" 11.00 1.07102 11.781 88.99 "" "" 42.00 16.97 "" 0.00 0.00 1 1
  14 "Bus 14" "1" 33.00 1.02512 33.829 84.30 14.94 1.67 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  15 "Bus 15" "1" 33.00 1.02430 33.802 84.58 8.92 2.61 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  16 "Bus 16" "1" 33.00 1.03241 34.070 85.12 14.21 1.88 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  17 "Bus 17" "1" 33.00 1.02991 33.987 85.59 11.48 6.05 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  18 "Bus 18" "1" 33.00 1.01055 33.348 83.77 9.48 0.94 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  19 "Bus 19" "1" 33.00 1.00965 33.318 83.94 9.91 3.55 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  20 "Bus 20" "1" 33.00 1.01493 33.493 84.34 6.23 0.73 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  21 "Bus 21" "1" 33.00 1.02274 33.751 85.46 18.26 11.69 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  22 "Bus 22" "1" 33.00 1.02265 33.748 85.39 "" "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  23 "Bus 23" "1" 33.00 1.00991 33.327 84.10 3.34 1.67 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  24 "Bus 24" "1" 33.00 0.99969 32.990 83.81 13.25 7.00 "" "" "" 0.00 4.30 1 1
  25 "Bus 25" "1" 33.00 0.98284 32.434 82.69 "" "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  26 "Bus 26" "1" 33.00 0.94013 31.024 80.27 11.88 2.40 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  27 "Cloverdl" "1" 33.00 0.99312 32.773 83.28 "" "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  28 "Cloverdl" "1" 132.00 0.99827 131.772 91.11 "" "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  29 "Bus 29" "1" 33.00 0.94931 31.327 79.72 10.86 0.94 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
  30 "Bus 30" "1" 33.00 0.93570 30.878 78.62 17.32 1.98 "" "" "" 0.00 0.00 1 1
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ ก.2.2 ระบบไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. ในโปรแกรม Powerworld

Fault Analysis

Choose the Faulted Bus

Sort by Name / Sort by Number

222 (UB2-4J) [115 KV]  
 223 (NN-4J) [115 KV]  
 224 (NN-5J) [115 KV]  
**226 (YT\_1) [115 KV]**  
 227 (NV-1J) [115 KV]  
 228 (su115) [115 KV]

Fault Location:  Bus Fault,  In-Line Fault

Location %: 0

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

XF Wye-Delta Phase Shift:  Include in Calculation

Data Type Shown: Current Units:  p.u.,  Amps

Online Display:  Normal,  Phase A,  Phase C

Fault Current: Magnitude: 16656.500 Amps, Angle: -8.79 deg.

Number	Name	Phase Volt A	Phase Volt B	Phase Volt C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
102	202 KK1-4J	0.97145	0.54623	1.23905	53.77	-67.18	135.44
103	203 KK1-5J	0.97145	0.54623	1.23905	53.77	-67.18	135.44
104	204 RE-3J	0.93229	0.34092	1.70072	70.97	21.91	117.66
105	205 RE-4J	0.93229	0.34092	1.70072	70.97	21.91	117.66
106	206 CYP-2J	1.00316	0.72651	1.15707	43.65	-82.31	138.78
107	207 RE-5J	0.93229	0.34092	1.70072	70.97	21.91	117.66
108	208 NPO2-1J	0.96820	0.67926	1.17745	52.56	-68.82	142.64
109	209 NPO2-2J	0.96820	0.67926	1.17745	52.56	-68.82	142.64
110	210 NR2-3J	0.95936	0.80699	1.08814	34.42	-91.88	137.81
111	211 NPO2-3J	0.96820	0.67926	1.17745	52.56	-68.82	142.64
112	212 NP-2J	0.00000	0.00000	0.00000	0.00	0.00	0.00
113	214 YT_1	0.18927	0.30222	1.51898	-98.73	-38.54	124.77
114	215 YT_1	0.18927	0.30222	1.51898	-98.73	-38.54	124.77
115	216 S01-2J	0.00000	0.00000	0.00000	0.00	0.00	0.00

Calculate Clear Clear/Close Close Help

รูปที่ ก.2.3 การวิเคราะห์กระแสฟอลต์ของระบบไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. จากโปรแกรม PowerWorld

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แล88ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2.1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการจำลองหากระแสฟอลต์ของระบบไฟฟ้าพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กพพ. จากโปรแกรม Powerworld จำนวน 250 ชุด

No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$	No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$
1	1	1	1	SLG	0.704	126	20	23	0.75	DLG	1.834
2	1	1	1	L-L	0.888	127	20	20	1	SLG	2.437
3	1	1	1	DLG	0.535	128	20	20	1	L-L	2.989
4	2	2	1	SLG	0.923	129	20	20	1	DLG	1.882
5	2	2	1	L-L	1.280	130	21	21	1	SLG	2.685
6	2	2	1	DLG	0.667	131	21	21	1	L-L	3.083
7	3	3	1	SLG	1.401	132	21	21	1	DLG	2.153
8	3	3	1	L-L	1.796	133	22	22	1	SLG	2.464
9	3	3	1	DLG	1.054	134	22	22	1	L-L	3.092
10	4	11	0.25	SLG	1.806	135	22	22	1	DLG	1.880
11	4	11	0.25	L-L	1.909	136	23	23	1	SLG	2.680
12	4	11	0.25	DLG	1.528	137	23	23	1	L-L	3.270
13	4	11	0.50	SLG	1.886	138	23	23	1	DLG	2.076
14	4	11	0.50	L-L	2.037	139	24	24	1	SLG	3.493
15	4	11	0.50	DLG	1.572	140	24	24	1	L-L	3.343
16	4	11	0.75	SLG	2.024	141	24	24	1	DLG	3.187
17	4	11	0.75	L-L	2.221	142	25	25	1	SLG	2.747
18	4	11	0.75	DLG	1.671	143	25	25	1	L-L	3.585
19	4	4	1	SLG	1.769	144	25	25	1	DLG	2.053
20	4	4	1	L-L	1.818	145	26	26	1	SLG	3.051
21	4	4	1	DLG	1.527	146	26	26	1	L-L	3.598
22	5	5	1	SLG	1.466	147	26	26	1	DLG	2.410
23	5	5	1	L-L	1.917	148	27	73	0.25	SLG	3.598
24	5	5	1	DLG	1.092	149	27	73	0.25	L-L	4.451
25	6	6	1	SLG	1.877	150	27	73	0.25	DLG	2.768
26	6	6	1	L-L	1.940	151	27	73	0.50	SLG	4.708
27	6	6	1	DLG	1.615	152	27	73	0.50	L-L	5.618
28	7	7	1	SLG	1.573	153	27	73	0.50	DLG	3.694
29	7	7	1	L-L	2.007	154	27	73	0.75	SLG	7.279
30	7	7	1	DLG	1.191	155	27	73	0.75	L-L	8.118
31	8	8	1	SLG	1.857	156	27	73	0.75	DLG	5.950
32	8	8	1	L-L	2.082	157	27	27	1	SLG	3.001
33	8	8	1	DLG	1.513	158	27	27	1	L-L	3.805
34	9	2	0.25	SLG	1.425	159	27	27	1	DLG	2.278
35	9	2	0.25	L-L	1.977	160	28	26	0.25	SLG	2.849
36	9	2	0.25	DLG	1.030	161	28	26	0.25	L-L	3.483
37	9	2	0.50	SLG	1.207	162	28	26	0.25	DLG	2.205
38	9	2	0.50	L-L	1.673	163	28	26	0.50	SLG	2.757
39	9	2	0.50	DLG	0.873	164	28	26	0.50	L-L	3.347
40	9	2	0.75	SLG	1.047	165	28	26	0.50	DLG	2.142
41	9	2	0.75	L-L	1.450	166	28	26	0.75	SLG	2.815
42	9	2	0.75	DLG	0.757	167	28	26	0.75	L-L	3.379
43	9	9	1	SLG	1.736	168	28	26	0.75	DLG	2.202

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ 89 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$	No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$
44	9	9	1	SLG	2.411	169	28	28	1	SLG	3.123
45	9	9	1	L-L	1.254	170	28	28	1	L-L	3.835
46	10	11	0.25	DLG	2.224	171	28	28	1	DLG	2.412
47	10	11	0.25	SLG	2.456	172	29	35	0.25	SLG	3.021
48	10	11	0.25	L-L	1.827	173	29	35	0.25	L-L	3.422
49	10	11	0.50	DLG	2.233	174	29	35	0.25	DLG	2.444
50	10	11	0.50	SLG	2.467	175	29	35	0.50	SLG	2.922
51	10	11	0.50	L-L	1.834	176	29	35	0.50	L-L	3.371
52	10	11	0.75	DLG	2.242	177	29	35	0.50	DLG	2.339
53	10	11	0.75	SLG	2.478	178	29	35	0.75	SLG	3.223
54	10	11	0.75	L-L	1.841	179	29	35	0.75	L-L	3.732
55	10	10	1	DLG	2.216	180	29	35	0.75	DLG	2.573
56	10	10	1	SLG	2.446	181	29	29	1	SLG	3.606
57	10	10	1	L-L	1.821	182	29	29	1	L-L	3.915
58	11	11	1	DLG	2.251	183	29	29	1	DLG	2.999
59	11	11	1	SLG	2.488	184	33	33	1	SLG	3.711
60	11	11	1	L-L	1.848	185	33	33	1	L-L	4.781
61	12	57	0.25	DLG	2.341	186	33	33	1	DLG	2.793
62	12	57	0.25	SLG	3.009	187	34	19	0.25	SLG	2.596
63	12	57	0.25	L-L	1.764	188	34	19	0.25	L-L	2.983
64	12	57	0.50	DLG	2.926	189	34	19	0.25	DLG	2.083
65	12	57	0.50	SLG	3.668	190	34	19	0.50	SLG	2.035
66	12	57	0.50	L-L	2.234	191	34	19	0.50	L-L	2.471
67	12	57	0.75	DLG	4.132	192	34	19	0.50	DLG	1.582
68	12	57	0.75	SLG	4.973	193	34	19	0.75	SLG	1.931
69	12	57	0.75	L-L	3.225	194	34	19	0.75	L-L	2.423
70	12	12	1	DLG	2.008	195	34	19	0.75	DLG	1.474
71	12	12	1	SLG	2.635	196	34	34	1	SLG	4.941
72	12	12	1	L-L	1.498	197	34	34	1	L-L	4.825
73	13	13	1	DLG	2.395	198	34	34	1	DLG	4.433
74	13	13	1	SLG	2.672	199	35	13	0.25	SLG	2.855
75	13	13	1	L-L	1.955	200	35	13	0.25	L-L	3.343
76	14	14	1	DLG	1.954	201	35	13	0.25	DLG	2.264
77	14	14	1	SLG	2.679	202	35	13	0.50	SLG	2.389
78	14	14	1	L-L	1.425	203	35	13	0.50	L-L	2.794
79	16	25	0.25	DLG	2.100	204	35	13	0.50	DLG	1.896
80	16	25	0.25	SLG	2.733	205	35	13	0.75	SLG	2.270
81	16	25	0.25	L-L	1.573	206	35	13	0.75	L-L	2.614
82	16	25	0.50	DLG	2.193	207	35	13	0.75	DLG	1.818
83	16	25	0.50	SLG	2.858	208	35	3	0.25	SLG	2.835
84	16	25	0.50	L-L	1.641	209	35	3	0.25	L-L	3.410
85	16	25	0.75	DLG	2.389	210	35	3	0.25	DLG	2.212
86	16	25	0.75	SLG	3.115	211	35	3	0.50	SLG	2.119
87	16	25	0.75	L-L	1.787	212	35	3	0.50	L-L	2.626
88	16	16	1	DLG	2.088	213	35	3	0.50	DLG	1.625
89	16	16	1	SLG	2.714	214	35	3	0.75	SLG	1.688

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ 90 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$	No.	Near Bus	Far Bus	%	Type	$I_f$
90	16	16	1	L-L	1.565	215	35	3	0.75	L-L	2.133
91	17	17	1	DLG	2.676	216	35	3	0.75	DLG	1.280
92	17	17	1	SLG	2.749	217	35	35	1	SLG	4.252
93	17	17	1	L-L	2.312	218	35	35	1	L-L	4.850
94	18	18	1	DLG	2.129	219	35	35	1	DLG	3.423
95	18	18	1	SLG	2.787	220	36	7	0.25	SLG	2.872
96	18	18	1	L-L	1.590	221	36	7	0.25	L-L	3.595
97	19	16	0.25	DLG	2.127	222	36	7	0.25	DLG	2.194
98	19	16	0.25	SLG	2.765	223	36	7	0.50	SLG	2.252
99	19	16	0.25	L-L	1.595	224	36	7	0.50	L-L	2.844
100	19	16	0.50	DLG	2.110	225	36	7	0.50	DLG	1.713
101	19	16	0.50	SLG	2.742	226	36	7	0.75	SLG	1.853
102	19	16	0.50	L-L	1.581	227	36	7	0.75	L-L	2.353
103	19	16	0.75	DLG	2.097	228	36	7	0.75	DLG	1.405
104	19	16	0.75	SLG	2.726	229	36	43	0.25	SLG	3.434
105	19	16	0.75	L-L	1.571	230	36	43	0.25	L-L	4.282
106	19	25	0.25	DLG	2.082	231	36	43	0.25	DLG	2.629
107	19	25	0.25	SLG	2.709	232	36	43	0.50	SLG	3.345
108	19	25	0.25	L-L	1.560	233	36	43	0.50	L-L	4.196
109	19	25	0.50	DLG	2.135	234	36	43	0.50	DLG	2.554
110	19	25	0.50	SLG	2.781	235	36	43	0.75	SLG	3.625
111	19	25	0.50	L-L	1.599	236	36	43	0.75	L-L	4.558
112	19	25	0.75	DLG	2.328	237	36	43	0.75	DLG	2.762
113	19	25	0.75	SLG	3.036	238	36	36	1	SLG	3.960
114	19	25	0.75	L-L	1.742	239	36	36	1	L-L	4.884
115	19	19	1	DLG	2.149	240	36	36	1	DLG	3.050
116	19	19	1	SLG	2.792	241	37	35	0.25	SLG	3.921
117	19	19	1	L-L	1.611	242	37	35	0.25	L-L	4.405
118	20	23	0.25	DLG	2.278	243	37	35	0.25	DLG	3.189
119	20	23	0.25	SLG	2.809	244	37	35	0.50	SLG	3.733
120	20	23	0.25	L-L	1.754	245	37	35	0.50	L-L	4.254
121	20	23	0.50	DLG	2.260	246	37	35	0.50	DLG	3.009
122	20	23	0.50	SLG	2.789	247	37	35	0.75	SLG	3.828
123	20	23	0.50	L-L	1.740	248	37	35	0.75	L-L	4.386
124	20	23	0.75	DLG	2.378	249	37	35	0.75	DLG	3.075
125	20	23	0.75	SLG	2.925	250	37	21	0.25	SLG	2.903

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แล91ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลระบบไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (ข้อมูล ปี 2558)  
 สำหรับการคำนวณ Power Flow เพื่อการวิเคราะห์หาค่ากระแสสูงสุด

Area 2 - 2

Number of Buses 257  
 Total Load 2587.7 MW 1159.8 MVAR  
 Total Generation 1087.1 MW 165.4 MVAR  
 Losses 125.4 MW -25.4 MVAR  
 Actual Tie Line Flow -247.7 MW To Area 4  
 -373.2 MW To Area 5  
 -1005.0 MW To Area 8  
 Unserved Load 4.7 MW  
 Interchange Error -16.26

Tie Lines for Area 2 - 2

Area Bus	Other Area Bus	ID	MW Leave	MVR Leave	MWLoss	MVRLoss	Meter	
2701	5	5708	1	-72.8	6.7	3.0	6.4	5708
2701	5	5708	2	-72.8	6.7	3.0	6.4	5708
2703	5	5708	2	0.0	0.0	0.0	0.0	2703
2703	5	5708	1	0.0	0.0	0.0	0.0	2703
2723	8	8720	1	-31.7	14.0	0.7	-0.3	2723
2732	8	8734	1	0.0	0.0	0.0	0.0	2732
2733	8	8734	1	0.0	0.0	0.0	0.0	2733
2736	8	8736	1	71.0	-9.7	0.4	1.0	2736
2736	8	8734	1	40.0	-3.6	0.5	0.3	2736
2736	8	8734	2	39.6	-3.9	0.5	0.3	8734
2740	8	8705	1	10.1	-3.0	0.0	-0.4	2740
2744	8	8710	2	42.6	1.4	0.2	0.1	8710
2744	8	8710	1	42.8	1.6	0.2	0.1	2744
2746	8	8712	1	0.0	0.0	0.0	0.0	2746
2801	5	5803	2	0.0	0.0	0.0	0.0	2801
2801	5	5803	1	0.0	0.0	0.0	0.0	2801
2802	4	4804	2	-84.0	7.1	1.3	-22.4	4804
2802	4	4804	1	-84.0	7.1	1.3	-22.4	4804
2803	4	4807	2	-39.8	15.0	0.3	-27.1	4807
2803	4	4807	1	-39.8	15.0	0.3	-27.1	4807
2805	8	8002	3	0.0	0.0	0.0	0.0	2805
2805	8	8002	2	0.0	0.0	0.0	0.0	2805
2805	8	8002	1	0.0	0.0	0.0	0.0	2805
2806	4	4807	2	0.0	0.0	0.0	0.0	2806
2806	4	4807	1	0.0	0.0	0.0	0.0	2806
2807	5	5805	2	0.0	0.0	0.0	0.0	2807
2807	5	5805	1	0.0	0.0	0.0	0.0	2807
2807	5	5803	2	-113.8	13.4	1.0	-4.2	5803
2807	5	5803	1	-113.8	13.4	1.0	-4.2	5803
2808	8	8004	2	-33.2	20.9	0.2	-36.7	8004
2808	8	8004	1	-33.2	20.9	0.2	-36.7	8004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 92 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2809	8	8002	1	0.0	0.0	0.0	0.0	2809
2815	8	8800	2	-279.3	21.8	2.1	12.9	8800
2815	8	8800	1	-279.3	21.8	2.1	12.9	8800
2820	8	8000	2	0.0	-12.9	0.0	-0.4	2820
2820	8	8000	1	0.0	-12.9	0.0	-0.4	2820
2900	8	8900	2	0.0	0.0	0.0	0.0	8900
2900	8	8900	1	0.0	0.0	0.0	0.0	8900
2901	8	8903	2	-398.1	81.2	1.4	-174.2	8903
2901	8	8902	1	-396.7	-92.9	1.4	-174.2	2901
8072	8	8901	1	200.0	-13.5	0.0	12.6	8072

### Bus Information for Area 2 - 2

Number	Name	Area	kV	LoadMW	LoadMVAR	GenMW	GenMVAR	Volt	Angle	Shunt
201	KK1-3J	2	115	0	0	0	0	1.01	24	0
202	KK1-4J	2	115	0	0	0	0	1.01	24	0
203	KK1-5J	2	115	0	0	0	0	1.01	24	0
204	RE-3J	2	115	0	0	0	0	1.01	22.7	0
205	RE-4J	2	115	0	0	0	0	1.01	22.7	0
206	CYP-2J	2	115	0	0	0	0	1.02	22	0
207	RE-5J	2	115	0	0	0	0	1.01	22.7	0
208	NPO2-1J	2	115	0	0	0	0	1.03	26.2	0
209	NPO2-2J	2	115	0	0	0	0	1.03	26.2	0
210	NR2-3J	2	115	0	0	0	0	0.99	16.8	0
211	NPO2-3J	2	115	0	0	0	0	1.03	26.2	0
212	NP-2J	2	69	0	0	0	0	0	0	0
214	YT_1	2	115	0	0	0	0	1.04	21	0
215	YT_1	2	115	0	0	0	0	1.04	21	0
216	SO1-2J	2	69	0	0	0	0	0	0	0
217	SO2-1J	2	115	0	0	0	0	1.01	5.1	0
218	SO2-2J	2	115	0	0	0	0	1.01	5.1	0
219	SO2-3J	2	115	0	0	0	0	0	0	0
220	NR2-4J	2	115	0	0	0	0	0.99	16.8	0
221	UB2-3J	2	115	0	0	0	0	1.03	14.7	0
222	UB2-4J	2	115	0	0	0	0	1.03	14.7	0
223	NN-4J	2	115	0	0	0	0	1	0.6	0
224	NN-5J	2	115	0	0	0	0	1	0.6	0
226	YT_1	2	115	0	0	0	0	1.04	21	0
228	su115	2	115	0	0	0	0	1.03	23.3	0
	SU2-									
229	11~1	2	115	0	0	0	0	1.03	23.3	0
230	NR2-5J	2	115	0	0	0	0	0.99	16.8	0
241	UD3-1J	2	115	0	0	0	0	1.02	21.7	0
242	UD3-2J	2	115	0	0	0	0	1.02	21.7	0
243	UD3-3J	2	115	0	0	0	0	1.02	21.7	0
251	KK1-3T	2	22	0	0	0	0	1.01	24	0
252	KK1-4T	2	22	0	0	0	0	1.01	24	0
253	KK1-5T	2	22	0	0	0	0	1.01	24	0
260	CYP-4J	2	115	0	0	0	0	1.02	22	0
262	RE-3T	2	22	0	0	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 93 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

263	RE-4T	2	22	0	0	0	0	0	0	0
271	NPO2-1T	2	22	0	0	0	0	1.03	26.2	0
272	NPO2-2T	2	22	0	0	0	0	1.03	26.2	0
275	SKI2-J3	2	115	0	0	0	0	1.01	27.1	0
276	SKI2-J4	2	115	0	0	0	0	0	0	0
277	NR3-J3	2	115	0	0	0	0	0	0	0
278	NR3-J4	2	115	0	0	0	0	0	0	0
2001	CLB-H1	2	12	0	0	19	6	1.06	35.8	0
2002	CLB-H2	2	12	0	0	19	6	1.06	35.8	0
2003	SRD-H1	2	7	0	0	0	0	1.02	16.4	0
2004	SRD-H2	2	7	0	0	0	0	1.02	16.4	0
2005	SRD-H3	2	7	0	0	0	0	1.02	16.4	0
2006	UR-H1	2	10	0	0	0	0	1.08	25.3	0
2007	UR-H2	2	10	0	0	0	0	1.08	25.3	0
2008	UR-H3	2	10	0	0	4	4	1.13	27.9	0
2009	NP-H1	2	3	0	0	2	0	0.96	16.6	0
2010	NP-H2	2	3	0	0	2	0	0.96	16.6	0
2011	LTK-H1	2	17	0	0	227	111	1.06	34.5	0
2012	LTK-H2	2	17	0	0	0	0	0	0	0
2013	LTK-H3	2	17	0	0	0	0	0	0	0
2014	LTK-H4	2	17	0	0	0	0	0	0	0
2021	NPO2-C11	2	14	0	0	0	0	0.97	29.1	0
2022	NPO2-C12	2	14	0	0	110	9	0.97	33.1	0
2023	NPO2-C10	2	14	0	0	113	10	0.97	33.2	0
2024	NPO2-C21	2	14	0	0	108	9	0.97	33	0
2025	NPO2-C22	2	14	0	0	107	9	0.97	32.9	0
2026	NPO2-C20	2	14	0	0	113	10	0.97	33.1	0
2051	PMN-H1	2	6	0	0	0	0	1.02	16.3	0
2052	PMN-H2	2	6	0	0	30	5	1.03	20.8	0
2053	PMN-H3	2	6	0	0	0	0	1.02	16.3	0
2054	PMN-H4	2	6	0	0	0	0	1.02	16.3	0
2201	PCH-1	2	22	7	3	0	0	1.02	21	6
2202	PCH-2	2	22	23	13	0	0	1.02	18.6	6
2203	SKI-1	2	22	22	11	0	0	1.02	16.6	11
2204	SKI-2	2	22	22	10	0	0	1.02	16.7	13
2205	NR2-1	2	22	17	9	0	0	1.02	15.4	10
2206	NR2-2	2	22	17	10	0	0	1.03	15.4	10
2207	NR1-1	2	22	28	18	0	0	1.01	13.3	12
2208	NR1-2	2	22	27	16	0	0	1.03	13.6	13
2209	BR-1	2	22	19	13	0	0	1.02	7.1	15
2210	BR-2	2	22	29	24	0	0	1.02	5.5	15
2211	PKC-1	2	22	13	5	0	0	1.02	4.5	9
2212	KK1-1	2	22	24	7	0	0	1.03	21.1	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 94 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2213	SU-1	2	22	16	10	0	0	1.03	21.3	6
2214	SU-2	2	22	11	11	0	0	1.02	22.1	15
2215	KNG-1	2	22	14	9	0	0	1.03	13.3	6
2216	KNG-2	2	22	8	8	0	0	1.02	14.6	10
2217	PO-1	2	22	15	9	0	0	1.03	15.3	0
2218	PO-2	2	22	10	4	0	0	1.02	16.9	0
2219	CYP-1	2	22	24	15	0	0	1.03	19.1	3
2220	CYP-3	2	22	12	6	0	0	1.03	20.8	6
2221	BPI-1	2	22	17	10	0	0	1.02	18.5	3
2222	KKU-1	2	22	11	9	0	0	1.03	21.4	0
2223	KK1-2	2	22	20	6	0	0	1.02	21.5	0
2224	KK1-6	2	22	22	7	0	0	1.03	21.2	0
2225	KK2-1	2	22	19	7	0	0	1.03	21	0
2226	KK2-2	2	22	19	6	0	0	1.02	21	0
2227	KL-1	2	22	25	11	0	0	1.01	16.2	6
2228	KL-2	2	22	8	4	0	0	1.02	18.3	0
2229	PYK-3	2	22	19	3	0	0	1.02	17.3	0
2230	PYK-1	2	22	12	5	0	0	1.03	18.3	0
2231	RE-1	2	22	4	1	0	0	1.02	22.6	0
2232	RE-2	2	22	19	9	0	0	1.03	20.6	0
2233	POT-1	2	22	6	2	0	0	1.02	20.6	0
2234	POT-2	2	22	22	10	0	0	1.03	18.6	0
2235	MK-1	2	22	17	7	0	0	1.01	18.2	0
2236	MK-2	2	22	27	11	0	0	1.03	17	0
2237	YT-1	2	22	20	8	0	0	1.02	18.6	9
2238	YT-2	2	22	26	10	0	0	1.02	17.8	6
2239	SS-1	2	22	17	6	0	0	1.02	12.9	6
2240	SS-2	2	22	29	12	0	0	1.02	11.3	9
2241	UB1-1	2	22	24	9	0	0	1.01	11.8	6
2242	UB1-2	2	22	21	11	0	0	1.02	12.3	6
2243	AN-1	2	22	15	7	0	0	1.02	14.5	0
2244	AN-2	2	22	25	7	0	0	1.02	13.2	0
2245	SRD-1	2	22	10	1	0	0	1.02	14.2	0
2246	SRD-2	2	22	12	2	0	0	1.02	13.7	0
2247	UB2-1	2	22	22	16	0	0	1.02	11.7	0
2248	KYT-1	2	22	3	0	0	0	1.04	20.4	0
2251	MD1-1	2	22	11	3	0	0	1.02	1.3	6
2252	MD1-2	2	22	14	8	0	0	1.02	0.8	9
2253	TH-1	2	22	6	3	0	0	1.01	1	0
2254	TH-2	2	22	16	6	0	0	1.02	-0.3	0
2255	CPA-1	2	22	20	10	0	0	1.03	26.5	0
2256	CPA-2	2	22	22	10	0	0	1.03	26.2	0
2257	BNN-1	2	22	14	5	0	0	1.03	15	6
2258	BNN-2	2	22	13	4	0	0	1.03	15.2	6
2259	NPO1-1	2	22	15	6	0	0	1.03	21.6	0
2260	NPO1-2	2	22	0	2	0	0	1.03	25.8	0
2261	KTL-1	2	22	13	3	0	0	1.01	6.1	6
2262	KTL-2	2	22	21	9	0	0	1.01	4	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 95 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2263	UD1-1	2	22	22	10	0	0	1.01	17.4	3
2264	UD1-2	2	22	20	11	0	0	1.02	17.7	3
2265	UD2-1	2	22	24	12	0	0	1.02	17.8	3
2266	UD2-2	2	22	11	6	0	0	1.01	19.4	0
2267	NBL-1	2	22	30	15	0	0	1.02	16.3	0
2270	LE-2	2	22	50	23	0	0	1.01	8.2	0
2271	NK-1	2	22	18	8	0	0	1.02	10.5	9
2272	NK-2	2	22	6	2	0	0	1.02	12.3	9
2273	NH-1	2	22	14	-1	0	0	1.01	14.7	0
2274	NH-2	2	22	0	0	0	0	1.01	16.7	0
2275	BDG-1	2	22	1	-1	0	0	1.04	16.2	0
2276	PKC-2	2	22	3	2	0	0	1.02	5.9	3
2277	PHK-1	2	22	11	5	0	0	1.02	5.8	6
2278	PHK-3	2	22	17	9	0	0	1.02	3.2	9
2279	BKN-1	2	22	6	3	0	0	1.02	2.4	3
2280	BKN-1	2	22	0	0	0	0	1.02	4	0
2281	SO1-1	2	22	27	10	0	0	1.02	2.6	3
2282	SO1-3	2	22	24	8	0	0	1.02	2.8	7
2283	SKA-1	2	22	11	5	0	0	1.02	21.5	0
2284	SKA-2	2	22	0	0	0	0	1.02	22.9	0
2288	NN-2	2	22	15	5	0	0	1.02	-3.6	3
2289	NN-3	2	22	13	5	0	0	1.02	-3.1	3
2291	BPI-2	2	22	20	10	0	0	1.03	18.1	3
2292	UB2-1	2	22	0	0	0	0	1.03	14.8	0
2293	NP-1	2	22	6	2	0	0	1.01	7.9	0
2294	SD-1	2	22	19	8	0	0	1.01	7.3	0
2295	SD-2	2	22	17	6	0	0	1.01	8.2	6
2299	MD2-2	2	22	6	3	0	0	1.02	0.9	0
2601	SO1	2	69	0	0	0	0	0	0	0
2603	TH	2	69	0	0	0	0	0	0	0
2604	NP	2	69	0	0	0	0	1.01	14	0
2701	PCH	2	115	0	0	0	0	0.99	22	0
2702	SKI	2	115	0	0	0	0	0.99	19.8	0
2703	NR2	2	115	394	230	0	0	1	17.8	82
2704	NR1	2	115	0	0	0	0	1	17.5	61
2705	BR	2	115	0	0	0	0	1.01	9.8	45
2706	PKC	2	115	25	6	0	0	1.01	6.2	11
2707	SU	2	115	0	0	0	0	1.03	23.5	23
2708	KNG	2	115	45	18	0	0	0.99	17	21
2709	PO	2	115	0	0	0	0	1	19.8	0
2710	CYP	2	115	72	43	0	0	1.02	22.4	0
2711	BPI	2	115	0	0	0	0	0.98	20.7	0
2712	KK1	2	115	103	32	0	0	1.01	24.4	38
2713	KK2	2	115	0	0	0	0	1.01	23.8	0
2714	KL	2	115	0	0	0	0	1	19.5	22
2715	PYK	2	115	40	17	0	0	0.99	19.9	0
2716	RE	2	115	47	21	0	0	1.01	23.1	23
2717	POT	2	115	0	0	0	0	0.99	21.5	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 96 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2718	MK	2	115	20	9	0	0	1	20.6	22
2719	YT	2	115	0	0	0	0	1.04	21.3	0
2720	SS	2	115	23	6	0	0	1.03	15.3	23
2721	UB1	2	115	0	0	0	0	1.03	15.2	23
2722	UB2	2	115	38	8	0	0	1.03	14.8	0
2723	SRD	2	115	0	0	0	0	1.02	16.4	0
2724	PMN	2	115	0	0	0	0	1.05	16.3	0
2725	AN	2	115	0	0	0	0	1.03	16.6	12
2726	MD1	2	115	0	0	0	0	0.97	3	0
2727	CLB	2	115	0	0	0	0	1.04	31.8	0
2728	CPA	2	115	0	0	0	0	1.01	29	0
2729	UR	2	115	0	0	0	0	1.03	25.3	0
2730	NPO1	2	115	38	22	0	0	1.03	25.7	23
2731	NPO2	2	115	0	0	0	0	1.03	26.5	0
2732	UD1	2	115	69	13	0	0	1.02	20.5	42
2733	UD2	2	115	17	9	0	0	1.02	21	42
2734	NBL	2	115	0	0	0	0	0.99	17.9	0
2735	LE	2	115	24	-2	0	0	0.97	14.7	15
2736	NK	2	115	50	18	0	0	0.99	13.1	70
2737	NH	2	115	10	4	0	0	1.02	16.7	25
2738	BDG	2	115	0	0	0	0	1.02	16.6	0
2739	PHK	2	115	58	16	0	0	1.01	8	45
2740	BKN	2	115	0	0	0	0	1.05	4	15
2741	SO1	2	115	0	0	0	0	1.01	6.1	24
2742	NP	2	115	0	0	0	0	0.99	8.6	0
2743	SD	2	115	0	0	0	0	0.98	13.3	0
2744	NN	2	115	0	0	0	0	1	0.7	27
2746	MD2	2	115	0	0	0	0	0.97	2.7	12
2747	TH	2	115	0	0	0	0	0.98	1.9	0
2748	BNN	2	115	33	10	0	0	0.99	16.9	0
2749	KTL	2	115	23	16	0	0	1.02	9.7	25
2750	SKA	2	115	0	0	0	0	1.02	22.9	0
2751	SO2	2	115	0	0	0	0	1.01	5	0
2752	KKU	2	115	0	0	0	0	1.01	24.3	0
2753	SU2	2	115	60	19	0	0	1.03	23.5	0
2754	PKB	2	115	0	0	33	-1	1.01	29.1	0
2755	UD3	2	115	0	0	0	0	1.02	22.4	0
2760	SKI2	2	115	0	0	0	0	0.99	19.7	0
2765	NR3	2	115	0	0	0	0	0	0	0
2770	KYT	2	115	0	0	0	0	0.99	20.8	0
2801	NR2	2	230	0	0	0	0	1	23.8	65
2802	CYP	2	230	0	0	0	0	1.02	25.5	67
2803	KK3	2	230	0	0	0	0	1.02	27.9	0
2804	NPO2	2	230	0	0	0	0	1.02	29.1	0
2805	RE	2	230	0	0	0	0	1.01	26.8	0
2806	KK1	2	230	0	0	0	0	1.02	27.5	0
2807	LTK	2	230	0	0	0	0	1.03	30.7	0
2808	UB2	2	230	0	0	0	0	1.04	15.8	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แล97ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2809	MD2	2	230	0	0	0	0	0	0	0
2810	SO2	2	230	0	0	0	0	0.98	3.7	0
2811	NN	2	230	0	0	0	0	0.98	2	0
2812	YT_2	2	230	0	0	0	0	1.01	24	0
2813	RE2	2	230	0	0	0	0	1.02	29.2	0
2814	SU2	2	230	0	0	0	0	1.01	25.5	0
2815	UD3	2	230	0	0	0	0	1.01	28.8	0
2820	NN2	2	230	0	0	0	0	0.98	2.4	0
	NN2-									
2821	Ju~2	2	230	0	0	0	0	0.98	2.3	0
	NN2-									
2822	Ju~1	2	230	0	0	0	0	0.98	2.3	0
2830	SK12	2	230	0	0	0	0	1.01	27.1	0
2840	NR3	2	230	0	0	0	0	0	0	0
2881	UD3-4J	2	230	0	0	0	0	0	0	0
2882	UD3-5J	2	230	0	0	0	0	0	0	0
2885	RE2-1J	2	230	0	0	0	0	1.02	31.3	0
2886	RE2-2J	2	230	0	0	0	0	1.02	31.3	0
2890	BR-230	2	230	0	0	0	0	1.01	9.8	0
2900	UD3	2	500	0	0	0	0	0	0	0
2901	RE2	2	500	0	0	0	0	1.02	32.9	-157
	NR2-									
7120	PEA1	2	115	0	0	0	0	0	0	0
	NR2-									
7121	PEA2	2	115	0	0	0	0	0	0	0
8072	NTN2-H2	2	18	0	0	200	-13	1	43.4	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# วิศวกรรมลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ปีที่ 33 ฉบับที่ 3

กันยายน 2559

- |   |    |
|---|----|
| 1. การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับการวิเคราะห์กระแสฟลัดแบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง        | 1  |
| บดินทร วัฒนะรัตน์ สมชาติ จีรวินาการ นิรุช จีรสวรรณกุล   |    |
| 2. การศึกษากระบวนการสร้างและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเอ็นมอสขนาด 0.5 ไมครอน                                    | 8  |
| รังสรรค์ เมืองเหลือ อนุชว เรืองพานิช  |    |
| 3. การวิเคราะห์ความเค้นของแม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยวิธีพลศาสตร์มีลติบอดีและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ | 16 |
| อนุชิต มงคล มนต์ศักดิ์ ทิมสาร   |    |
| 4. การวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างแบบรังผึ้งของวัสดุคอมโพสิทไมไฟเบอร์ - ซีเมนต์                         | 24 |
| ปุ่นปวีร์ จงรัตน์ศรีสกุล สมชัย นรเศรษฐีโคกถน  |    |
| 5. การออกแบบหัวดูดอากาศแบบสล็อตสำหรับกระบวนการชุบโลหะ   | 32 |
| ภัทรพันธุ์ หมายไถ่ กวีติ สุลักษณ์   |    |
| 6. ผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโตนดและแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติของแผ่นไม้อัดปลดสารพิษ                       | 39 |
| ชาติรี หอมเขียว วรพงศ์ บุญช่วยแทน วรธนพร ชีววุฒิพงษ์  |    |
| 7. การเลือกรูปแบบทางเศรษฐศาสตร์เพื่อลดต้นทุนการซ่อมบำรุงรถบรรทุก; กรณีศึกษารถบรรทุกสินค้าเกษตร            | 47 |
| ชาญชัย เหลาหา ศิขรินทร์ สุขโต   |    |
| 8. ค่าพลังงานความร้อนรายปีและต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่       | 55 |
| พรนิภา นุโนชา อวิษ สุวิวงษ์   |    |

# การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับการวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง

## A Comparative Study between ANN and ANFIS for Asymmetrical Fault Current Analysis in Power Systems

บดินทร วัฒนะรัตน์ สมชาติ จิรวินากร นิรุช จิรสวรรณกุล  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรที่ตำแหน่งของบัสและสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบมีหลายชั้นซ่อนชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ (ANN) เปรียบเทียบกับ ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (ANFIS) โดยทั้งสองระบบจะถูกนำมาเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เกิดกระแสฟอลต์และชนิดของกระแสฟอลต์ ที่มีผลต่อกระแสฟอลต์ สำหรับข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มาจากการจำลองระบบ IEEE 30 บัส และระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผลที่ได้จากระบบดังกล่าวถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสฟอลต์ที่ได้จากโปรแกรม PowerWorld ซึ่งผลที่ได้นั้นให้ข้อสรุปว่าการใช้ ANN สามารถหาคำตอบได้แม่นยำกว่า ANFIS

**คำสำคัญ:** การวิเคราะห์กระแสฟอลต์, โครงข่ายประสาทเทียม, ระบบอนุมาน, โครงข่ายปรับตัวได้

### Abstract

This paper presents the asymmetrical fault analysis at the location of buses and lines in the power system. Artificial Neural Network typed Multi Layer Neural Networks with Back-Propagation learning algorithm (ANN) is compared with Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS). The ANN and ANFIS are used to learn the relationship between fault location and fault type, which effect on fault current. The data used in this study came from IEEE 30-bus and EGAT North-eastern area which calculated by PowerWorld program. The analysis result shows that the ANN obtains more accurate solutions than the ANFIS.

**Keywords :** Fault current analysis, Artificial Neural Network, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการศึกษาเรื่องการลัดวงจรเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง การเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งอาจเกิดได้จากธรรมชาติ ความผิดพลาดหรือความตั้งใจของมนุษย์ ทุกครั้งที่เกิดการลัดวงจรจะมีกระแสไหลมากผิดปกติ และถ้าไม่มีการป้องกันหรือกำจัดจุดที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบให้เร็วที่สุด จะทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบเสียหายได้ ดังนั้นอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกัน

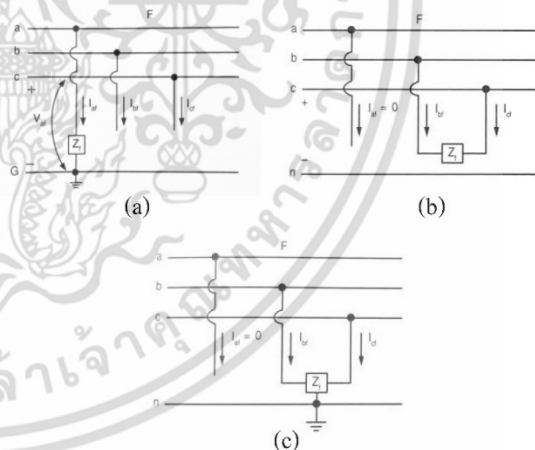
การคำนวณขนาดกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นไม่ว่ามีความรุนแรงมากน้อยเพียงใด อุปกรณ์ตัดคอนหรืออุปกรณ์ป้องกันจะต้องทำงานได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว และสามารถทนต่อความรุนแรงของการเกิดฟอลต์นั้นได้โดยไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีการคำนวณหากระแสฟอลต์เพื่อใช้ประกอบในการเลือกขนาดและชนิดของอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันนั้นๆ [1] ซึ่งการคำนวณหากระแสฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์เช่น สายส่ง หม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีอยู่ในระบบ และนำมาคำนวณด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงเริ่มมีการนำระบบโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีคุณสมบัติในการเรียนรู้และสามารถหาคำตอบของระบบที่มีความซับซ้อนได้ดี มาประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังเช่น นำมาหาตำแหน่งการเกิดฟอลต์ [3] นำมาใช้หาชนิดและรูปแบบของฟอลต์ [4] ใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบสมมาตร [5]

ในบทความนี้จึงได้นำเสนอวิธีการนำเสนอวิธีการนำระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Interface System : ANFIS) มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณขนาดกระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของบัสและบนสายส่งที่ตำแหน่งต่างๆ โดยทำการศึกษาจากระบบทดสอบ IEEE 30 bus และระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีจำนวนบัสและความยาวสายส่งมากที่สุด จึงเป็นภาคที่มีสถิติการเกิด

ฟอลต์มากที่สุดในประเทศไทย โดยทำการจำลองด้วยโปรแกรม PowerWorld และได้มีการเปรียบเทียบกระแสฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณระหว่างโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) กับระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (ANFIS)

## 2. ฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Fault)

การเกิดความผิดปกติหรือ ฟอลต์ (Fault) คือ การเกิดความผิดปกติที่ทำให้ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ตามปกติ ส่วนมากจะเปิดฟอลต์ที่เกิดจากการลัดวงจร (Short Circuit Fault) ซึ่งจำแนกออกได้เป็นสองประเภทคือ ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Fault) และฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Fault) ซึ่งฟอลต์แบบไม่สมมาตรนั้น มีโอกาสเกิดมากที่สุดถึงร้อยละ 98 โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ ฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (Single line to ground fault), ฟอลต์ระหว่างเฟส (Line to line fault) และฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (Double line to ground fault) [6]



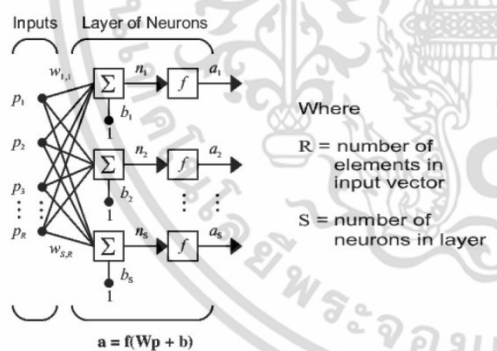
รูปที่ 1 : (a) การเกิดฟอลต์แบบ 1 เฟสลงดิน (b) การเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส (c) การเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน

## 3. โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network : ANN)

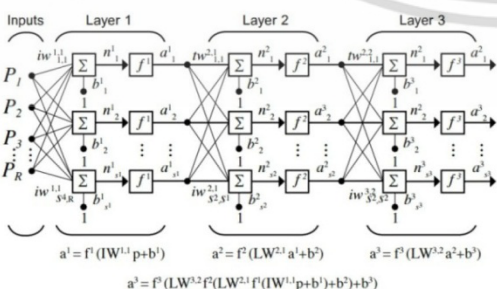
ANN คือ ระบบการคำนวณที่สร้างเลียนแบบการทำงานของระบบสมองมนุษย์ เพื่อใช้ประโยชน์ในการคาดคะเนเหตุการณ์จากข้อมูลที่มีอยู่ ANN ประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neural) ซึ่งจำลองมาจากการทำงานของระบบสมองมนุษย์ โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer

Function,  $f$ ) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight,  $w$ ) และค่าไบแอส (Bias,  $b$ ) เป็นเครื่องมือจำลองคุณสมบัติของเซลล์ประสาท ดังรูปที่ 1 เซลล์ประสาทหลายส่วนจะถูกเชื่อมต่อกันให้เกิดเป็นลักษณะโครงข่ายเป็นชั้น (Layer) ซึ่งเซลล์ประสาทแต่ละตัวที่อยู่ในชั้นเดียวกันจะไม่มีกรเชื่อมต่อกัน

โครงสร้างการเชื่อมต่อโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Networks) ดังรูปที่ 2 ซึ่งโครงสร้างประกอบขึ้นจากการจัดเรียงตัวของเซลล์ประสาทตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป (ไม่นับชั้นอินพุต) โดยปกติโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นจะอยู่ในรูปของการทำงานที่ป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward) และชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต เรียกว่าชั้นซ่อน (Hidden Layer) ซึ่งเป็นตัวเพิ่มความสามารถให้แก่โครงข่ายประสาทเทียม และสามารถมีชั้นซ่อนได้มากกว่า 1 ชั้น จำนวนของชั้นซ่อนและจำนวนของเซลล์ประสาทในแต่ละชั้นมีค่าไม่คงที่ ซึ่งในแต่ละชั้นอาจจะมีจำนวนเซลล์ประสาทที่แตกต่างกัน [2], [9]



รูปที่ 2 : โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว



รูปที่ 3 : โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

#### 4. ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System : ANFIS)

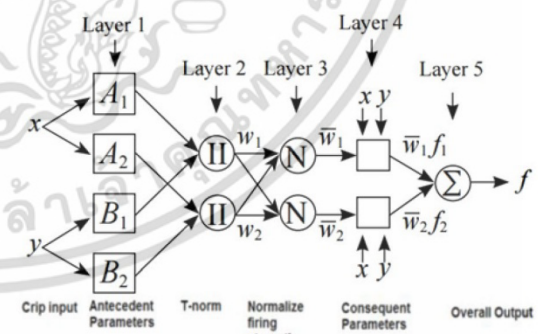
ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference system, ANFIS) เป็นการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งมีข้อดีในเรื่องของการเรียนรู้แต่ไม่สามารถอธิบายถึงการได้มาของการตัดสินใจได้ ร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) ซึ่งมีคุณสมบัติในการให้เหตุผลเชิงมนุษย์ แต่ไม่สามารถเรียนรู้ได้โดยอัตโนมัติ โดยระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของอนุมานฟัซซี่ (Fuzzy Inference) และวิธีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation) ของโครงข่ายประสาทเทียม [5]

จากรูปที่ 4 เป็นโครงสร้างระบบอนุมานฟัซซี่ที่มี 2 อินพุต 1 เอาต์พุต แต่ละอินพุตแบ่งเป็น 2 ฟัซซี่เซต แต่ละเซตประกอบด้วย  $A_1, A_2$  และ  $B_1, B_2$  พารามิเตอร์ของเอาต์พุตเป็น  $p, q,$  และ  $r,$  โดยมีกฎจำนวน  $L$  กฎ ดังนี้

Rule1: IF  $x_1$  is  $A_1$  and  $x_2$  is  $B_1$  THEN  $f_1 = p_1 x_1 + q_1 x_2 + r_1$

Rule2: IF  $x_1$  is  $A_2$  and  $x_2$  is  $B_2$  THEN  $f_2 = p_2 x_1 + q_2 x_2 + r_2$

RuleL: IF  $x_1$  is  $A_L$  and  $x_2$  is  $B_L$  THEN  $f_L = p_L x_1 + q_L x_2 + r_L$



รูปที่ 4 : โครงสร้างระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ [5]

โดยมีโครงสร้างประกอบไปด้วย 5 ชั้นดังนี้

ชั้นที่ 1 : Antecedent Parameters เป็นการหาค่าฟัซซี่จากอินพุตในรูปแบบกติ (Crisp input,  $x$ ) ให้เป็นค่าความเป็นสมาชิกผ่านฟังก์ชันความเป็นสมาชิก  $\mu_{A_i}$  หรือ  $\mu_{B_i}$  โดยที่

$$O_j^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (1)$$

เมื่อ  $O_j^1$  เป็นค่าความเป็นสมาชิกของ  $A_j$  ที่เกิดจากค่า  $x$  โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก อาจเป็นฟังก์ชันแบบสามเหลี่ยม รูปประฆังคว่ำหรือแบบอื่นก็ได้

ขั้นที่ 2: T-norm Operator หรือชั้นกฎของฟัซซี่ (fuzzy rule base) เป็นขั้นทำการเชื่อมโยงค่าฟัซซี่จากแต่ละมิติและส่งค่าผลคูณของฟัซซี่เป็นสัญญาณออก

$$w_j = \mu_{j1}(x_1)\mu_{j2}(x_2) \quad (2)$$

เมื่อ  $w_j$  เป็นค่า firing strength จากกฎแต่ละข้อ และ  $\mu_{j1}(x_1)$  เป็นค่าฟัซซี่จากมิติที่  $i$  ของกฎข้อที่  $j$

ขั้นที่ 3: Normalize firing strength หรือชั้นค่าถ่วงน้ำหนัก เป็นการนำค่าฟัซซี่ผลรวมจากข้อตั้งทุกกฎให้เป็นหนึ่งเดียว

$$\bar{w}_j = \frac{w_j}{w_1 + w_2 + \dots + w_L}, \quad j = 1, 2, \dots, L \quad (3)$$

ขั้นที่ 4: Consequent Parameters เป็นขั้นของเอาต์พุตพารามิเตอร์ ซึ่งหาได้จาก

$$\bar{w}_j f_j = \bar{w}_j (p_j x_1 + q_j x_2 + r_j) \quad (4)$$

ขั้นที่ 5: Overall Output เป็นขั้นเอาต์พุตของโครงข่าย โดยการดีฟัซซี่ฟิเคชัน (Defuzzification) ด้วยการรวมสัญญาณเข้ามาทั้งหมด

$$\bar{w}^T f = \sum_{j=1}^L \bar{w}_j f_j \quad (5)$$

เมื่อ  $\bar{w}^T = [\bar{w}_1 \ \bar{w}_2 \ \dots \ \bar{w}_L]$  เป็นค่าฟัซซี่ที่ผ่านวิธินอมอลไลซ์จากกฎข้อ 1 ถึง L และ  $f^T = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_L]$  เป็นส่วนเอาต์พุตของกฎข้อ 1 ถึง L

### 5. ระบบที่ใช้ในการจำลอง

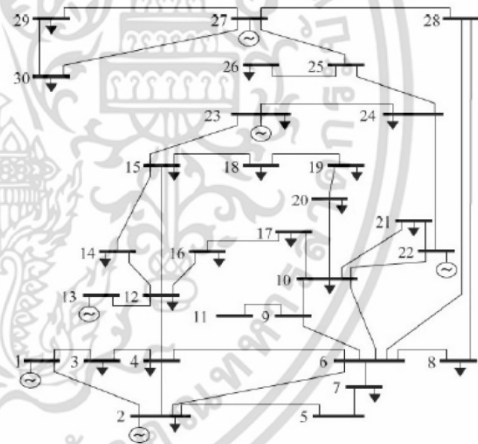
ระบบที่ใช้ในการจำลองเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลของกระแสฟอลต์ได้เลือกใช้ระบบไฟฟ้า 2 ระบบ ได้แก่

1. ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส เป็นระบบไฟฟ้ามาตรฐานระดับกลาง ประกอบไปด้วยบัสทั้งสิ้น 30 บัส มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 เครื่อง ดังรูปที่ 5 ใช้โปรแกรม PowerWorld ทำการจำลองระบบ โดยกำหนดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมทั้งระบบ 460 MW ซึ่งเป็นกำลังผลิตสูงสุดในระบบ [10]

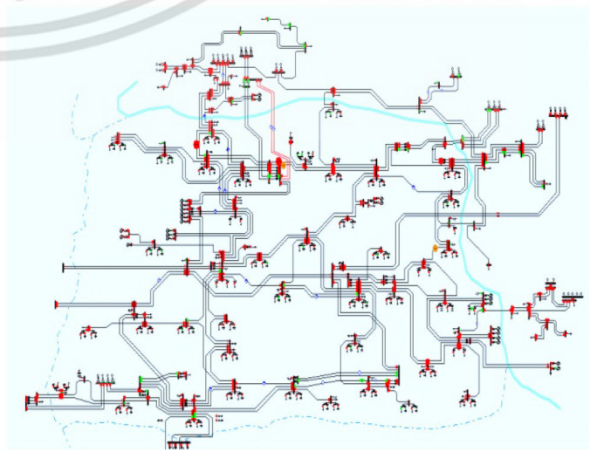
2. ระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ประกอบด้วยบัสที่ระดับแรงดัน 230 kV จำนวน 17 บัส, 115 kV จำนวน

56 บัส, สายส่ง 230 kV 12 วงจร และ 115kV 73 วงจร ดังรูปที่ 6 มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 38 เครื่องและกำหนดกำลังผลิตรวมในพื้นที่ 2,980 MW

ทำการจำลองระบบทดสอบ IEEE 30 บัสและระบบไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. เพื่อหากระแสฟอลต์ที่แบบไม่สมมาตรชนิด Single-line-to ground, Line-to-line และ Double line-to-ground ที่ตำแหน่งของแต่ละบัสทุกบัส และที่ตำแหน่ง 25%, 50% และ 75% ของความยาวสายส่งในแต่ละสายส่ง โดยทำการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และชนิดของฟอลต์ที่เกิดขึ้น สำหรับระบบทดสอบ IEEE 30 บัสนั้น มีข้อมูลทั้งหมด 396 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลชุดฝึกสอน 336 ชุด และชุดทดสอบ 60 ชุด ระบบของ กฟผ. มีข้อมูลทั้งหมด 780 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลชุดฝึกสอน 640 ชุด และชุดทดสอบ 140 ชุด สำหรับข้อมูลในแต่ละชุดจะประกอบไปด้วย 4 อินพุตและ 1 เอาต์พุต โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 1



รูปที่ 5: ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส [10]



รูปที่ 6 : ระบบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.

ตารางที่ 1 : แสดงข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต

	ข้อมูลที่ให้	Data Value
INPUT1	หมายเลขบัสใกล้เคียง (Near BUS)	1, 2, 3, ...
INPUT2	หลายเลขบัสไกล (Far BUS)	1, 2, 3... (กรณีเกิดฟอลต์ที่บัสใช้ค่า INPUT1)
INPUT3	ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากบัสใกล้เคียง	0.25 = ห่างจากบัส 25% 0.50 = ห่างจากบัส 50% 0.75 = ห่างจากบัส 75% 1.00 = เกิดฟอลต์ที่บัส
INPUT4	ชนิดของฟอลต์	2 = SLG fault 3 = L-L fault 4 = DLG fault
OUTPUT	กระแสฟอลต์	kA

## 6. ผลการจำลอง

### 6.1 การฝึกสอนและทดสอบระบบ ANN

ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับที่มี 2 ชั้นซ่อน โดยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อน และชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน เป็นการเลือกมาจากกระบวนการลองผิดลองถูก (Trial and error)

การพิจารณาความสามารถในการหาคำตอบนั้น สามารถพิจารณาได้จากค่าความผิดพลาด โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าความผิดพลาดรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error : RMSE) ดังสมการที่ 6

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (6)$$

เมื่อ  $Y_i$  คือ ค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Power world,  $\hat{Y}_i$  คือ ค่าที่ได้จากการทำนายโดยโครงข่าย ANN หรือ ANFIS และ  $n$  คือจำนวนข้อมูลฝึกสอนหรือทดสอบ

ในระบบ IEEE 30 บัส ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับที่มี 2 ชั้นซ่อน ชั้นซ่อนที่ 1, ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นเอาต์พุตใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt จำนวนรอบการเรียนรู้ 300 epochs โดยค่า Weight Bias เริ่มต้น

จากการสุ่ม ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2 สำหรับระบบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับมี 2 ชั้นซ่อน ชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นเอาต์พุตใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน Tan-Sigmoid, Log-sigmoid และ Linear ตามลำดับ ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt จำนวนรอบการเรียนรู้ 300 epochs โดยค่า Weight Bias เริ่มต้นจากการสุ่ม ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2

ทั้งสองระบบจะกำหนดโครงสร้างของจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2 เท่ากับ 11-10 ถึง 20-19 โดยในแต่ละโครงข่ายจะทำการฝึกสอน 20 ครั้งและเลือกครั้งที่ให้ค่าความผิดพลาดของชุดทดสอบที่น้อยที่สุดมาเปรียบเทียบ

### 6.2 การฝึกสอนและทดสอบระบบ ANFIS

โครงข่ายของ ANFIS เลือกใช้โมเดลฟuzzy Sugeno อันดับที่ 1 อินพุตที่ใช้คือตำแหน่งและชนิดของฟอลต์แบบไม่สมมาตร เอาต์พุตคือค่ากระแสฟอลต์

ในระบบ IEEE 30 บัส ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ dsigmf กระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid) และจำนวนรอบการคำนวณ 300 epochs ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3 และระบบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ gbellmf กระบวนการเรียนรู้แบบผสมและจำนวนรอบการคำนวณ 300 epochs ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงข่ายต่างๆ สำหรับ ANN ของระบบ IEEE 30 บัสและระบบ กฟผ.

จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2	Test error (RMSE)	
	IEEE 30 บัส	ระบบ กฟผ.
11-10	0.1964	0.2781
12-11	0.1767	0.2809
13-12	0.1813	0.2525
14-13	0.1803	0.2233
15-14	0.2493	0.2580
16-15	0.2118	0.2960
17-16	0.1714	0.2407
18-17	0.2295	0.2729
19-18	0.2627	0.2662
20-19	0.2277	0.2751

ตารางที่ 3 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงสร้างต่างๆ สำหรับ ANFIS ของระบบ IEEE 30 บัส

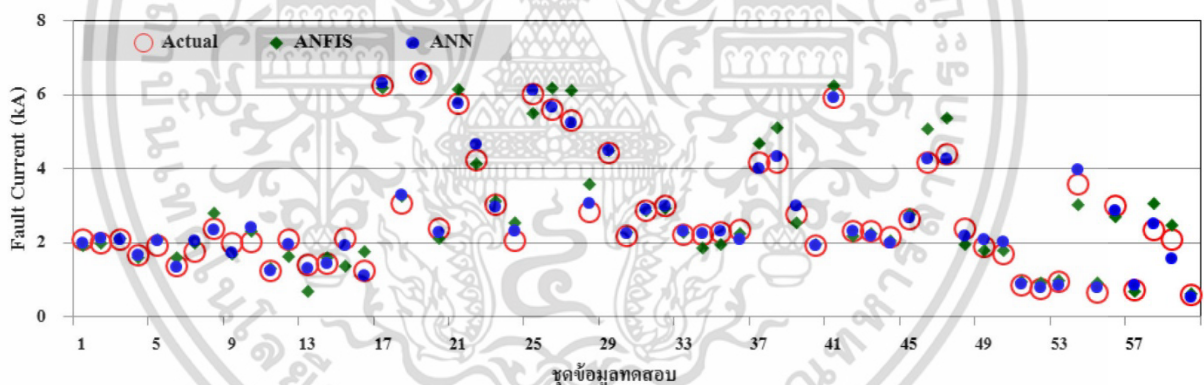
จำนวนโหนดอินพุต	Test error (RMSE)
3 3 3 4	0.3934
3 4 3 3	0.7180
4 3 3 3	0.7828
3 3 4 4	1.6054
4 4 3 3	1.9097
4 3 4 3	5.0398
3 4 3 4	0.7124

จากตารางที่ 3 ในระบบ IEEE 30 บัส โครงสร้างของ ANFIS ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เท่ากับ 3 3 3 4 เป็นโครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลในชุดฝึกสอนต่ำที่สุด เมื่อนำค่ากระแสฟอลต์ที่ได้จาก ANN และ ANFIS มาเปรียบเทียบกับค่าจริงของชุดทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 7

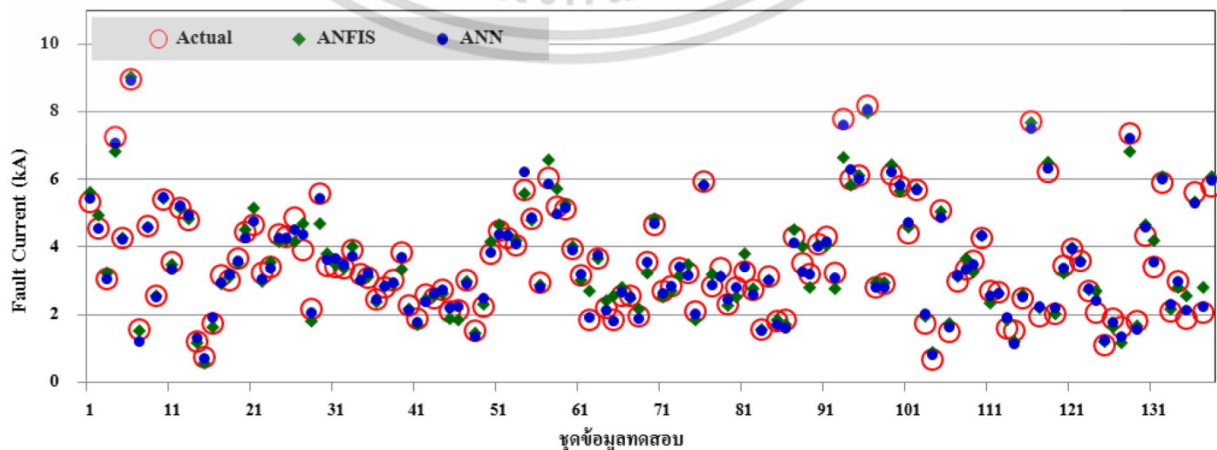
ตารางที่ 4 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงสร้างต่างๆ สำหรับ ANFIS ของระบบ กฟผ.

จำนวนโหนดอินพุต	Test error (RMSE)
4 3 2 2	<b>0.7328</b>
3 4 2 2	0.6546
4 4 2 2	0.5490
5 4 2 2	0.3771
4 5 2 2	0.4078
5 5 2 2	0.4887

จากตารางที่ 4 ในระบบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. โครงสร้าง ANFIS ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 แบบ 5 4 2 2 เป็นโครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลในชุดทดสอบต่ำที่สุด เมื่อนำค่ากระแสฟอลต์ที่ได้จาก ANN และ ANFIS มาเปรียบเทียบกับค่าจริงของชุดทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 : เอาท์พุทที่ได้จาก ANN และ ANFIS เปรียบเทียบกับค่าจริงของระบบ IEEE 30 บัส



รูปที่ 8 : เอาท์พุทที่ได้จาก ANN และ ANFIS เปรียบเทียบกับค่าจริงของระบบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อใดๆ ไม่ว่ากรณิดังนี้ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 106 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์กระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าโดยใช้ ANN เปรียบเทียบกับ ANFIS ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ใช้สำหรับวิเคราะห์กระแสฟอลต์ด้วยการนำระบบดังกล่าวมาทำนายค่ากระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบไฟฟ้า และได้มีการเปรียบเทียบผลการทำนายที่ได้จากทั้งสองระบบ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้ ANN มีความคลาดเคลื่อน RMSE น้อยกว่าการใช้ ANFIS และเมื่อพิจารณาโครงสร้างของทั้งสองโครงข่ายที่ให้ค่า RMSE น้อยที่สุดจะพบว่า โครงสร้างของ ANN ที่เหมาะสมนำมาใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ควรประกอบด้วยชั้นซ่อนจำนวน 2 ชั้นซ่อน ในแต่ละชั้นซ่อนควรมีจำนวนโหนดอยู่ในช่วง 12-18 โหนด สำหรับโครงสร้างของ ANFIS ที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนและขนาดของระบบกำลังไฟฟ้า โดยถ้าเป็นระบบขนาดใหญ่ ควรจะมีจำนวนโหนดของแต่ละชั้นมากกว่า 3 โหนด

เมื่อพิจารณาโครงสร้างและความคลาดเคลื่อน RMSE ที่น้อยที่สุดจะเห็นได้ว่า ANN จะมีขนาดโครงสร้างและมีความซับซ้อนของระบบโครงข่าย รวมทั้งใช้เวลาในการฝึกสอนมากกว่า ANFIS จึงสามารถให้คำตอบที่มีความคลาดเคลื่อน RMSE น้อยกว่า ดังนั้น ANN จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

การทำนายกระแสฟอลต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม สามารถนำไปใช้ประเมินถึงความรุนแรงที่จะเกิดขึ้นในระบบกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดฟอลต์ในระบบได้ เพื่อการวางแผนรองรับ และป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในระบบกำลังไฟฟ้า สำหรับการคำนวณกระแสฟอลต์ อาจทำให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นได้ด้วยการเพิ่มข้อมูลปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อกระแสฟอลต์ เช่น ค่ากำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่ค่าต่างๆ , การจัดรูปแบบข้อมูลตำแหน่งของจุดที่เกิดฟอลต์ ซึ่งเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไป

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hadi Saadat, Power System Analysis second edition, McGraw-Hill, Inc, New York, 2004.
- [2] S. Jirivibhakorn, "Application of Neural Networks in Power Systems," Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 2011.
- [3] J. J. Mora, "Fault Location in Power Distribution Systems using ANFIS Nets and Current Patterns", IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition, Latin America, 2006.
- [4] M. Tarafdar, "Fault classification and location of power transmission lines using artificial neural network", International Power Engineering Conference (IPEC 2007), Singapore, Dec, 2007.
- [5] Jang, J.-S.R., "ANFIS : Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol.23, pp.665-685, May/June 1993.
- [6] Stephen Marx. And Dean Bender, "An Introduction to Symmetrical Components, System Modeling and Fault Calculation", 30th Annual HAND-ON Relay School, Washington State University, March, 2013.
- [7] C. Jidrchu and S. Jirivipakorn, "Implementation of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference systems in Fault Current Analysis," Kasetsart Engineering Journal, Vol.26, No.84, pp.59-68, April-June, 2013.
- [8] J. W. Hi Hines, Fuzzy and Neural Approaches in Engineering MATLAB Supplement, John Wiley and Sons, New York, 1997.
- [9] Martin T. Hagan, Howard B. Demuth Mark Beale, "Neural Network Design", Oklahoma State University, 1996.
- [10] [Online] <http://publish.illinois.edu/smartergrid/ieccc-30-bus-system>, Information Trust Institute, University of Illinois.
- [11] [Online] <http://www.mathworks.com/help/fuzzy/anfis.html>

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายบดินทร วัฒนะรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	3 พฤษภาคม 2531
ที่อยู่	46 ม.2 ซ.เรวดี63 ถ.เรวดี ต.ตลาดขวัญ อ.เมืองนนทบุรี จ.นนทบุรี 11000
ประวัติการศึกษา	2549 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายสายวิชา วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย 2554 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	2555-2556 วิศวกรไฟฟ้า โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีม่วง บริษัท ชีโนไทย เอ็นจิเนียริง แอนด์คอนสตรัคชั่น จำกัด มหาชน 2556-ปัจจุบัน วิศวกรระดับ 6 ศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าแห่งชาติ ฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ผลงานทางวิชาการ	การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับการวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 33 ฉบับที่ 3 กันยายน 2559